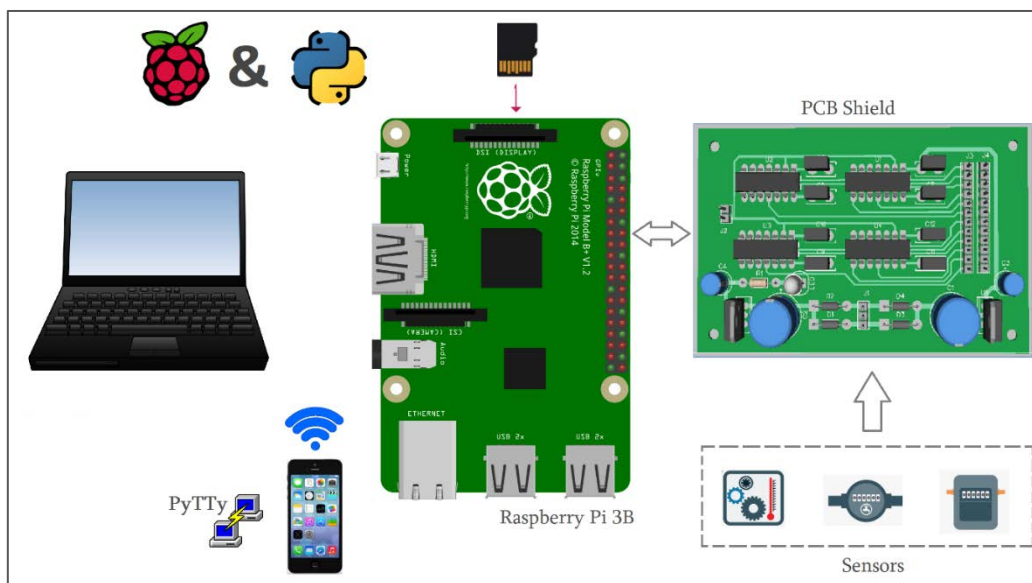


ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τίτλος (ελληνικά):

Σχεδίαση και Υλοποίηση αναλογικού οκτα-κάναλου συστήματος διασύνδεσης και οδήγησης αναλογικών αισθητήρων για τον υπολογιστή τσέπης Raspberry Pi3.

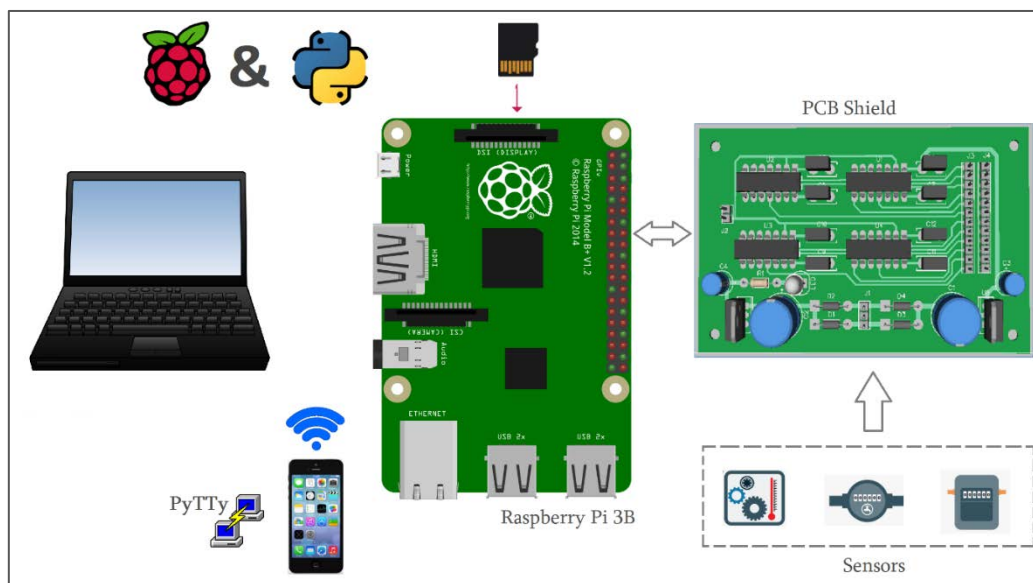


Μεταπτυχιακός Φοιτητής / Φοιτήτρια: Παναγιώτης Λιοσάτος, ΑΜ040
Επιβλέπων / Επιβλέπουσα: Στυλιανός Μ. Ποτηράκης, Καθηγητής

MSc THESIS

Title (in English):

Design and Implementation of an 8-channel analog sensors interface system for Raspberry Pi3 pocket computer.



Student: Panagiotis Liosatos, R.N 040

Project Supervisor: Stelios M. Potirakis, Professor

ATHENS-EGALEO, JULY 2020

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη, η σχεδίαση και υλοποίηση ενός τυπωμένου κυκλώματος επέκτασης (pcb shield) για τον καινοτόμο υπολογιστή τσέπης Raspberry Pi 3B, που αφορά την διασύνδεση και οδήγηση ενός πλήθους αναλογικών αισθητήρων βιομηχανικού κυρίως τύπου και ποικίλων εφαρμογών. Πραγματοποιείται η σχεδίαση και υλοποίηση αναλογικού οκτα-κάναλου συστήματος διασύνδεσης μαζί με τα κυκλώματα προσαρμογής και οδήγησης των αισθητήρων καθώς και η ψηφιοποίηση των σημάτων και αποστολή τους στον μικροεπεξεργαστή του Raspberry Pi3.

Η καινοτομία της συγκεκριμένης εφαρμογής έγκειται στη δυνατότητα διασύνδεσης και οδήγησης οποιουδήποτε αισθητήρα αναλογικής εξόδου, με ελάχιστες τροποποιήσεις στο αναλογικό τυπωμένο κύκλωμα - αλλαγές που αφορούν σε τιμές παθητικών στοιχείων - και εισάγοντας κάθε φορά κατάλληλο πίνακα βαθμονόμησης (lookup table) στη ψηφιακή διάταξη. Πρόκειται για εργασία σχεδιασμού και υλοποίησης συστήματος καταγραφής αναλογικών αισθητήρων.

Σημαντικός παράγοντας για την κατασκευαστική δομή του συστήματος είναι η δυνατότητα χρήσης του κυκλώματος αυτού σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών. Λαμβάνοντας υπόψη το μεγάλο και ποικίλο πλήθος των αισθητηρίων που κυκλοφορούν στην αγορά, ορίστηκε το σύστημα να μπορεί να συλλέγει δεδομένα από έντεκα (11) συνολικά αισθητήρες, οκτώ (8) αναλογικής εξόδου και τριών (3) ψηφιακής εξόδου.

ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ: Αναλογικοί Αισθητήρες, Αισθητήρες Αναλογικής Εξόδου, Αναλογικά Κυκλώματα Αισθητήρων, Βρόγχος Ρεύματος 4-20mA, Κύκλωμα Οδήγησης Αναλογικών Αισθητήρων, Οδήγηση Αισθητήρων Ρεύματος, Οδήγηση Αισθητήρων Τάσης, Οδήγηση Αναλογικών Αισθητήρων, Πλακέτα Επέκτασης, Σχεδίαση Αναλογικού Κυκλώματος, Σχεδίαση Πλακέτα Επέκτασης, Σχεδίαση PCB, Σχεδίαση Τυπωμένου Κυκλώματος, Τυπωμένο Κύκλωμα Επέκτασης, Υπολογιστής Raspberry Pi

ABSTRACT

The aim of this master thesis is the study, the design and the materialization of a printed circuit board (pcb) shield for the innovative pocket computer Raspberry Pi 3B, used for connecting and driving a multitude of analog sensors of diverse applications. The thesis develops the design and materialization of an analog eight-channel interconnection system accompanied by the adjusting and driving circuits of the sensors, as well as the digitalization of all signals and their transmission to the microprocessor of Raspberry Pi3.

The innovation of this particular application lies within the ability to interconnect and drive any kind of sensor with analog output, only with a minimum of modifications on the pcb shield, such as changes in the values of passive components, and introducing each time suitable lookup table in the digital structure.

A most important factor in the structure of this project is the circuit's ability to be used in as wider as possible range of applications. Taking into consideration the vast and diverse multitude of sensors in the market, the project was decided to be able to gather data from totally 11 sensors, 8 analog and 3 digital output.

KEYWORDS: 4-20mA Current Loop Transmitter, Analog Current Sensors, ADC, Analog Sensors, Analog Sensors Interface System, Analog Signal Conditioning, Analog System Design, Analog to Digital Converter, Analog Voltage Sensors, Design Analog Sensors Interface System, Sensor Adjustment, Design Interface System, Digital Sensors, Design Signal Conditioning and Filtering, Easy EDA, PCB Design, Printed Circuit Board, Raspberry Pi, RPi, Pocket Computer

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήταν μεγάλη παράλειψη εκ μέρους μου να μην ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν και με στήριξαν για την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Αρχικά, στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Στυλιανό Ποτηράκη οφείλω τις θερμές μου ευχαριστίες όχι μόνο για την καθοδήγηση και εύστοχες παρατηρήσεις του, αλλά και για την άψογη συνεργασία και τις εποικοδομητικές μας συζητήσεις στο χώρο της έρευνας.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον τμηματάρχη μου και φίλο Γρηγόρη για την υποστήριξη και παρότρυνσή του να λάβω μέρος στο συγκεκριμένο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών, κομβικό σημείο εκκίνησης αυτού του ταξιδιού. Επίσης, ειδική μνεία οφείλω να κάνω στην πολύτιμη βοήθεια του φίλου Ηλία, ο οποίος δήλωνε παρών σε κάθε μου “τεχνολογική” ανησυχία.

Πρωτίστως όμως ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου για την στήριξη της προσπάθειάς μου. Ιδιαίτερα θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στη σύζυγό μου Αναστασία για την υπομονή και την κατανόηση που επέδειξε όλο αυτό το διάστημα.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές και συμφοιτητές μου για τη συνεργασία που είχαμε καθ’ όλη την διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<u>ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....</u>	3
<u>ABSTRACT.....</u>	4
<u>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....</u>	5
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	
<u>ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....</u>	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	
<u>ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ : ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΑ.....</u>	11
1.1 Βασικές Κατηγορίες Αισθητηρίων (Ταξινόμηση Αισθητήρων).....	12
1.2 Βασικά Χαρακτηριστικά Αισθητηρίων.....	13
1.3 Μέθοδοι Οδήγησης Αισθητηρίων.....	15
1.3.1 Αισθητήρες Αναλογικής Εξόδου - Τάσης.....	15
1.3.2 Αισθητήρες Αναλογικής Εξόδου – Ρεύματος.....	16
1.3.3 Αισθητήρες Ψηφιακής Εξόδου.....	19
1.4 Κυκλώματα Ρύθμισης Σήματος Αισθητήρων (Signal Conditioning).....	21
1.5 Βαθμονόμηση Αισθητηρίων.....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
<u>ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....</u>	25
2.1 Βασικά Χαρακτηριστικά του Συστήματος.....	25
2.2 Γενικό Μπλοκ Διάγραμμα Κατασκευής.....	27
2.3 Χρησιμοποιούμενοι Αισθητήρες.....	29
2.4 Επιλογή Τελεστικών Ενισχυτών.....	30
2.5 Επιλογή Πυκνωτών Αποσύζευξης (decoupling).....	32
2.6 Επιλογή κυκλώματος Παροχής Τάσεως +24V dc.....	33
2.7 Πηγή Σταθερού Ρεύματος.....	34
2.8 Απαιτήσεις Τροφοδοσίας και επιλογή τροφοδοτικής διάταξης.....	38
2.9 Το Τυπωμένο Κύκλωμα.....	40
2.10 Επιλογή υλικών και Προσομοίωση κυκλωμάτων.....	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
<u>ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΑΝΑΛΟΓΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ.....</u>	43
3.1 Βασικό Κύκλωμα Οδήγησης Αισθητηρίων (Signal Conditioning).....	43
3.2 Υπολογισμός Στοιχείων Κυκλωμάτων Οδήγησης Αισθητήρων Ρεύματος...	46
3.3 Υπολογισμός Στοιχείων Κυκλωμάτων Οδήγησης Αισθητήρων Τάσεως.....	49
3.3.1 Στοιχεία υπολογισμού 1ου Καναλιού Οδήγησης Αισθητήρων Τάσεως...	50

3.3.2	Στοιχεία υπολογισμού 2ου Καναλιού Οδήγησης Αισθητήρων Τάσεως...	55
3.3.3	Στοιχεία υπολογισμού 3ου Καναλιού Οδήγησης Αισθητήρων Τάσεως...	58
3.3.4	Στοιχεία υπολογισμού 4ου Καναλιού Οδήγησης Αισθητήρων Τάσεως...	61
3.4	Χαμηλοπερατό Φίλτρο Butterworth Sallen-Key 3ης τάξης.....	64
3.5	Κύκλωμα Οδήγησης Αισθητηρίων Αναλογικής Εξόδου.....	69
3.6	Συνδετήρες Διασύνδεσης Αναλογικών Αισθητήρων και Τροφοδοσίας.....	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4		
<u>ΑΝΑΛΟΓΙΚΟΣ – ΨΗΦΙΑΚΟΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ADC.....</u>		72
4.1	Μετατροπέας ADC MCP3424.....	72
4.2	Διάγραμμα Βαθμίδων και Τεχνικά Χαρακτηριστικά του Μετατροπέα ADC.	74
4.3	Σχηματικό Διάγραμμα Μετατροπέα ADC.....	75
4.4	Προγραμματισμός και Έλεγχος λειτουργιών Μετατροπέα ADC.....	77
4.5	Πρωτόκολλο Διασύνδεσης και Επικοινωνίας με το Μετατροπέα ADC.....	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5		
<u>ΨΗΦΙΑΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....</u>		82
5.1	Raspberry Pi, ένας υπολογιστής τσέπης.....	83
5.1.1	Βασική Αρχιτεκτονική & Τεχνικά Χαρακτηριστικά Raspberry Pi 3B.....	84
5.1.2	Ακροδέκτες Γενικής Χρήσης του Raspberry Pi.....	86
5.1.3	Πρωτόκολλα Επικοινωνίας και Διασύνδεσης με άλλες συσκευές.....	88
5.1.4	Λειτουργικά Συστήματα.....	89
5.2	Η Γλώσσα Προγραμματισμού Python.....	90
5.3	Βασικές Ρυθμίσεις του Raspberry Pi και Εγκατάσταση Βιβλιοθηκών.....	91
5.4	Κυκλώματα Οδήγησης Αισθητηρίων Ψηφιακής Εξόδου.....	92
5.5	Έλεγχος Θερμοκρασίας του τυπωμένου κυκλώματος.....	94
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6		
<u>ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....</u>		96
6.1	Υλοποίηση – Συναρμολόγηση Αναλογικής Διάταξης (pcb shield).....	96
6.2	Έλεγχος Αναλογικής Διάταξης (pcb shield) – Εργαστηριακές Μετρήσεις....	99
6.3	Υλοποίηση Ψηφιακής Διάταξης.....	104
6.4	Έλεγχος Ορθής Λειτουργίας Αναλογικού σε Ψηφιακού Μετατροπέα.....	107
6.5	Βαθμονόμηση Αισθητηρίων.....	110
6.6	Κουτί Τοποθέτησης Τυπωμένου Κυκλώματος Επέκτασης.....	112
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7		
<u>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....</u>		113
7.1	Μελλοντικές Βελτιώσεις – Επεκτάσεις.....	114

7.2	Πεδίο Εύρεσης Εφαρμογών.....	116
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α		
	<u>ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΤΟΥ ΤΥΠΩΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ.....</u>	118
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β		
	<u>ΣΧΗΜΑΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ.....</u>	122
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ		
	<u>ΑΡΧΕΙΑ GERBER ΤΥΠΩΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ</u>	127
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ		
	<u>ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΩΝ.....</u>	134
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε		
	<u>ΠΗΓΑΙΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ.....</u>	140
	<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΗΓΕΣ.....</u>	152

ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στη σύγχρονη κοινωνία, οι υπάρχουσες συσκευές στη καθημερινότητα του ανθρώπου, περιλαμβάνουν τεχνολογίες που πριν από κάποια χρόνια φαντάζονταν σενάρια επιστημονικής φαντασίας. Το κύριο αίτιο για την ραγδαία ανάπτυξη και διαθεσιμότητα τέτοιων συσκευών είναι η εξέλιξη της μικροηλεκτρονικής, των μικροϋπολογιστικών συστημάτων σε συνδυασμό πάντα με τα σημερινά υψηλής τεχνολογίας συστήματα μετρήσεων.

Οι αισθητήρες καλύπτουν ένα τεράστιο φάσμα εφαρμογών με σκοπό την εξυπηρέτηση του ανθρώπου και έχουν καταστεί πλέον τόσο κοινοί, που συχνά η ύπαρξή τους θεωρείται δεδομένη. Η ανάπτυξη των σύγχρονων συστημάτων συλλογής και μετάδοσης δεδομένων καθώς επίσης και των συστημάτων επιτήρησης εγκαταστάσεων και μηχανών, έχει στρέψει τις τελευταίες δεκαετίες το ενδιαφέρον της επιστήμης και της τεχνολογίας στην ανάπτυξη αισθητήρων με βελτιωμένα χαρακτηριστικά. Οι αισθητήρες άλλωστε, εκτός από τις δυνατότητες μέτρησης των μη ηλεκτρικών μεγεθών τις οποίες παρέχουν, αποτελούν τα απαραίτητα εκείνα εξαρτήματα-μέσα τα οποία προσδίδουν τη δυνατότητα αυτοματισμού και ελέγχου σε ένα σύστημα: την καθοδήγηση συστημάτων από ηλεκτρονικά συστήματα χωρίς την απαίτηση ανθρώπινης παρέμβασης. Η ανάγκη συλλογής, απεικόνισης, καταγραφής και επεξεργασίας δεδομένων είναι ολοένα και πιο επιτακτική και κατά κόρον γίνεται σήμερα μέσω υπολογιστικών συστημάτων.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη, η σχεδίαση και υλοποίηση ενός τυπωμένου κυκλώματος επέκτασης (pcb shield) για τον καινοτόμο υπολογιστή τσέπης Raspberry Pi 3B, που αφορά την διασύνδεση και οδήγηση ενός πλήθους αναλογικών αισθητηρίων, βιομηχανικού κυρίως τύπου και ποικίλων εφαρμογών. Πραγματοποιείται η σχεδίαση και υλοποίηση αναλογικού οκτα-κάναλου συστήματος διασύνδεσης μαζί με τα κυκλώματα προσαρμογής και οδήγησης των αισθητήρων καθώς και η ψηφιοποίηση των σημάτων και αποστολή τους στον μικροεπεξεργαστή του Raspberry Pi3.

Η καινοτομία της συγκεκριμένης εφαρμογής έγκειται στη δυνατότητα διασύνδεσης και οδήγησης οποιουδήποτε αισθητήρα αναλογικής εξόδου, με ελάχιστες τροποποιήσεις στο αναλογικό τυπωμένο κύκλωμα - αλλαγές που αφορούν σε τιμές παθητικών στοιχείων - και εισάγοντας κάθε φορά κατάλληλο πίνακα βαθμονόμησης (lookup table) στη ψηφιακή διάταξη. Πρόκειται για εφαρμογή σχεδιασμού και υλοποίησης ευέλικτου συστήματος καταγραφής αισθητήρων ποικίλων εφαρμογών.

Συγκεκριμένα, το υφιστάμενο τυπωμένο κύκλωμα επέκτασης έχει την δυνατότητα λήψης δεδομένων από ένα έως και οκτώ αισθητήρες αναλογικής εξόδου. Η σχετική πληροφορία, με χρήση κατάλληλων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και του αναλογικού σε ψηφιακού μετατροπέα (A/D), μετασχηματίζεται σε κατάλληλη ψηφιακή μορφή που μπορεί να δεχθεί και να επεξεργαστεί ο υπολογιστής Raspberry Pi3. Επιπλέον παρέχεται η δυνατότητα οδήγησης τριών αισθητήρων ψηφιακής εξόδου απ' ευθείας στην ψηφιακή

διάταξη. Εκεί, μέσω κατάλληλου προγραμματισμού γίνεται βαθμονόμηση των αισθητήρων με δυνατότητα απεικόνισης, αποθήκευσης ή ασύρματης μετάδοσης των μετρήσεων του αντίστοιχου πλέον φυσικού μεγέθους.

Η υλοποίηση της Ψηφιακής Διάταξης γίνεται μέσω του υπολογιστή Raspberry Pi και συγκεκριμένα της έκδοσης “Raspberry Pi 3B”. Ο κύριος λόγος που επιλέγεται ο συγκεκριμένος μικροϋπολογιστής έναντι άλλων μικροϋπολογιστών ή μικρό-ελεγκτών, είναι ότι πρόκειται για έναν πλήρη υπολογιστή “τσέπης”, οικονομικό σε σχέση με την επεξεργαστική ισχύ που προσφέρει, διαθέτοντας σύνδεση ηλεκτρονικού υλικού και είναι εύκολα επεκτάσιμος. Επιπλέον οι πολύ μικρές του διαστάσεις και το μικρό του βάρος, το καθιστούν ιδανικό στοιχείο συστημάτων αυτοματισμού μικρών εγκαταστάσεων αποτελώντας την “καρδιά” του και παρέχοντας παράλληλα τη δυνατότητα ασύρματης δικτύωσης και μετάδοσης δεδομένων, ακόμη και τηλεπίβλεψης μέσω ενός κινητού τηλεφώνου (smart-phone).

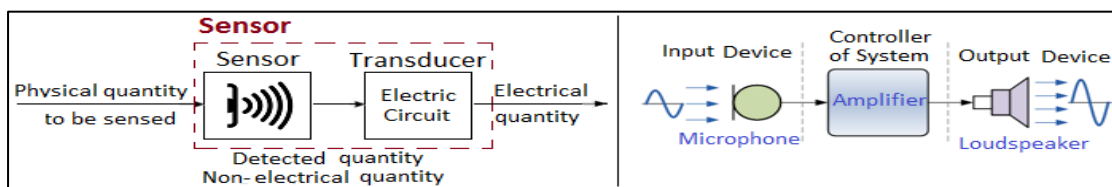
Η διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας είναι η εξής:

Στο **Κεφάλαιο 1** γίνεται θεωρητική αναφορά στα αισθητήρια δίνοντας έμφαση στις μεθόδους οδήγησής τους. Στο **Κεφάλαιο 2** ορίζονται οι προδιαγραφές του υπό κατασκευή συστήματος, η λογική σχεδιάσής του και περιγράφεται το βασικό υλικό που χρησιμοποιείται. Στο **Κεφάλαιο 3** αναλύονται και υπολογίζονται ξεχωριστά όλες οι βαθμίδες που απαρτίζουν το αναλογικό σύστημα οδήγησης των αισθητηρίων τάσεως και ρεύματος. Υπολογίζονται οι τιμές όλων των εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση του συστήματος και που απαρτίζουν το τυπωμένο κύκλωμα (hardware), ενώ παράλληλα αιτιολογείται και η επιλογή των εξαρτημάτων. Στη συνέχεια στο **Κεφάλαιο 4** ακολουθεί η ανάλυση του αναλογικού σε ψηφιακού μετατροπέα (A/D) και ο τρόπος προγραμματισμού του, ενώ στο **Κεφάλαιο 5** περιγράφεται η ψηφιακή διάταξη του «Raspberry Pi 3B». Συγκεκριμένα παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του δομή, ο λόγος της επιλογής του καθώς και αναλυτικά ο τρόπος λειτουργίας του. Στο ίδιο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση και του τρόπου οδήγησης και επικοινωνίας αισθητηρίων ψηφιακής εξόδου. Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζεται το συνολικό ενσωματωμένο σύστημα-κατασκευή, με τα σχετικά μπλοκ διαγράμματα των λειτουργικών ελέγχων μαζί με τους πίνακες μετρήσεων, ενώ στο **Κεφάλαιο 7** αξιολογείται η απόδοση του τυπωμένου κυκλώματος επέκτασης (pcb shield) καταθέτοντας προτάσεις για μελλοντικές επεκτάσεις και βελτιώσεις επί της κατασκευής. Στα **Παραρτήματα Α, Β, Γ και Δ** παρατίθενται αντιστοίχως οι φωτογραφίες κατά την διάρκεια των λειτουργικών ελέγχων και μετρήσεων του τυπωμένου κυκλώματος, τα σχηματικά διαγράμματα και τα αρχεία output (gerber files) που αφορούν το τυπωμένο κύκλωμα καθώς και οι πίνακες βαθμονόμησης των αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκαν. Κλείνοντας στο **Παράρτημα Ε**, παρουσιάζεται ο πηγαίος κώδικας - αλγόριθμος (source code) με τη λογική εκτέλεσης του κώδικα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ : ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΑ

Συχνά στη βιβλιογραφία συναντάμε δύο ορολογίες για τα αισθητήρια: *sensors* (αισθητήρες) και *transducers* (μορφοτροπείς). Ο όρος “*sensor*” είναι γενικότερος και αναφέρεται στην ανίχνευση και μετατροπή ενός μεγέθους σε κάποιο άλλο, ενώ ο όρος “*transducer*” είναι συλλογικός όρος και αναφέρεται στην ανίχνευση και μετατροπή ενός μεγέθους διαφορετικών ενεργειακών μορφών όπως κινητική, θερμική ή μαγνητική ενέργεια σε κάποιο άλλο ηλεκτρικό σήμα (μεταβολή ρεύματος, τάσης, αντίστασης κλπ.) [1]. Αν και ο όρος “*transducer*” περιγράφει ακριβέστερα τη λειτουργία ενός αισθητηρίου, ωστόσο στη πράξη έχει επικρατήσει ο όρος “*sensor*”. Η τάση των κατασκευαστών σήμερα είναι να παρέχουν ολοκληρωμένα μετρητικά στοιχεία, τα οποία περιλαμβάνουν τη διάταξη ανίχνευσης του φυσικού μεγέθους μαζί με τα ηλεκτρονικά κυκλώματα μορφοποίησης του ηλεκτρικού σήματος. Έτσι *sensor* και *transducer* ενοποιούνται.



Εικόνα 1 : Γενικό Μπλοκ Διάγραμμα Αισθητήρα [3]

Στη παραπάνω *Εικόνα* φαίνεται το γενικό διάγραμμα ενός αισθητήρα, το οποίο επηρεαζόμενο από τη μεταβολή του φυσικού μεγέθους, μεταβάλλει την εσωτερική του αντίσταση μετατρέποντας έτσι ένα μακροσκοπικό μέγεθος (σήμα εισόδου) σε κατάλληλα ηλεκτρικό μετρήσιμο σήμα (σήμα εξόδου). Για την ανίχνευση ενός φυσικού μεγέθους, είναι διαθέσιμη ποικιλία αισθητήρων και η επιλογή του καταλληλότερου για κάποια συγκεκριμένη εφαρμογή, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η ακρίβεια, η ταχύτητα λήψης της μέτρησης, το εύρος τιμών λειτουργίας κλπ [2]. Τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων, είναι οι παράγοντες εκείνοι οι οποίοι καθορίζουν τον τρόπο συμπεριφοράς τους κατά τη διάρκεια της μέτρησης.

Τα βασικά μέρη ενός αισθητήρα είναι :

- το αισθητήριο (*sensor*): Συμβάλει στην ανίχνευση μεταβολής του φυσικού μεγέθους,
- ο Μετατροπέας (*transducer*): Μετατρέπει το φυσικό μέγεθος σε ηλεκτρικά μετρήσιμο σήμα,
- το Κύκλωμα Οδήγησης (*Driving Circuit*): Ηλεκτρονικό τμήμα που μετατρέπει το σήμα του μεταλλάκτη σε κάποιο τυποποιημένης μορφής σήματος,
- το Περιβλήμα (*package*): Καθορίζεται από τις απαιτήσεις του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο θα τοποθετηθεί.

1.1 Βασικές Κατηγορίες Αισθητηρίων (Ταξινόμηση Αισθητήρων)

Οι αισθητήρες κατατάσσονται σε κατηγορίες ανάλογα με το φυσικό μέγεθος το οποίο μετρούν (πχ αισθητήρες θερμοκρασίας, θέσης, πίεσης, ταχύτητας, δύναμης), με βάση τη μορφή του σήματος εισόδου (θερμικοί, ακτινοβολίας, μηχανικοί, μαγνητικοί, βιοχημικοί) ή σύμφωνα με το ηλεκτρικό μέγεθος μεταβολής τους (πχ αισθητήρες τάσης ή ρεύματος). Μία άλλη κατηγοριοποίηση των αισθητήρων είναι με βάση το εάν απαιτείται επαφή του αισθητήρα με το υπό μέτρηση μέγεθος ή όχι (επαφής ή μη επαφής αντίστοιχα).

Οι αισθητήρες επίσης χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες : στους αναλογικούς και στους ψηφιακούς. Η μεγάλη τους διαφορά είναι στον τρόπο λειτουργίας καθώς και στον τρόπο που λαμβάνεται η τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Στους αναλογικούς αισθητήρες ανάλογα με την τιμή του μεγέθους λαμβάνεται κάποια τάση η οποία αντιστοιχεί σε κάποια τιμή του φυσικού μεγέθους. Αντιθέτως οι ψηφιακοί αισθητήρες επιστρέφουν το αποτέλεσμα του φυσικού μεγέθους με την μορφή πακέτου πληροφοριών ή μέσω μιας συγχρονισμένης ψηφιακής γραμμής μεταξύ του αισθητήρα και του μικροελεγκτή [2].

Μια ακόμη διάκριση των αισθητήρων είναι με βάση την απαίτηση εξωτερικής πηγής τροφοδοσίας τους ή όχι. Έτσι διακρίνονται σε ενεργούς και παθητικούς αισθητήρες. Ενεργοί χαρακτηρίζονται οι αισθητήρες, όπου απαιτείται τροφοδοσία από εξωτερική πηγή ώστε να μπορούν να λειτουργούν και να αποδώσουν σήμα εξόδου. Αντιθέτως οι παθητικοί αισθητήρες δεν χρειάζονται τροφοδοσία από εξωτερική πηγή.

Τέλος, ένας άλλος τρόπος ταξινόμησης των αισθητηρίων σχετίζεται με τα υλικά, στις φυσικές ιδιότητες των οποίων βασίζεται η λειτουργία του αισθητήρα, με κύριες κατηγορίες τους αισθητήρες με αγωγίμα, ημιαγωγίμα, διηλεκτρικά, μαγνητικά και υπεραγωγίμα υλικά [2].

Στην *Εικόνα2* παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικότερες κατηγορίες αισθητηρίων.



Εικόνα 2 : Βασικές Κατηγορίες Αισθητήρων

1.2 Βασικά Χαρακτηριστικά Αισθητηρίων

Παρόλο που οι ποικίλοι αισθητήρες που υπάρχουν σήμερα στηρίζονται σε διαφορετικές αρχές λειτουργίας, έχουν κοινά βασικά χαρακτηριστικά τα οποία συγκροτούν τις προδιαγραφές τους (specifications). Η επιλογή ενός αισθητηρίου για τη μέτρηση αντίστοιχου φυσικού μεγέθους, γίνεται με γνώμονα τα παρακάτω βασικά χαρακτηριστικά :

- Γραμμικότητα (linearity)

Αναφέρεται στη σχέση η οποία συνδέει το φυσικό μέγεθος μέτρησης με το αντίστοιχο ηλεκτρικό σήμα εξόδου του αισθητήρα. Το κάθε αισθητήριο διαθέτει ένα χαρακτηριστικό ή ιδιότητα, του οποίου η τιμή μεταβάλλεται καθώς μεταβάλλεται η φυσική ποσότητα που μετρά ο αισθητήρας. Είναι επιθυμητό οι μεταβολές της φυσικής ποσότητας να προκαλούν αυστηρά ανάλογες μεταβολές της ιδιότητας του αισθητήρα. Εάν ο αισθητήρας δεν είναι γραμμικός, τότε η αντιστοίχιση των τιμών του μετρούμενου μεγέθους με τις τιμές εξόδου του γίνεται με βάση την καμπύλη «βαθμονόμησης» [1], [2].

- Ευαισθησία (sensitivity)

Η ευαισθησία εκφράζει πόσο υψηλό σήμα εξόδου αποδίδει ο αισθητήρας για κάθε μονάδα του μετρούμενου φυσικού μεγέθους. Αποτελεί σημαντικό παράγοντα επιλογής ενός αισθητηρίου και αξιολογείται για την χρήση του, σε κάθε εφαρμογή. Έτσι, εάν ένας αισθητήρας θερμοκρασίας έχει ευαισθησία $1\text{mV}/^{\circ}\text{C}$, συνεπάγεται ότι παράγει έξοδο ίση με 1mV για κάθε βαθμό της μετρούμενης θερμοκρασίας. Η αυξημένη ευαισθησία είναι κυρίαρχο ζητούμενο για κάθε αισθητήρα [1], [2].

- Ακρίβεια (accuracy)

Η ακρίβεια ισούται με το σφάλμα που εγγενώς περιέχει η τιμή που αποδίδει ο αισθητήρας στην έξοδο, δηλώνοντας την αβεβαιότητα που υπάρχει στην τιμή της εξόδου. Μπορεί να εκφράζεται σε απόλυτες τιμές ή σε ποσοστώση (%). Στην πρώτη περίπτωση η ανακρίβεια είναι σταθερή και ανεξάρτητη της τιμής του μετρούμενου φυσικού μεγέθους, ενώ στην άλλη περίπτωση είναι ανάλογη της παραπάνω τιμής [1], [2].

- Ανοχή (tolerance)

Η ανοχή συνδέεται στενά με την ακρίβεια-πιστότητα και ορίζει το μέγιστο αναμενόμενο σφάλμα μιας τιμής.

- Διακριτική Ικανότητα (resolution)

Η διακριτική ικανότητα εκφράζει τη μικρότερη μεταβολή του φυσικού μεγέθους που μπορεί να ανιχνεύσει ο αισθητήρας και να μεταβάλλει την έξοδό του ανάλογα. Όσο μεγαλύτερη η διακριτικότητα ενός αισθητήρα, τόσο μικρότερο το μετρούμενο βήμα [1], [2].

- Εύρος λειτουργίας Τιμών Εισόδου (full-scale input, FSI)

Το εύρος τιμών εισόδου ορίζει τα όρια του μετρούμενου φυσικού μεγέθους που μπορεί να ανιληφθεί ο αισθητήρας, εντός των οποίων λειτουργεί αξιόπιστα. Η γνώση του εύρους τιμών εισόδου επιτρέπει την επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα που ταιριάζει στις ανάγκες της εφαρμογής. Συνήθως, εκφράζεται με την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή που μπορεί να μετρήσει [1], [2].

- Εύρος λειτουργίας Τιμών Εξόδου (full-scale output, FSO)

Το εύρος τιμών εξόδου ορίζει τις τιμές τάσεως ή ρεύματος που μπορεί να αποδίδει ένας αισθητήρας στην έξοδό του. Οι αισθητήρες διατίθενται με διάφορα εύρη τιμών εξόδου, ώστε να μπορεί ο χρήστης να επιλέγει τη μορφή που ταιριάζει περισσότερο στα κυκλώματα που θα παραλάβουν το σήμα εξόδου (μετατροπείς A/D). Το εύρος τιμών εξόδου καθορίζεται συχνά από το κύκλωμα ρύθμισης σήματος, το οποίο συνδέεται μονίμως με τον αισθητήρα.

- Απόσταση από τη διάταξη μέτρησης

Η τοποθέτηση των αισθητηρίων συχνά γίνεται σε απομακρυσμένα, δυσπρόσιτα και δύσκολα επισκέψιμα σημεία. Η καλωδίωσή τους στις περιπτώσεις αυτές πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη διότι δημιουργεί διαταραχές στο σύστημα μέτρησης και είναι επιρρεπής σε παρεμβολές από άλλα συστήματα [1], [2].

- Μεταβολή Θερμοκρασίας

Η θερμοκρασία αποτελεί τον συνηθέστερο παράγοντα αλλοίωσης των προδιαγραφών των αισθητήρων και συχνά υπάρχει τρόπος αντιστάθμισής της με κατάλληλα ηλεκτρονικά κυκλώματα ρύθμισης σήματος. Για την περιγραφή της επίδρασης αυτής ορίζονται διάφορα μεγέθη, όπως η ολίσθηση του σημείου μηδενός θερμοκρασίας και η ευαισθησία [1], [2].

- Θόρυβος (noise)

Θόρυβος δημιουργείται κατά τη διάρκεια μιας μέτρησης από εξωτερικούς παράγοντες, όπως γειννίαση με πηγές τάσης υψηλής συχνότητας, πηγές εκπομπής ήχου κ.α.

- Καθυστέρηση (lag)

Καθυστέρηση ονομάζεται η αργή απόκριση της αλλαγής της τιμής εξόδου ενός αισθητηρίου ως προς την αλλαγή της εισόδου του. Μετριέται σε χιλιοστά του δευτερολέπτου (msec) και σε ορισμένες εφαρμογές μπορεί να επηρεάζει αποφασιστικά την απόδοση [1], [2].

1.3 Μέθοδοι Οδήγησης Αισθητηρίων

1.3.1 Αισθητήρες Αναλογικής Εξόδου – Τάσης

Η λειτουργία μιας πολύ μεγάλης γκάμας αισθητηρίων βασίζεται στην αλλαγή της ωμικής αντίστασης καθώς μεταβάλλεται το φυσικό μέγεθος. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτής της κατηγορίας αισθητήρων αποτελούν οι αισθητήρες θερμοκρασίας, θέσεως, πίεσεως, αισθητήρια μέτρησης ροπής κάμψης και μέτρησης φωτεινής έντασης. Τα κυκλώματα προσαρμογής για τη μέτρηση του φυσικού μεγέθους μέσω των παραπάνω τύπων αισθητήρων, στοχεύουν στη μετατροπή της μεταβολής της αντίστασής του σε αντίστοιχη μεταβολή ηλεκτρικής τάσης. Σε άλλους τύπους αισθητηρίων όπως οι αισθητήρες εντοπισμού αερίου και απόστασης, η μεταβολή του φυσικού μεγέθους προκαλεί απ' ευθείας διαφορά δυναμικού στην έξοδό τους [1] , [3].

Συχνά, οι αισθητήρες δίνουν στην έξοδό τους ηλεκτρικό σήμα, τάση χαμηλού πλάτους ώστε να μην μπορεί να γίνει αντιληπτό από τις διαθέσιμες μετρητικές βαθμίδες. Πολλές φορές το σήμα αυτό περιέχει και στοιχεία θορύβου προερχόμενο είτε από τον ίδιο τον αισθητήρα, είτε και από το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται. Στη περίπτωση αυτή κρίνεται επιτακτική η χρήση επιπρόσθετων διατάξεων, οι οποίες βελτιώνουν τα χαρακτηριστικά του προς μέτρηση σήματος και το μετατρέπουν κατάλληλα ώστε να παραχθούν ωφέλιμα επίπεδα τάσης.

Οι διατάξεις αυτές ονομάζονται κυκλώματα ρύθμισης σήματος (signal conditioning circuits) ή κυκλώματα ελέγχου (control circuits) [4]. Ως κυκλώματα προσαρμογής θεωρούνται όλα τα ηλεκτρικά κυκλώματα (γέφυρες, ενισχυτές, φίλτρα κλπ) τα οποία είναι απαραίτητα για την προσαρμογή του ηλεκτρικού σήματος του αισθητήρα σε μορφή κατάλληλη για την οδήγηση του κυκλώματος μέτρησης, το οποίο αποτελεί την είσοδο ενός αναλογικού σε ψηφιακού μετατροπέα A/D.

Το ηλεκτρικό σήμα των αισθητηρίων οδήγησης τάσης μεταφέρεται επομένως στον μετατροπέα ADC μέσω των διατάξεων signal condition. Βασικό τους μειονέκτημα, η απαίτηση να είναι τοποθετημένοι κοντά στον ψηφιακό μετατροπέα και αυτό για δύο κυρίως λόγους :

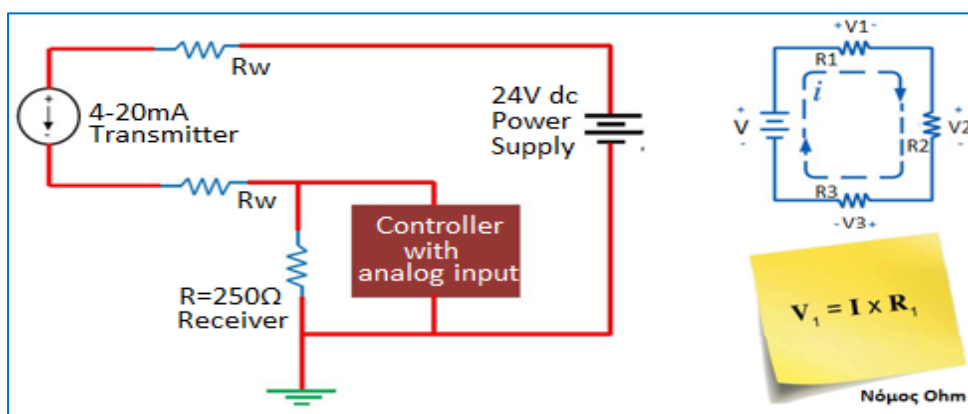
- Στις περισσότερες περιπτώσεις η τάση εξόδου αυτών των αισθητηρίων είναι αρκετά μικρή για να μπορεί να καλύψει τις ωμικές απώλειες των μεγάλου μήκους καλωδίων μεταφοράς του σήματος.
- Το σήμα εξόδου των αισθητηρίων είναι περισσότερο επιρρεπείς σε ανεπιθύμητα και εν γένει απρόβλεπτα ηλεκτρικά σήματα που προέρχονται από εξωτερικές πηγές θορύβου, εξαιτίας τυχόν παρουσίας και αλληλεπίδρασης με γειτονικά κυκλώματα και καλωδιώσεις. Στους αγωγούς μεγάλου μήκους αναπτύσσονται ισχυρές τάσεις από ηλεκτρομαγνητικές (H/M) παρεμβολές και για το λόγο αυτό θα πρέπει να λαμβάνονται μέτρα προστασίας και θωράκισης των χρησιμοποιούμενων καλωδιώσεων, κάτι που αυξάνει κατά πολύ το συνολικό κόστος.

Σε πολλές περιπτώσεις όμως (βιομηχανία, ιατρική, μέσα μεταφοράς, στρατιωτικές εφαρμογές) εκ των πραγμάτων είναι αδύνατη η διασύνδεση των αισθητήριων κοντά στο κύκλωμα ελέγχου. Μια καθιερωμένη τεχνική για τη μετάδοση του σήματος από τα όργανα πεδίου στο μετατροπέα ADC, όταν η απόσταση αυτή απαιτείται να είναι μεγάλη (αρκετές δεκάδες ή και εκατοντάδες μέτρα) είναι οι μεταδότες 4-20mA. Τεχνική όπου σήμερα χρησιμοποιείται κατά κόρον στην αγορά από τις κατασκευάστριες εταιρίες.

1.3.2 Αισθητήρες Αναλογικής Εξόδου – Ρεύματος / Μεταδότες dc Ρεύματος 4-20mA

Οι μεταδότες 4-20mA χρησιμοποιούν ένα βρόχο ρεύματος 4-20mA. Είναι ένα δημοφιλές πρότυπο σηματοδότησης αισθητήρων που έχει επικρατήσει στον τομέα των αυτοματισμών για την παρακολούθηση και έλεγχο εξ' αποστάσεως μιας συσκευής. Τα πλεονεκτήματα της τεχνικής αυτής είναι η δραστική μείωση του θορύβου (interference) που επικάθεται στα καλώδια της γραμμής μεταφοράς, με αποτέλεσμα να μην επηρεάζεται από παρασιτικές τάσης στο σήμα του αισθητήρα και η δυνατότητα σχεδίασης συστημάτων fail-safe: αν ο ελεγκτής δεν λαμβάνει για κάποιο λόγο κανένα σήμα από τον μεταδότη (δηλαδή κάτω και από τα 4mA / I=0mA) τότε οδηγεί το ελεγχόμενο σύστημα σε μια ασφαλή κατάσταση και ενεργοποιεί μια κατάσταση σφάλματος "dead zero" που πρέπει να αντιμετωπιστεί. Αυτό επιτρέπει την λειτουργία κυκλωμάτων σε εξαιρετικά μεγάλες αποστάσεις με σταθερό ρεύμα σε οποιοδήποτε σημείο του βρόχου, ανεξάρτητα από την αντίσταση καλωδίωσης [5].

Το ίδιο ρεύμα ρέει ακόμα και αν οι συνδέσεις στους ακροδέκτες των αγωγών έχουν ατέλειες. Η πτώση τάσης σε κάθε στοιχείο του βρόχου οφείλεται στο ρεύμα που ρέει μέσα απ' αυτό. Το ρεύμα εξόδου του μεταδότη δεν επηρεάζεται από τη πτώση τάσης αρκεί η τάση τροφοδοσίας να είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα των πτώσεων τάσεων κατά μήκος του βρόχου στη μέγιστη τιμή του ρεύματος των 20mA.



Εικόνα 3 : Βασικό σχηματικό διάγραμμα ενός βρόχου ρεύματος 4 – 20 mA [6]

Στην *Εικόνα3* φαίνεται το βασικό σχηματικό διάγραμμα ενός βρόγχου ρεύματος 4-20mA. Ο βρόγχος αυτός αποτελείται από 5 βαθμίδες [6], [7] :

- Τον μεταδότη / πομπό 2 αγωγών (2-wire transmitter)
- Το τροφοδοτικό DC (DC power supply)
- Την αντίσταση υποδοχής (Rreceiver)
- Τον ελεγκτή (Controller)
- Την απαιτούμενη καλωδίωση για την σύνδεση των παραπάνω.

Ο πομπός είναι η καρδιά του συστήματος ενός βρόγχου 4-20mA. Μετατρέπει ένα φυσικό μέγεθος, όπως τη θερμοκρασία, την απόσταση, την ροή ή την πίεση, σε ένα ηλεκτρικό σήμα. Αυτό το ηλεκτρικό σήμα αντιστοιχεί σε ένα ρεύμα ανάλογο της μετρούμενης φυσικής μεταβλητής. Σε ένα βρόχο 4-20mA, τα 4mA αντιπροσωπεύουν τη χαμηλότερη μετρούμενη τιμή, ενώ τα 20mA αντιπροσωπεύουν το υψηλότερη τιμή.

Το τροφοδοτικό DC παρέχει την απαιτούμενη τάση τροφοδοσίας (19V έως 30V) με συνηθέστερη εκείνη των 24Volt, ενώ ο μεταδότης λειτουργώντας σαν πηγή ρεύματος ρυθμίζει την ένταση του ρεύματος στο βρόχο.

Θεωρείται ότι η αντίσταση των καλωδίων διασύνδεσης είναι αρκετά μικρή, ίση με R_w και εκφράζεται σε Ohms ανά μονάδα μήκους. Όταν το ρεύμα ρέει μέσω ενός καλωδίου, παράγει μια πτώση τάσης ανάλογη προς το μήκος και το πάχος του. Ωστόσο, επειδή το ρεύμα που ρέει σε ένα τυπικό βρόχο 4-20mA είναι μικρό, οι τάσεις είναι συνήθως και αυτές μικρές. Ο ηλεκτρικός θόρυβος μειώνεται, σχεδόν εξαλείφεται καθώς τα δύο σύρματα είναι συνεστραμμένα σε όλο το μήκος τους. Το ρεύμα που επιτρέπει ο μεταδότης να περάσει ονομάζεται ρεύμα βρόχου και είναι ανάλογο προς την τιμή της μετρούμενης φυσικής παραμέτρου του αισθητηρίου.

Πολλά κυκλώματα ρεύματος βρόχου χρησιμοποιούν μια αντίσταση δέκτη (Rreceiver) για την μετατροπή του ρεύματος σε τάση. Το ρεύμα που ρέει μέσω της αντίστασης Rreceiver παράγει μια τάση που αναγνωρίζεται και οδηγείται μέσω των κυκλωμάτων ρύθμισης σήματος (signal conditioning) στον μετατροπέα A/D. Το ηλεκτρικό αυτό σήμα είναι εκείνο όπου το μικροϋπολογιστικό σύστημα θα μεταφράσει στις αντίστοιχες μονάδες φυσικού μεγέθους (π.χ °C, bar, m) και θα τις απεικονίσει στην οθόνη του.

Αυτές είναι οι μονάδες που απαιτούνται για την ολοκλήρωση ενός βρόγχου ρεύματος 4-20mA. Συνοπτικά ο αισθητήρας (sensor) ανιχνεύει μία μεταβολή φυσικού μεγέθους, ο πομπός (transmitter) μεταφράζει αυτή τη μεταβολή σε μεταβολή ρεύματος, το σήμα οδηγείται μέσω ενός βρόχου (loop) καλωδίου σε ένα δέκτη (receiver), ο οποίος οδεύει το ηλεκτρικό σήμα τάσης πλέον στον A/D μέσω του κυκλώματος προσαρμογής.

Παρακάτω ακολουθεί ένα παράδειγμα βρόγχου ρεύματος 4-20mA δύο καλωδίων:

Έστω ένας αισθητήρας μέτρησης ροής καυσίμου μιας δεξαμενής με εύρος τιμών από 0 έως 100m³/h και με ενσωματωμένο driver (flow transmitter) σε συνδεσμολογία βρόγχου 4-20mA. Το ρεύμα του βρόγχου θα μεταβάλλεται με βάση τη ροή του καυσίμου που διαπερνά μέσα από τον αισθητήρα, παίρνοντας τιμές από 4mA έως 20mA. Δηλαδή το κύκλωμα οδήγησης ρυθμίζει το ρεύμα του βρόγχου σύμφωνα με το στοιχείο ανίχνευσης. Στη συνέχεια η μεταβολή του ρεύματος 4-20mA μεταφράζεται σε μεταβολή τάσης από 1 έως 5Volt DC μέσω της αντίστασης ακριβείας 250 Ohms [7], [8].

Περίπτωση 1^η:

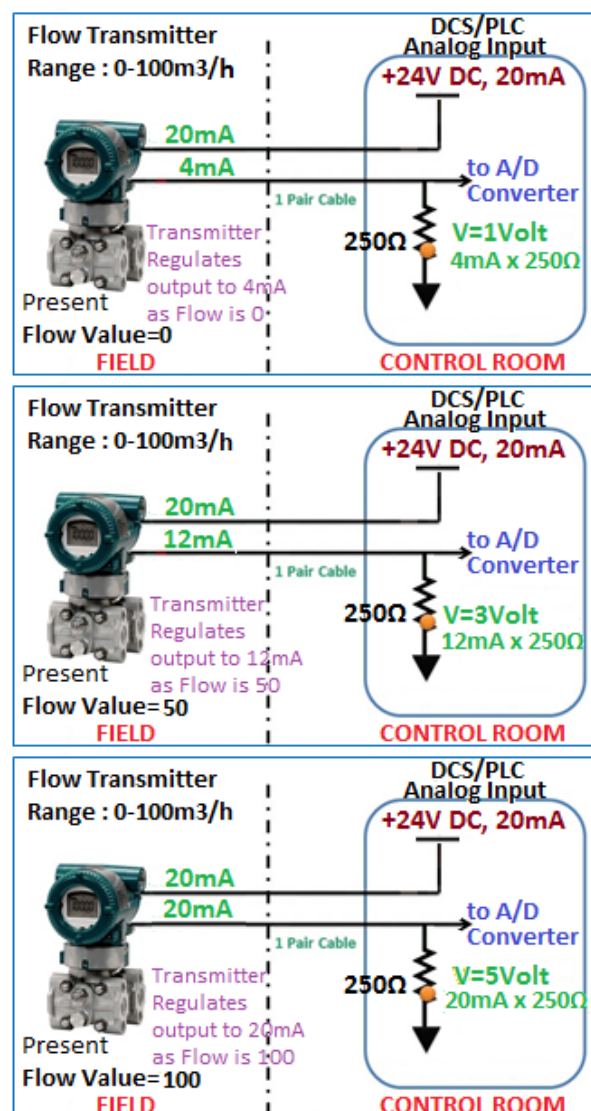
Ο αισθητήρας μέτρησης ροής δείχνει 0 m³/h καθώς δεν αντιλαμβάνεται καμία ροή καυσίμου. Στη περίπτωση αυτή το κύκλωμα οδήγησης του αισθητήρα ρυθμίζει το ρεύμα του βρόγχου στα 4mA και η ισοδύναμη τάση του είναι στα 1Volt DC, η οποία μπαίνει στην είσοδο του μετατροπέα A / D και υποδηλώνει 0% της συνολικής διεργασίας.

Περίπτωση 2^η:

Ο αισθητήρας μέτρησης ροής δείχνει 50 m³/h. Στη περίπτωση αυτή το κύκλωμα οδήγησης του αισθητήρα ρυθμίζει το ρεύμα του βρόγχου στα 12mA και η ισοδύναμη τάση του είναι στα 3Volt DC, η οποία μπαίνει στην είσοδο του μετατροπέα A / D και υποδηλώνει 50% της συνολικής διεργασίας.

Περίπτωση 3^η:

Ο αισθητήρας μέτρησης ροής δείχνει 100 m³/h. Στη περίπτωση αυτή το κύκλωμα οδήγησης του αισθητήρα ρυθμίζει το ρεύμα του βρόγχου στα 20mA και η ισοδύναμη τάση του είναι στα 5Volt DC, η οποία μπαίνει στην είσοδο του μετατροπέα A / D και υποδηλώνει 100% της συνολικής διεργασίας.



Εικόνα 4 : Flow Transmitter current 4-20mA [7]

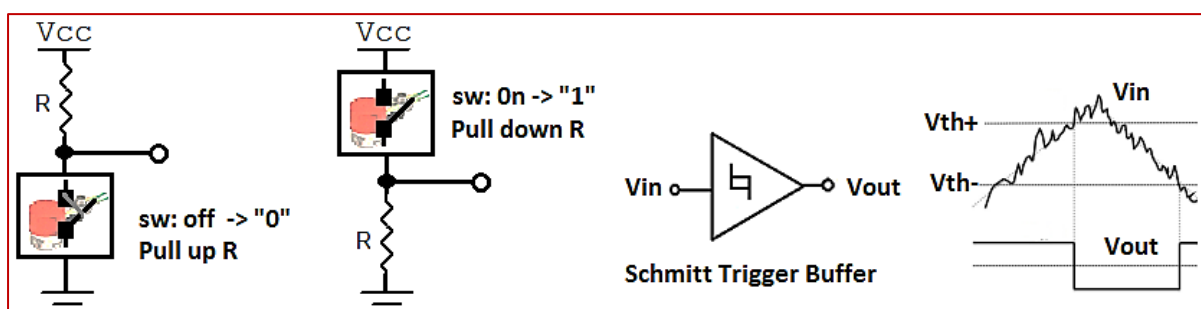
Η χρήση λοιπόν ενός βρόγχου ρεύματος 4-20mA για την οδήγηση αισθητηρίων έχει τα πλεονεκτήματα της μειωμένης ευαισθησίας στον ηλεκτρικό θόρυβο και στα φαινόμενα φόρτωσης λόγω της χρήσης συνεστραμμένου ζεύγους αγωγών. Επιπλέον, μια αύξηση

της αντίστασης των αγωγών λόγω αύξησης του μήκους τους, θα προκαλέσει μεγαλύτερη πτώση τάσης αλλά δεν θα επηρεάσει την τρέχουσα στάθμη του σήματος, εφόσον υπάρχει επαρκής τάση οδήγησης του όλου κυκλώματος. Δεδομένου ότι τα 4mA αντιστοιχούν σε σήμα 0% εξόδου, είναι αρκετά εύκολο να γίνει ανίχνευση τυχόν σφάλματος στο σύστημα.

Στον αντίποδα, ο κάθε βρόγχος ρεύματος 4-20mA μπορεί να μεταδίδει μόνο ένα συγκεκριμένο ηλεκτρικό σήμα. Πολλαπλοί βρόχοι πρέπει να δημιουργούνται σε περιπτώσεις όπου απαιτείται μετάδοση πλέον του ενός ηλεκτρικού σήματος. Η υλοποίηση των βρόγχων αυτών με κοινή τάση οδήγησης, μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα με τους βρόχους γείωσης, εφόσον δεν προβλεφθεί οι ανεξάρτητοι βρόχοι να είναι σωστά απομονωμένοι (isolation). Αυτές οι απαιτήσεις απομόνωσης γίνονται εκθετικά πιο πολύπλοκες καθώς αυξάνεται ο αριθμός των βρόχων. Τέλος η χρήση βρόγχου ρεύματος 4-20mA προκαλεί υψηλή κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με άλλους τύπους αναλογικών σημάτων, λόγω της σχετικά μεγάλης τάσης 24V οδήγησης που απαιτείται.

1.3.3 Αισθητήρες Ψηφιακής Εξόδου

Σε πολλά αισθητήρια όπως για παράδειγμα της πλήρωσης στάθμης υγρού, της μέτρησης στροφών, σε αισθητήρια μέτρησης υγρασίας και ακτινοβολίας, η μεταβολή του φυσικού μεγέθους προκαλεί στην έξοδο εναλλαγή δύο καταστάσεων: “υπάρχει” (on) ή “δεν υπάρχει” (off) το ανιχνεύσιμο μέγεθος. Οι αισθητήρες αυτοί είναι εκείνοι που σε κατάσταση μη ανίχνευσης του φυσικού μεγέθους έχουν μέγιστη αντίσταση (άπειρη) που μεταφράζεται με ανοιχτή επαφή στα άκρα τους. Η ανίχνευση μεταβολής του φυσικού μεγέθους προκαλεί αλλαγή της ωμικής τους αντίστασης σε ελάχιστη (μηδενική) που ισοδυναμεί με κλειστή επαφή στα άκρα τους. Με αυτό τον τρόπο οι αισθητήρες αυτοί μπορούν να συν αρμολογηθούν έτσι ώστε στην κατάσταση μη ανίχνευσης να παρέχουν τάση «λογικού 1» και σε κατάσταση ανίχνευσης, τάση «λογικού 0» ή το αντίστροφο.



Εικόνα 5 : Βασική Οδήγηση Αισθητήρων λογικής “0” και “1”

Στην *Εικόνα5* απεικονίζεται ο τρόπος οδήγησης των αισθητηρίων ψηφιακής εξόδου. Οι αισθητήρες αυτοί οδηγούνται με μία αντίσταση R (Pull-up ή Pull-down) που καθορίζει το λογικό επίπεδο “0” ή “1” και με την προσθήκη ενός σκανδαλιστή Schmitt

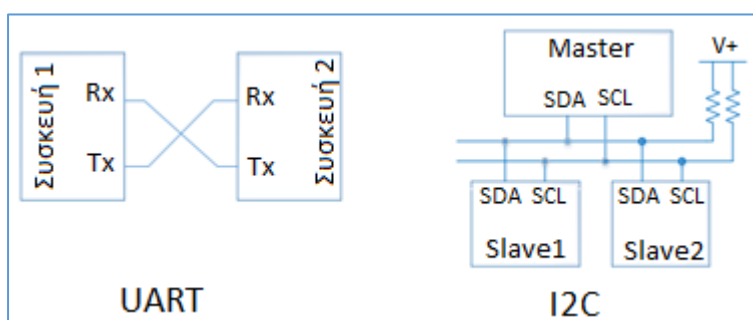
Trigger Buffer ο οποίος εξασφαλίζει μέγιστο ρυθμό μεταβολής από λογικό “0” σε λογικό “1”, χωρίς να παράγει τον θόρυβο της μεταγωγής της στάθμης εισόδου (high slew rate). Ο Schmitt Trigger είναι απαραίτητος εάν δεν υπάρχει αντίστοιχος στην είσοδο της επόμενης βαθμίδα. Χαρακτηριστικό των κυκλωμάτων σκανδαλισμού με καθυστέρηση αποτελούν τα σημεία αλλαγής της κατάστασης στην έξοδο του σκανδαλιστή (παράθυρο λειτουργίας triggering). Όταν η τιμή του σήματος εισόδου ξεπεράσει την άνω τιμή παραθύρου του σκανδαλιστή, τότε η έξοδος οδεύει σε λογικό υψηλό. Παραμένει δε στην κατάσταση αυτή μέχρι η τιμή του σήματος εισόδου ξεπεράσει την κάτω τιμή του παραθύρου του σκανδαλιστή.

Εκτός από τους ψηφιακούς αισθητήρες “επαφής” υπάρχουν και οι αισθητήρες πολυσήμαντης ψηφιακής εξόδου. Στη κατηγορία αυτή εντάσσονται οι αισθητήρες που παρέχουν έξοδο ολόκληρης ψηφιακής λέξης N-bits. Ο αριθμός των bits καθορίζεται από τον μετατροπέα A/D που ενσωματώνεται στον αισθητήρα. Οι αισθητήρες αυτοί συνδέονται απ’ ευθείας στη ψηφιακή διάταξη.

Η επικοινωνία των αισθητηρίων ψηφιακής εξόδου γίνεται μέσω πρωτοκόλλων Σειριακής Επικοινωνίας. Τα πιο συνηθισμένα πρωτόκολλα και τεχνολογίες σειριακής επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται είναι [11] :

- *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter* (UART). Πρόκειται για μια τεχνολογία πομποδέκτη ο οποίος μπορεί να υλοποιήσει ένα πλήθος πρωτοκόλλων σειριακής επικοινωνίας όπως τα RS-232, RS-422 και RS-485. Η επικοινωνία πομπού και δέκτη γίνεται ασύγχρονα, χωρίς την ύπαρξη κοινού ρολοί και στηρίζεται στον συγχρονισμό των διαφορετικών ρολογιών του πομπού και του δέκτη σε τακτά χρονικά διαστήματα.
- *Inter-Integrated Circuits* (I2C). Πρωτόκολλο επικοινωνίας διασύνδεσης συσκευών χαμηλών ταχυτήτων. Πρόκειται για μια σύγχρονη σειριακή επικοινωνία, στην οποία οι συσκευές συνδέονται σε συνδεσμολογία Master-Slave. Οι παράμετροι της επικοινωνίας ορίζονται από την master συσκευή και ο συγχρονισμός των δύο συσκευών γίνεται με το ρολοί της master συσκευής. Η I2C επικοινωνία μπορεί να είναι είτε μονόδρομη είτε αμφίδρομη.

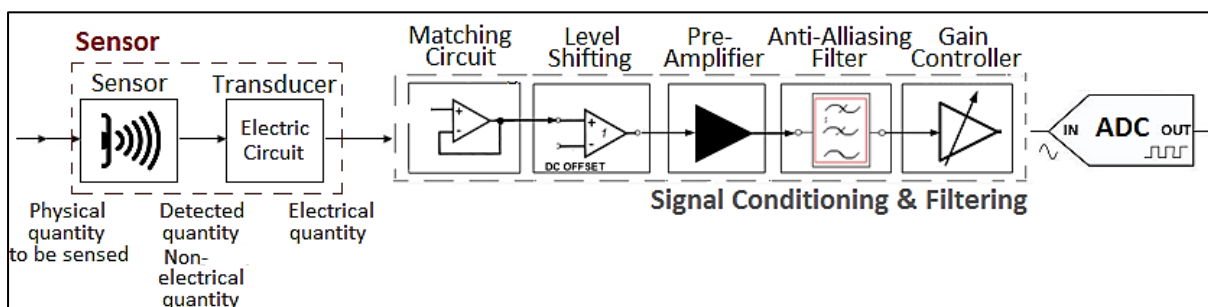
Οι τρόποι διασύνδεσης δύο συσκευών που επικοινωνούν με “UART” και “I2C” φαίνονται στην *Εικόνα6* που ακολουθεί.



Εικόνα 6 : Πρωτόκολλα Σειριακής Επικοινωνίας

1.4 Κυκλώματα Ρύθμισης Σήματος Αισθητήρων (Signal Conditioning)

Συχνά οι αισθητήρες δίνουν στην έξοδό τους ηλεκτρικό σήμα, χαμηλού πλάτους ώστε να μην μπορεί να γίνει αντιληπτό από τις διαθέσιμες μετρητικές βαθμίδες. Το σήμα αυτό μπορεί να περιέχει και στοιχεία θορύβου προερχόμενο είτε από τον ίδιο τον αισθητήρα όσο και από το περιβάλλον. Στη περίπτωση αυτή κρίνεται επιτακτική η χρήση επιπρόσθετων διατάξεων, οι οποίες βελτιώνουν τα χαρακτηριστικά του προς μέτρηση σήματος και το μετατρέπουν κατάλληλα ώστε να παραχθούν ωφέλιμα επίπεδα τάσης. Στην *Εικόνα7* φαίνεται το διάγραμμα μιας διάταξης μέτρησης ενός φυσικού μεγέθους με χρήση αισθητήρα, ο οποίος αποτελεί το στοιχείο εκείνο το οποίο μετατρέπει τη μεταβολή του φυσικού μεγέθους σε μεταβολή ενός ηλεκτρικού σήματος. Το κύκλωμα προσαρμογής (signal conditioning) αναλαμβάνει τη τροποποίηση του ηλεκτρικού αυτού σήματος, ώστε να αποκτήσει τη κατάλληλη μορφή για την οδήγηση της τελικής μετρητικής διάταξης στον μετατροπέα Σήματος Αναλογικού/Ψηφιακού ADC.



Εικόνα 7: Μπλοκ Διάγραμμα Βαθμίδων οδήγησης Αισθητήρων Τάσης

Οι βαθμίδες που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση των κυκλωμάτων ρύθμισης σήματος (signal conditioning), για κάθε κανάλι εισόδου, είναι οι εξής [12] :

- Διάταξη Προσαρμογής (matching circuit) :

Το κύκλωμα Προσαρμογής, αποτελεί βασική βαθμίδα εισόδου σε μία ΗΝ σχεδίαση καθώς επιτυγχάνεται μεγιστοποίηση μεταφοράς ισχύος από τη μία βαθμίδα στην άλλη (κανονικοποίηση του αναλογικού σήματος). Η πιο απλή περίπτωση είναι η χρήση ενός συντονισμένου κυκλώματος (σύνθετης αντίστασης). Σε περιπτώσεις μετάδοσης dc σήματος ή χαμηλής συχνότητας, η εμπέδηση μπορεί να θεωρηθεί καθαρά ωμική. Κλασική διάταξη προσαρμογής είναι η χρήση τελεστικού ενισχυτή μοναδιαίας απολαβής σε συνδεσμολογία απομονωτή (buffer), λόγω της πολύ μεγάλης αντίστασης εισόδου.

- Διάταξη Μετατόπισης τάσης απόκλισης dc offset (Level Shifting) :

Ο ρόλος της διάταξης αυτής είναι η αφαίρεση τυχόν μετρούμενης τάσης που αντιστοιχεί στη μέγιστο ή ελάχιστο μετρούμενο φυσικό μέγεθος του αισθητηρίου. Με το τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μεγιστοποίηση του ωφέλιμου σήματος του αισθητήρα, αφαιρώντας τη μη αξιοποιήσιμη συνεχή τάση dc, με δυνατότητα αύξησης της ενίσχυσης του σήματος στο μέγιστο δυνατόν, περιορισμός ο οποίος προέρχεται από τη βαθμίδα του Μετατροπέα

ADC. Για την υλοποίηση της διάταξης αυτής γίνεται χρήση ενός Τελεστικού Ενισχυτή σε συνδεσμολογία Διαφορικού Ενισχυτή με ελεγχόμενο offset μοναδιαίου κέρδους τάσης.

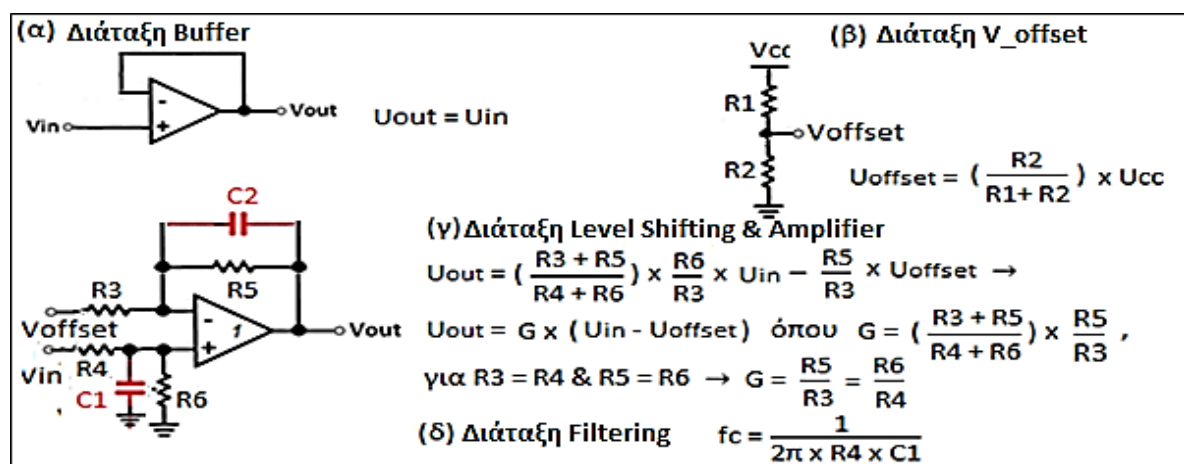
- Διάταξη Ενισχυτή (Pre-Amplifier) :

Το σήμα για να μπορεί να ληφθεί από τις μετρητικές διατάξεις θα πρέπει πρώτα να ενισχυθεί σε μετρήσιμα επίπεδα. Ο Προενισχυτής χρησιμοποιείται για την μέγιστη δυνατή ενίσχυση και προσαρμογή του σήματος, πριν αυτό οδηγηθεί στην είσοδο του Μετατροπέα Σήματος Αναλογικού σε Ψηφιακού. Περιορισμός ρύθμισης του κέρδους τάσης (Gain) ώστε η τάση εξόδου του ενισχυτή να μη ξεπερνά τη μέγιστη επιτρεπόμενη τάση που δέχεται στην είσοδό του ο ADC. Επιπλέον η ενισχυτική βαθμίδα συμβάλλει στην αντιμετώπιση προβλημάτων ηλεκτρικού θορύβου και απομόνωσης, καθώς χαρακτηρίζεται από σχεδόν μηδενική ολίσθηση του προγραμματιζόμενου συντελεστή απολαβής κατά την λειτουργία του και από μεγάλο λόγο σήματος προς θόρυβο (S/N). Αντιθέτως, όταν ένα σήμα έχει πλάτος μεγαλύτερο από το επιτρεπόμενο που δέχεται ο ADC δεν μπορεί να συνδεθεί απ' ευθείας στις μετρητικές διατάξεις. Στη περίπτωση αυτή, για τη μείωση του πλάτους του σήματος σε επιτρεπτά επίπεδα χρησιμοποιούνται βαθμίδες κυκλωμάτων εξασθένησης οριοθετώντας με αυτό τον τρόπο το πλάτος του σήματος σε επιτρεπτά επίπεδα.

- Διάταξη Βαθυπερατού Φίλτρου (Anti-Aliasing Filter) :

Το σήμα εξόδου του Αισθητήρα πολλές φορές δεν είναι καθαρό dc αλλά λαμβάνεται αλλοιωμένο. Αυτές οι αλλοιώσεις μπορεί να προέρχονται από θερμικό θόρυβο, από την κακή ποιότητα του αισθητήρα, αλλά και από ανεπιθύμητα σήματα που υπάρχουν στο περιβάλλον. Για την εξάλειψη όλων αυτών των θορύβων και παρεμβολών, γίνεται συνήθως χρήση ενός ενεργού βαθυπερατού φίλτρου. Ο απλούστερος τρόπος υλοποίησης βαθυπερατού φίλτρου Α' τάξης είναι η προσθήκη ενός πυκνωτή C παράλληλα συνδεδεμένο με την αντίσταση R του βρόγχου ανάδρασης και στο κύκλωμα εισόδου (+) ενός τελεστικού ενισχυτή σε συνδεσμολογία διαφορικού ενισχυτή.

Στην *Εικόνα 8* που ακολουθεί, απεικονίζονται κλασικές τυπικές βαθμίδες κυκλωμάτων οδήγησης αναλογικών αισθητηρίων μαζί με τις βασικές εξισώσεις.



Εικόνα 8 : Βασικά Κυκλώματα Οδήγησης Αναλογικών Αισθητήρων

1.5 Βαθμονόμηση Αισθητηρίων

Βαθμονόμηση είναι η αντιστοίχιση του κάθε ηλεκτρικού σήματος εξόδου ενός αισθητήρα στις φυσικές μετρητικές μονάδες του υπό μέτρηση μεγέθους. Μέσο της διαδικασίας της βαθμονόμησης εξασφαλίζεται η ορθή απεικόνιση της τιμής του μετρούμενου φυσικού μεγέθους.

Η γνώση της συνάρτησης μεταφοράς ή αλλιώς χαρακτηριστικής εξίσωσης (transfer function) του αισθητήρα, είναι απαραίτητη κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης, καθώς μετρώντας την τιμή του ηλεκτρικού σήματος εξόδου που παράγει ο αισθητήρας, υπολογίζεται μέσω της συνάρτησης μεταφοράς και η αντίστοιχη τιμή του μετρούμενου φυσικού μεγέθους για όλη την περιοχή μετρήσεων του [1].

Η μαθηματική μορφή της συνάρτησης μεταφοράς πρέπει να είναι γνωστή πριν το στάδιο βαθμονόμησης ενός αισθητήρα. Η συνάρτηση μεταφοράς ενός αισθητηρίου μπορεί να έχει μία από τις παρακάτω μορφές:

- Γραμμική μορφή: $Y = a + b \times x$
- Λογαριθμική μορφή: $Y = a + b \times \ln x$
- Εκθετική μορφή : $Y = a \times e^{b \times x}$
- Μορφή δύναμης : $Y = a + b \times x^c$

όπου “ x ” η τιμή του μετρούμενου φυσικού μεγέθους, “ Y ” το ηλεκτρικό σήμα εξόδου τάσης ή ρεύματος και “ a ”, “ b ” και “ c ” σταθερές.

Στα περισσότερα τεχνικά εγχειρίδια (datasheet) των αισθητηρίων δίδεται η συνάρτηση μεταφοράς, ειδάλως περιλαμβάνεται πίνακας αντιστοίχισης τιμών φυσικού μεγέθους με το προς μεταβολή ηλεκτρικό μέγεθος. Το πλήθος των μετρήσεων (δειγμάτων) επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια των μετρήσεων που λαμβάνονται κατά τη χρήση του αισθητήρα σε ένα σύστημα μέτρησης. Το σφάλμα βαθμονόμησης ορίζεται ως την απόκλιση της μέτρησης του φυσικού μεγέθους που προέρχεται από έναν μη βαθμονομημένο αισθητήριο σε σχέση με έναν βαθμονομημένο.

Σε περίπτωση που η συνάρτηση μεταφοράς του αισθητηρίου δεν είναι γνωστή, για την πραγματοποίηση της βαθμονόμησης και εφόσον είναι δυνατόν, εφαρμόζονται διάφορες τιμές του μετρούμενου φυσικού μεγέθους στον αισθητήρα και μετρώνται οι αντίστοιχες τιμές του ηλεκτρικού σήματος εξόδου του (πειραματικές μετρήσεις αισθητηρίου).

Κάθε μέτρηση καταλήγει σε ένα σύστημα συλλογής δεδομένων. Το σύστημα αυτό εκτελεί τη διαδικασία μετατροπής πληροφορίας σε μορφή που μπορεί να δεχθεί και να επεξεργαστεί ο μικρο-υπολογιστής. Έτσι το ηλεκτρικό σήμα εξόδου του αισθητηρίου, διέρχεται μέσω της αναλογικής διάταξης ρύθμισης σήματος (signal conditioning circuit) στον μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακού σήματος (A/D), για να μεταφραστεί τελικά σε κατάλληλη ψηφιολέξη και να οδηγηθεί στη ψηφιακή διάταξη (digital sub system). Εκεί δημιουργείται κατάλληλος πίνακας (lookup table) αντιστοίχισης της ψηφιακής εξόδου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη, η σχεδίαση και υλοποίηση ενός τυπωμένου κυκλώματος επέκτασης (pcb shield) για την μεταφορά δεδομένων από ένα πλήθος αισθητηρίων ποικίλων εφαρμογών, στον υπολογιστή τσέπης Raspberry Pi 3B για μετέπειτα καταγραφή και μετάδοση των δεδομένων τους. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η περιγραφή και η ανάλυση του συστήματος. Παρουσιάζεται ο κύριος κορμός του, ενώ αναλύεται η λειτουργία του βασικού υλικού καθώς και η αιτιολόγηση της επιλογής του.

2.1 Βασικά Χαρακτηριστικά του Συστήματος

Πρωταρχικό στάδιο μιας μελέτης και σχεδίασης ενός συστήματος, είναι ο καθορισμός βασικών προδιαγραφών που θα πρέπει να εξασφαλίζει το σύστημα αυτό αρχικά όσον αφορά :

- την κατασκευαστική δομή του συστήματος και του τρόπου λειτουργίας του,
- την επιλογή των τεχνικών χαρακτηριστικών των χρησιμοποιούμενων εξαρτημάτων και υλικών που απαρτίζουν το τυπωμένο κύκλωμα (αναλογική διάταξη),
- τις απαιτήσεις του συστήματος σε τροφοδοσία και κατανάλωση,
- την επιλογή του κατάλληλου υπολογιστικού συστήματος (ψηφιακή διάταξη) και τον τρόπο διασύνδεσής του με την αναλογική διάταξη,
- τον προγραμματισμό της ψηφιακής διάταξης για την συλλογή, επεξεργασία, καταγραφή και μετάδοση των μετρήσεων των αισθητηρίων και τέλος
- τις διαστάσεις του τελικού προϊόντος και το συνολικό κόστος υλοποίησής του.

Σημαντικός παράγοντας για την κατασκευαστική δομή του συστήματος είναι η δυνατότητα χρήσης του κυκλώματος αυτού σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών. Λαμβάνοντας υπόψη το μεγάλο και ποικίλο πλήθος των αισθητηρίων που κυκλοφορούν στην αγορά, ορίστηκε το σύστημα να μπορεί να συλλέγει δεδομένα από έντεκα (11) συνολικά αισθητήρες, οκτώ (8) αναλογικής εξόδου και τριών (3) ψηφιακής εξόδου. Επίσης δεδομένου ότι η λειτουργία μιας πολύ μεγάλης γκάμας αισθητηρίων βασίζεται στη παραγωγή ηλεκτρικού σήματος τάσης στην έξοδό τους με τη μεταβολή του φυσικού μεγέθους, αλλά και της τεχνικής που έχει πλέον καθιερωθεί σε πολλούς τομείς με τη χρήση μεταδοτών (driver) 4-20mA για την δυνατότητα απομακρυσμένης διασύνδεσης αισθητήρων χωρίς απώλειες μετάδοσης και προσθήκης θορύβου, αποφασίστηκε από τις οκτώ (8) αναλογικές θέσεις εισόδου, οι τέσσερις (4) να αφορούν

αισθητήρες οδήγησης τάσης και οι υπόλοιπες τέσσερις (4), θέσεις οδήγησης αισθητηρίων ρεύματος.

Μετά την επιλογή και τον καθορισμό του πλήθους των εισόδων που μπορεί να υποστηρίξει το σύστημα και γνωρίζοντας τις βασικές βαθμίδες των κυκλωμάτων ρύθμισης σήματος (signal conditioning) που απαρτίζουν την αναλογική διάταξη και οι οποίες αναλύθηκαν στην Ενότητα 1.4, το επόμενο βήμα είναι η επιλογή κατάλληλου υπολογιστικού συστήματος που θα αποτελεί την ψηφιακή διάταξη. Η υλοποίηση της Ψηφιακής Διάταξης γίνεται μέσω του υπολογιστή Raspberry Pi 3B. Ο κύριος λόγος προτίμησης του συγκεκριμένου μικροϋπολογιστή έναντι των άλλων, είναι ότι πρόκειται για έναν πλήρη υπολογιστή “τσέπης” εύκολα προγραμματιζόμενο, οικονομικό σε σχέση με την επεξεργαστική ισχύ που προσφέρει, διαθέτοντας σύνδεση ηλεκτρονικού υλικού. Επιπλέον οι πολύ μικρές του διαστάσεις 85.60x53.98x17.00 [mm] και το βάρος του μόλις στα 45gr, το καθιστούν ιδανικό στοιχείο συστημάτων αυτοματισμού, παρέχοντας παράλληλα τη δυνατότητα ενσύρματης και ασύρματης δικτύωσης και μετάδοσης δεδομένων, ακόμη και τηλεπίβλεψης μέσω ενός κινητού τηλεφώνου (smart-phone).

Αμέσως μετά σειρά έχει ο τρόπος διασύνδεσης της αναλογικής με την ψηφιακή βαθμίδα και η επιλογή κατάλληλου αναλογικού σε ψηφιακού μετατροπέα A/D. Γίνεται χρήση ενός 8-κάναλου διαφορικού μετατροπέα βασιζόμενο σε δύο μετατροπείς A/D MCP3424 της Microchip Technologies, που το καθένα αποτελείται από 4 αναλογικές διαφορικές εισόδους χαμηλού θορύβου, απόλυτα συμβατό και συνεργάσιμο με το Raspberry Pi. Πρόκειται για μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακού, τεχνικής “δέλτα-σίγμα”, όπου το σήμα εισόδου υπόκειται σε υπέρ-δειγματοληψία αυξάνοντας το εύρος ζώνης και μειώνοντας την τιμή του μέσου παραγόμενου θορύβου. Η αρχιτεκτονική αυτή είναι κατάλληλη για την παρούσα εφαρμογή καθώς απαιτείται μεγάλο resolution σε μικρό εύρος συχνοτήτων, ενώ η καθυστέρηση μετάδοσης εξαιτίας της υπερ-δειγματοληψίας είναι αδιάφορη στη προκειμένη περίπτωση [31]. Ο μετατροπέας ADC είναι προγραμματιζόμενος με ρυθμιζόμενο το κέρδος (gain) και το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων (bit rate), ενώ η επικοινωνία του με την ψηφιακή διάταξη (Raspberry Pi) εξασφαλίζεται μέσω του σειριακού πρωτόκολλου διασύνδεσης I²C.

Τέλος βασικό κριτήριο για την δυνατότητα χρήσης του συστήματος αυτού σε μεγάλο εύρος εφαρμογών είναι το τελικό του μέγεθος, οι απαιτήσεις του σε τροφοδοσία αλλά και το συνολικό κόστος υλοποίησής του. Οι διαστάσεις του τυπωμένου κυκλώματος επιλέγονται να είναι το δυνατόν μικρότερες, περιορισμένες στις διαστάσεις του μικροϋπολογιστή Raspberry ώστε να εξασφαλίζεται η φορητότητά του. Όσον αφορά τη τροφοδοσία του συστήματος, το όλο σύστημα τροφοδοτείται από εξωτερική τροφοδοτική διάταξη συνεχής τάσης +5V/2A ενώ διαθέτει και dc-to-dc converter +24V/100mA για την παροχή κατάλληλης τάσης, απαραίτητη σε κυκλώματα οδήγησης αισθητήρων ρεύματος 4-20mA. Η επιλογή των +5V dc γίνεται λαμβάνοντας υπόψη ότι πρόκειται για μία πολύ κοινή τάση τροφοδοσίας, εύκολα υλοποιήσιμη. Το Raspberry Pi τροφοδοτείται μέσω ξεχωριστής παροχής 230V/5V στα 2.5A.

Στον Πίνακα1 που ακολουθεί παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος.

Βασικά Χαρακτηριστικά του Συστήματος	
Πλήθος Εισόδων	Έντεκα (11)
Τύπος Εισόδων	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 8 αισθητηρίων αναλογικής εξόδου <ul style="list-style-type: none"> • 4 οδήγησης τάσης • 4 οδήγησης ρεύματος 4-20mA ➤ 3 αισθητηρίων ψηφιακής εξόδου
Αναλογική Διάταξη	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Χρήση κατάλληλων Opamp's ➤ Βαθμίδες Οδήγησης “signal conditioning” <ul style="list-style-type: none"> ✓ matching circuit ✓ Level Shifting ✓ Pre-Amplifier ✓ Anti-Aliasing Filter
Μετατροπέας ADC	2 x MCP3424 της Microchip Technologies
Υπολογιστικό Σύστημα – Ψηφιακή Διάταξη	Raspberry Pi3
Μέγεθος – Διαστάσεις	110.00x144.00x20.00 [mm]
Τάση Τροφοδοσίας	+5 V dc

Πίνακας 1 : Βασικά Χαρακτηριστικά του Συστήματος

Βασική προϋπόθεση για την ομαλή λειτουργία του συστήματος, είναι για τον κάθε διασυνδεδεμένο αισθητήρα να έχει εξασφαλιστεί η εξωτερική παροχή τροφοδοσίας του, να είναι γνωστός ο πίνακας βαθμονόμησης του και να διαθέτει μία από τις παρακάτω μορφές εξόδου :

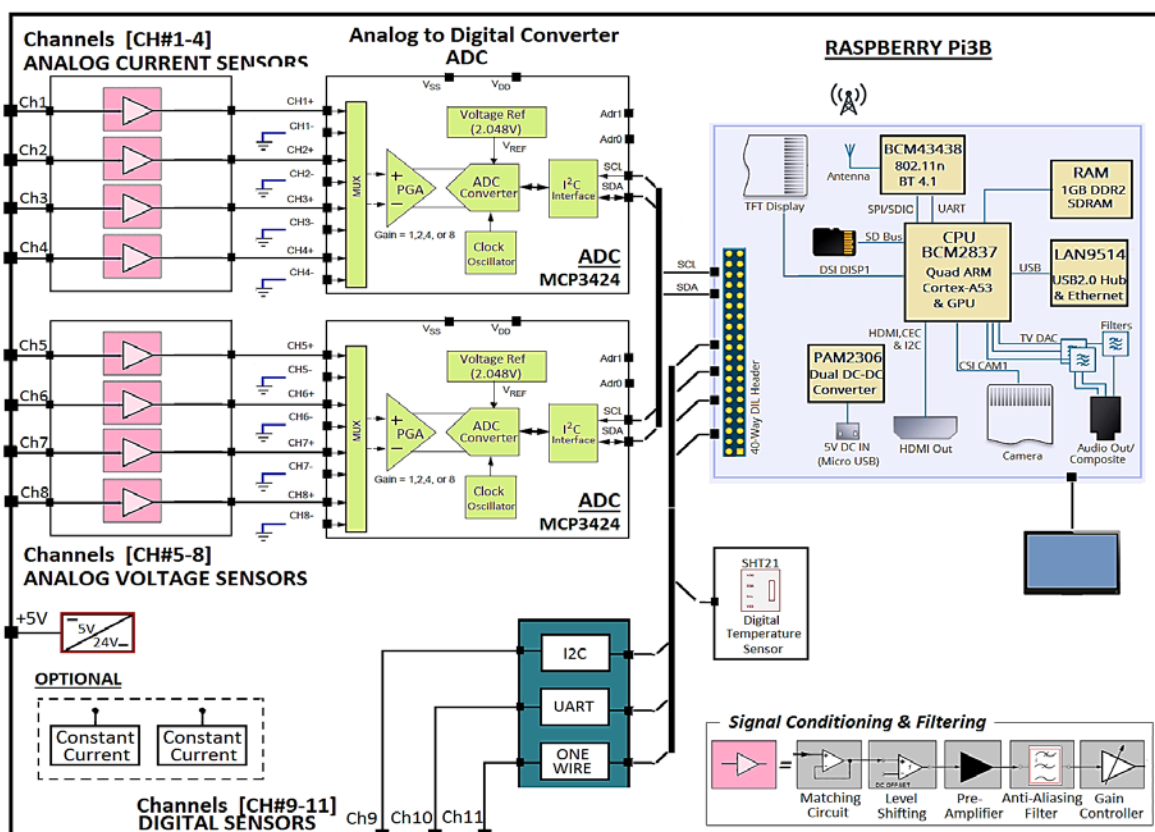
1. αναλογική έξοδο μεταβαλλόμενου ρεύματος 4-20mA (2wire)
2. αναλογική έξοδο μεταβαλλόμενης τάσεως 0-5V
3. ψηφιακή έξοδο με υποστηριζόμενα πρωτόκολλα διασύνδεσης I2C / UART / PWM.

2.2 Γενικό Μπλοκ Διάγραμμα Κατασκευής

Στην *Εικόνα10* φαίνεται το γενικό block διάγραμμα της υλοποιούμενης κατασκευής. Στο διάγραμμα αυτό διακρίνονται οι οκτώ (8) θέσεις εισόδου των αναλογικών αισθητηρίων, τεσσάρων αισθητήρων οδήγησης τάσης και τεσσάρων ρεύματος 4-20mA. Το κάθε σημείο διασύνδεσης αποτελεί ένα αυτόνομο-ανεξάρτητο κανάλι (channel), το οποίο περιέχει κατάλληλες ηλεκτρονικές βαθμίδες προσαρμογής και οδήγησης (signal conditioning and filtering circuits) του ηλεκτρικού σήματος κάθε αισθητήρα προς τον αναλογικό/ψηφιακό μετατροπέα (A/D). Το κάθε κανάλι αν και δεν

διαθέτει γαλβανική απομόνωση με τα υπόλοιπα, μέσω κατάλληλης τεχνικής σχεδίασης του τυπωμένου κυκλώματος, γίνεται προσπάθεια ελαχιστοποίησης παρεμβολών μεταξύ του κάθε καναλιού. Στο διάγραμμα επίσης αποτυπώνονται και οι τρεις (3) θέσεις αισθητηρίων ψηφιακής εξόδου με δυνατότητα διασύνδεσης μέσω “UART”, “I2C” και “One Wire” απευθείας στον συνδετήρα του Raspberry Pi 3B. Επιπλέον πάνω στο τυπωμένο κύκλωμα (on board) έχει τοποθετηθεί αισθητήριο, για την παρακολούθηση και έλεγχο της θερμοκρασίας καθώς και της σχετικής υγρασίας.

Για την μετατροπή και ψηφιοποίηση των αναλογικών σημάτων, η έξοδος του κάθε αναλογικού καναλιού οδηγείται στους δύο (2) μετατροπείς A/D MCP3424ADC, οι οποίοι συνδέονται με την ψηφιακή διάταξη μέσω των 40-pin ακροδεκτών γενικής χρήσης GPIO.



Εικόνα 10: Γενικό Μπλοκ Διάγραμμα Κατασκευής

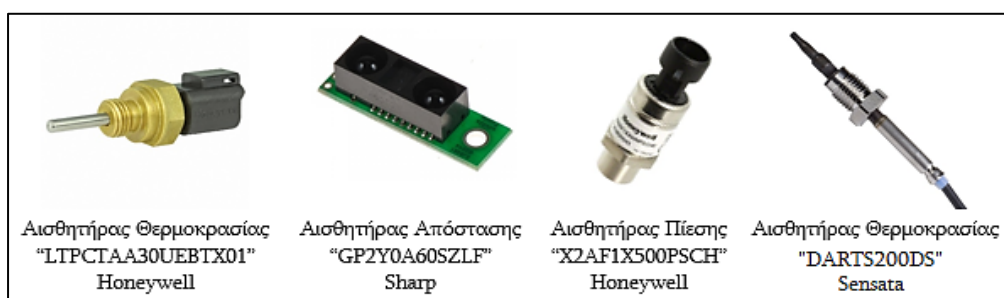
Ο υπολογιστής τσέπης Raspberry Pi αποτελεί την καρδιά της ψηφιακής διάταξης. Χάρη στον ενσωματωμένο προγραμματιζόμενο μικροελεγκτή με τους ακροδέκτες εισόδου/εξόδου γενικής χρήσης (General Purpose Input / Output pins - GPIO) να είναι προσβάσιμοι, το Raspberry Pi αποτελεί ένα σπουδαίο αναπτυξιακό εργαλείο (development board), για embedded συστήματα σε διάφορους αυτοματισμούς, επιτρέποντας τη λήψη δεδομένων από τον μετατροπέα A/D.

Το όλο σύστημα τροφοδοτείται από εξωτερική τροφοδοτική διάταξη συνεχής τάσης +5V/2A ενώ διαθέτει, όπως αναφέρθηκε και dc-to-dc converter +24V/100mA για την παροχή κατάλληλης τάσης σε κυκλώματα οδήγησης αισθητήρων ρεύματος 4-20mA.

2.3 Χρησιμοποιούμενοι Αισθητήρες

Για την σχεδίαση και τον έλεγχο του τυπωμένου κυκλώματος επέκτασης (pcb) χρησιμοποιήθηκαν οι κάτωθι αναλογικοί και ψηφιακοί αισθητήρες. Συγκεκριμένα:

- Ο Αισθητήρας Μέτρησης Απόστασης “GP2Y0A60SZLF” της Sharp, μίας σειράς αισθητήρων τάσεως, με δυνατότητα μέτρησης απόστασης με εύρος τιμών από *10cm έως 150cm*. Ο αισθητήρας τροφοδοτείται με συνεχή τάση +5V και υιοθετεί τη μέθοδο του τριγωνισμού για την παραγόμενη μέτρηση.
- Ο Αισθητήρας Μέτρησης Θερμοκρασίας “LTPCTAA30UEBTX01” της Honeywell, ένας παθητικός αισθητήρας χαμηλής θερμοκρασίας από *-40oC έως +150oC*. Πρόκειται για αισθητήρα ακριβείας, τύπου βίδας (probe) και τεχνολογίας thermistor, ο οποίος διαθέτει ένα ανθεκτικό σχεδιασμό κλειστού τύπου κατάλληλο για την μέτρηση της θερμοκρασίας σε υγρά και σε αέρια.
- Ο Αισθητήρας Μέτρησης Υψηλής Πίεσης “PX2AF1XX500PSCHX” της σειράς PX2 της Honeywell, χρησιμοποιεί την ιδιότητα του πιεζοηλεκτρισμού με εύρος λειτουργίας από *1bar έως 70bar* (15psi έως 1000psi), για θερμοκρασίες λειτουργίας από *-40oC έως +125oC*. Πρόκειται για αισθητήρα Αναλογικής Εξόδου Ρεύματος καθώς διαθέτει ενσωματωμένο μεταδότη dc Ρεύματος 4-20mA, με αποτέλεσμα οποιαδήποτε ανίχνευση μεταβολής της πίεσης να μεταφράζεται σε αντίστοιχη μεταβολή του ρεύματος.
- Ο Αισθητήρας Μέτρησης Θερμοκρασίας “DARTS200DS” της εταιρίας Sensata, ένας αισθητήρας θερμοκρασίας μεταβολής αντίστασης RTD με βάση τη πλατίνα, υψηλής ακριβείας και γραμμικότητας με δυνατότητα μέτρησης από *-40oC έως +850oC*.
- Ο Αισθητήρας μέτρησης Υγρασίας και Θερμοκρασίας “AG SHT21” της Sensirion, είναι ψηφιακής εξόδου με εύρος τιμών από *+1oC έως +100oC*, επιφανειακής στήριξης (smd) ο οποίος θα τοποθετηθεί πάνω στο τυπωμένο κύκλωμα για τη παρακολούθηση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας της πλακέτας επέκτασης (shield).



Εικόνα 11 : Χρησιμοποιούμενοι Αισθητήρες [15]

Πολλαπλές δοκιμές, αρχικά με τον έλεγχο του κάθε αισθητήρα μεμονωμένα και εν συνεχεία με ταυτόχρονη χρήση τους, παρατηρούνται τυχόν αδυναμίες του συστήματος και μέσω κατάλληλων τροποποιήσεων επιβεβαιώνεται η ορθή λειτουργία του ΗΝ κυκλώματος, καταγράφοντας τυχόν αδυναμίες του συστήματος.

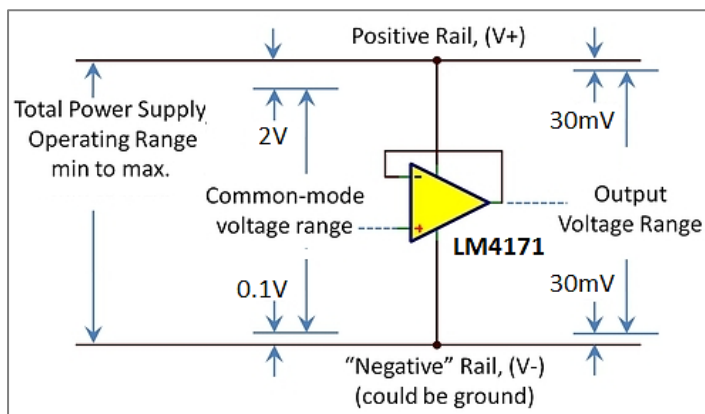
2.4 Επιλογή Τελεστικών Ενισχυτών

Για την υλοποίηση της Αναλογικής Διάταξης γίνεται επιλογή του Τελεστικού Ενισχυτή OPA 171 της Texas Instruments και συγκεκριμένα του κωδικού part number OPA4171AIPWR. Πρόκειται για έναν αρκετά δημοφιλή και οικονομικό Τελεστικό Ενισχυτή αρχιτεκτονικής "Mosfet", υψηλής απόδοσης, χαμηλού θορύβου και ολίσθησης, με κύριο χαρακτηριστικό το "γραμμής σε γραμμής" εξόδου (rail-to-rail), ο οποίος έχει σχεδιαστεί ώστε να λειτουργεί με τάση τροφοδοσίας, συμμετρική ή μη από 2.7~36V [13].

Η επιλογή του συγκεκριμένου package "14-TSSOP" γίνεται με σκοπό την εξοικονόμηση χώρου πάνω στο τυπωμένο κύκλωμα καθώς το κάθε ολοκληρωμένο περιέχει τέσσερις (4) ανεξάρτητους τελεστικούς.

Στις προδιαγραφές ορίστηκε ως βασική τάση λειτουργίας του κυκλώματος τα 5V dc και για το λόγο αυτό έγινε επιλογή μονής-ασύμμετρης τάσης τροφοδοσίας (single supply) +5V όλων των Τελεστικών Ενισχυτών.

Η Τάση Εξόδου του κάθε διαφορικού ενισχυτή που χρησιμοποιείται, ρυθμίζεται να κυμαίνεται από $[0\sim 2.048]Volt$, περιορισμός ο οποίος προέρχεται από την επιτρεπόμενη τάση στην είσοδο του επιλεγμένου μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακού ADC. Στους περισσότερους τελεστικούς ενισχυτές η τάση εξόδου τους περιορίζεται ανάμεσα στο κάτω και άνω όριο τροφοδοσίας τους, χωρίς να μπορεί να φτάσει τις τιμές αυτές. Ένα βασικό πλεονέκτημα του τελεστικού ενισχυτή OPA 171 και ο λόγος επιλογής του, είναι ότι η τάση εξόδου του μπορεί να φθάσει τα παραπάνω όρια τροφοδοσίας, δηλαδή όπως λέγεται η έξοδος είναι από γραμμή σε γραμμή (rail to rail). Αποτέλεσμα είναι η δυνατότητα επεξεργασίας σημάτων που η τάση κοινού σήματος είναι κοντά στην κατώτατη ή ανώτατη τάση τροφοδοσίας, εκμεταλλεύοντας όλο το εύρος τιμών [12].



Εικόνα 12 : LM4171 Rail-to-Rail Opamp [12]

Στη *Εικόνα13* παρουσιάζονται τα βασικότερα τεχνικά χαρακτηριστικά του Τελεστικού Ενισχυτή OPA 171.

OPAx171 36-V, Single-Supply, SOT-553, General-Purpose Operational Amplifiers

Features

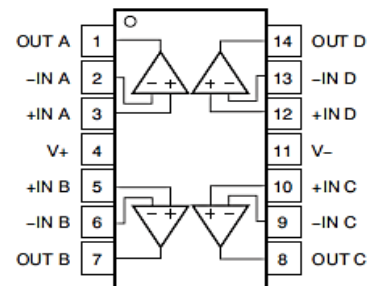
- Supply Range: 2.7 to 36 V, ± 1.35 V to ± 18 V
- Low Noise: 14 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
- Low Offset Drift: ± 0.3 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (Typical)
- RFI Filtered Inputs
- Input Range Includes The Negative Supply
- Input Range Operates To Positive Supply
- Rail-to-Rail Output
- Gain Bandwidth: 3 MHz
- Low Quiescent Current: 475 μA per Amplifier
- High Common-Mode Rejection: 120 dB (Typical)
- Low-Input Bias Current: 8 pA
- Industry-Standard Packages:
 - 8-Pin SOIC
 - 8-Pin MSOP
 - 14-Pin TSSOP
- *micro*Packages:
 - Single in SOT-553
 - Dual in VSSOP-8



Applications

- Tracking Amplifier in Power Modules
- Merchant Power Supplies
- Transducer Amplifiers
- Bridge Amplifiers
- Temperature Measurements
- Strain Gauge Amplifiers

OPA4171 D and PW Packages
14-Pin SO and TSSOP
Top View



Electrical Characteristics

at $T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_S = 2.7$ to 36 V, $V_{CM} = V_{OUT} = V_S / 2$, and $R_{LOAD} = 10$ k Ω connected to $V_{CC} / 2$, (unless otherwise noted)

PARAMETER		TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
POWER SUPPLY						
V_S	Specified voltage range		2.7		36	V
TEMPERATURE						
	Specified range		-40		125	$^\circ\text{C}$
	Operating range		-55		150	$^\circ\text{C}$
NOISE						
	Input voltage noise	$f = 0.1$ Hz to 10 Hz		3		μV_{PP}
e_n	Input voltage noise density	$f = 100$ Hz		25		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
		$f = 1$ kHz		14		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
INPUT VOLTAGE						
V_{CM}	Common-mode voltage range ⁽¹⁾		$(V_-) - 0.1$ V		$(V_+) - 2$ V	V
CMRR	Common-mode rejection ratio	$V_S = \pm 2$ V $(V_-) - 0.1$ V < $V_{CM} < (V_+) - 2$ V $T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+125^\circ\text{C}$	90	104		dB
		$V_S = \pm 18$ V $(V_-) - 0.1$ V < $V_{CM} < (V_+) - 2$ V $T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+125^\circ\text{C}$	104	120		dB
INPUT IMPEDANCE						
	Differential			100 3		M Ω pF
	Common-mode			6 3		$10^{12}\Omega$ pF
FREQUENCY RESPONSE						
GBP	Gain bandwidth product			3		MHz
SR	Slew rate	$G = 1$		1.5		V/ μs
OUTPUT						
V_O	Voltage output swing from rail	$V_S = 5$ V $R_L = 10$ k Ω		30		mV
	Over temperature	$R_L = 10$ k Ω $A_{OL} \geq 110$ dB $T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+125^\circ\text{C}$	$(V_-) +$ 0.35		$(V_+) -$ 0.35	V

Εικόνα 13: Τεχνικά Χαρακτηριστικά T.E OPA 171 [13]

2.5 Επιλογή Πυκνωτών Αποσύζευξης (decoupling)

Κατά την τροφοδοσία οποιουδήποτε ολοκληρωμένου ηλεκτρονικού εξαρτήματος, η βασική απαίτηση είναι το σημείο εισόδου της ηλεκτρικής τροφοδοσίας να απέχει από οποιοδήποτε ψηφιακό θόρυβο υψηλών και χαμηλών συχνοτήτων που μπορεί να προκαλούν οι μεταβολές ρεύματος λογικού (1) και (0) σε όλες τις βαθμίδες εξόδου. Κάθε μεταβολή από λογικό (1) σε (0) ή αντίστροφα προκαλεί αιχμή παραμόρφωσης (spikes) στην τροφοδοσία των ολοκληρωμένων, οι οποίες με την σειρά τους προκαλούν διέγερση της εισόδου κάθε βαθμίδος καταστρέφοντας την εφαρμοζόμενη ψηφιακή λογική.

Ο πυκνωτής αποσύζευξης (“decoupling”), που τοποθετείται κοντά στον ακροδέκτη τροφοδοσίας κάθε ολοκληρωμένου κυκλώματος, μαζί με την αντίσταση της γραμμής τροφοδοσίας που προηγείται αυτού, δημιουργούν ένα φίλτρο το οποίο εξασφαλίζει “καθαρή” dc τάση τροφοδοσίας απαλλαγμένη από τυχόν θόρυβο [19].

Στην *Εικόνα14* φαίνεται η φυσική θέση και ο τρόπος διασύνδεσης ενός πυκνωτή “decoupling”. Οποιοδήποτε θόρυβος που εμφανίζεται στη γραμμή ισχύος παρακάμπτεται αμέσως στη γείωση (GND) εμποδίζοντας την είσοδό του στο σύστημα. Όσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα του πυκνωτή, τόσο μεγαλύτερη είναι η απότομη πτώση της τάσης που μπορεί να χειριστεί ο πυκνωτής.

Σύνηθες τεχνική, εφαρμοζόμενη και στη συγκεκριμένη σχεδίαση, είναι στην είσοδο της τροφοδοσίας του κάθε ολοκληρωμένου η τοποθέτηση δύο παράλληλων πυκνωτών :

- Ενός ηλεκτρολυτικού μεγάλης σχετικά χωρητικότητας ($1\mu\text{F}$ ή $10\mu\text{F}$) και κατάλληλης τάσης, για την σταθεροποίηση της τροφοδοσίας από τυχόν διακυμάνσεις. Οι ηλεκτρολυτικοί είναι κατά βάση πυκνωτές συσσώρευσης ικανοί να αποδώσουν στιγμιαία ικανό ρεύμα (χαμηλής εσωτερικής αντίστασης - low ESR) και θερμοκρασία λειτουργίας κατάλληλη για να ισορροπήσει την εσωτερική παραγόμενη θερμοκρασία και την θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- Ενός κεραμικού πυκνωτή μικρότερης χωρητικότητας (100nF) και με διηλεκτρικό X7R κατάλληλο για decoupling που να προσφέρει χαμηλή αντίσταση σε ροή ρευμάτων υψηλών συχνοτήτων.



Εικόνα 14 : Πυκνωτές Decoupling [15]

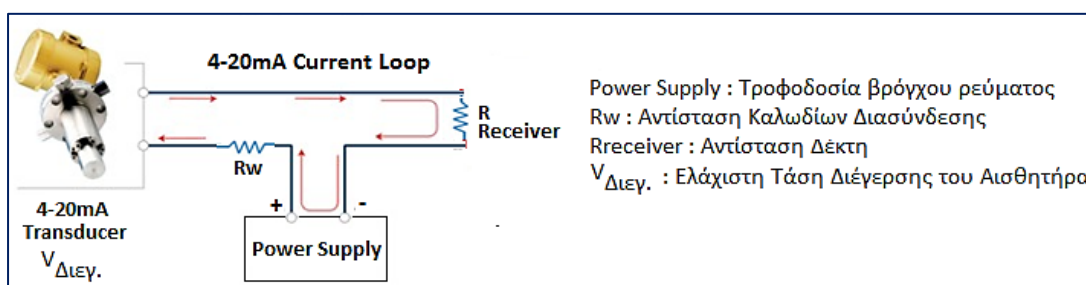
Στην παραπάνω *Εικόνα* φαίνεται το ζεύγος των δύο πυκνωτών που χρησιμοποιούνται ως πυκνωτές “decoupling” στη τροφοδότηση των Τελεστικών Ενισχυτών “OPA 171” :

- *Ηλεκτρολυτικός Πυκνωτής Αλουμινίου $10\mu\text{F} \pm 20\%$ / 16V SMD*
(*Electrolytic Capacitors Radial CAP ALUM 10UF 20% 16V, Can - SMD @ 105°C*)
- *Κεραμικός Πυκνωτής X7R $100\text{nF} \pm 10\%$ / 25V SMD 0603*
(*Ceramic Capacitor X7R 0603 CAP CER 0.1UF $\pm 10\%$ / 25V SMD*)

2.6 Επιλογή κυκλώματος παροχής τάσεως +24V dc

Στο Κεφάλαιο 1 έγινε περιγραφή των κυκλωμάτων οδήγησης αισθητήρων ρεύματος (μεταδότες 4-20mA). Τα κυκλώματα αυτά χρησιμοποιούν ένα βρόχο ρεύματος 4-20mA για τη μετάδοση σήματος του αισθητήρα (Εικόνα15). Ο μόνος περιορισμός που τίθεται είναι η τροφοδοσία του αισθητηρίου θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα των πτώσεων τάσης κατά μήκος του βρόγχου στη μέγιστη τιμή του ρεύματος των 20mA. Θα πρέπει δηλαδή να ικανοποιείται η συνθήκη :

$$Power Supply \geq \Delta V_{MIN} = V_{\Delta\epsilon\gamma.} + I_{MAX} \times (R_W + R_{Receiver})$$



Εικόνα 15 : Βρόγχος Ρεύματος 4 – 20 mA [8]

Το τροφοδοτικό DC παρέχει την απαιτούμενη τάση τροφοδοσίας (19V έως 30V) με συνηθέστερη εκείνη των 24Volt. Για την υλοποίηση της τάσης αυτής επιλέγεται ένας μετατροπέας συνεχούς τάσης της εταιρίας XP Power με part number το ISU0305S24. Πρόκειται για ένα έτοιμο δομημένο ολοκληρωμένο, επιφανειακής στήριξης dc-to-dc converter (smd board mount) 3Watt, το οποίο δέχεται στην είσοδό του τα +5V dc που προέρχονται από την κύρια τάση τροφοδοσίας του τυπωμένου κυκλώματος και στην έξοδό του παράγει τα +24V dc [16]. Κύρια χαρακτηριστικά του είναι η υψηλή απομόνωση μεταξύ εισόδου-εξόδου, η μεγάλη αποδοτικότητα που διαθέτει, το μέγιστο ρεύμα εξόδου του στα 125mA – αρκετό για την οδήγηση 4 βρόγχων ρεύματος 4-20mA – με προσιτή τιμή.

Στην Εικόνα16 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μετατροπέα, μαζί με το σχηματικό διάγραμμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι για την υλοποίηση του συγκεκριμένου τροφοδοτικού, δεν απαιτούνται πρόσθετα εξαρτήματα οδήγησής του, καθώς όλα ενσωματώνονται στο εσωτερικό του, εξοικονομώντας χώρο πάνω στο τυπωμένο κύκλωμα.

Για αποτελεσματική απόδοση τοποθετείται στην έξοδο του ολοκληρωμένου πυκνωτής αποσύζευξης με τιμή :

Ηλεκτρολυτικός Πυκνωτής Αλουμινίου 100uF ±20% / 45V SMD
(Electrolytic Capacitors Radial CAP ALUM 100UF 20% 35V, Can - SMD @ 105°C)

ISU03 Series DC-DC Converter

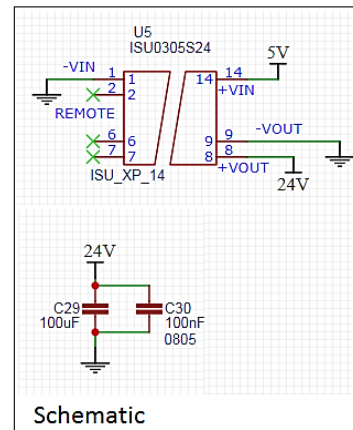
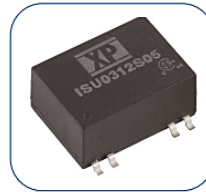
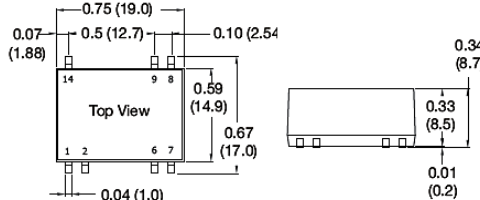
XP XP Power

3 Watt

- Regulated Single & Dual Output
- Wide 4:1 Input Range
- Compact SMD Package
- 1500 VDC Isolation
- Operating Temperature -40 °C to +95 °C
- ITE Safety Approvals
- Remote On/Off
- Tape & Reel Package Available
- Optional Water Washable Versions
- 3 Year Warranty

Dimensions:

ISU03:
0.75 x 0.67 x 0.34" (19.0 x 17.0 x 8.7 mm)



Models & Ratings

Input voltage	Output voltage	Output current	Input current ^(1,2)		Maximum capacitive load ⁽³⁾	Efficiency	Model number ⁽⁴⁾
			No load	Full load			
4.5-12V	24 V	125 mA	40 mA	730 mA	390 μ F	82%	ISU0305S24

Εικόνα 16 : Μετατροπέας dc to dc Converter στα 24Vdc [16]

2.7 Πηγή Σταθερού Ρεύματος

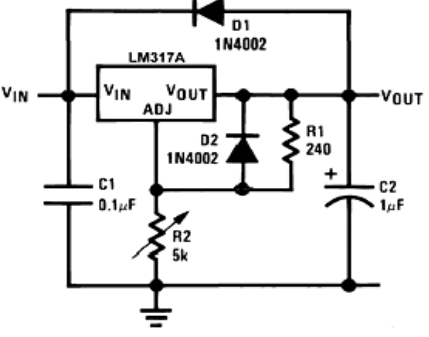

Η λειτουργία ορισμένων αισθητηρίων βασίζεται στην αλλαγή της ωμικής τους αντίστασης καθώς μεταβάλλεται το φυσικό μέγεθος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας αισθητήρων αποτελούν τα θερμόμετρα αντιστάσεων RTD, οι αισθητήρες θέσης (ηλεκτρικά επιμηκυνσιόμετρα) καθώς και οι μετρητές φωτεινής έντασης στηριζόμενοι στο φωτοηλεκτρικό στοιχείο. Σε αυτό τον τύπο αισθητηρίων θα πρέπει η μεταβολή αντίστασης που υφίστανται να είναι βαθμονομημένη ως προς τη φυσική παράμετρο που μετρούν. Τα κυκλώματα προσαρμογής για τη μέτρηση του φυσικού μεγέθους μέσω των παραπάνω τύπων αισθητήρων, στοχεύουν στη μετατροπή της μεταβολής της αντίστασης του αισθητήρα σε αντίστοιχη μεταβολή ηλεκτρικής τάσης.

Κλασικό ηλεκτρικό κύκλωμα για τον προσδιορισμό των τιμών αντιστάσεων είναι η dc γέφυρα Wheatstone, η οποία όμως απαιτεί μεγάλη ακρίβεια στη ρύθμιση της ισορροπίας της. Για το λόγο αυτό για την οδήγηση και τον έλεγχο των παραπάνω τύπων αισθητήρων χρησιμοποιούνται κυκλώματα παροχής σταθερού ρεύματος, τα οποία βασίζονται στη μέτρηση της πτώσης τάσης στα άκρα της μετρούμενης αντίστασης όταν αυτή διαρρέεται από σταθερό ρεύμα [1].

Ο Σταθεροποιητής LM317 ως πηγή σταθερού ρεύματος

Ένα κύκλωμα πηγής σταθερού ρεύματος μπορεί να υλοποιηθεί με χρήση του σταθεροποιητή LM317. Το LM317 είναι ένας από τους πιο δημοφιλείς γραμμικούς σταθεροποιητές τάσης για εφαρμογές χαμηλής ισχύος με ρυθμιζόμενη τάση εξόδου από $1.25V$ έως $40V$ και δυνατότητα παροχής ρεύματος έως και $1.5A$ [17]. Στην παρακάτω *Εικόνα* παρουσιάζονται τα κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά καθώς και το βασικό κύκλωμα συνδεσμολογίας του.

LM317 Specifications				
	MIN	TYP	MAX	UNIT
Input-output voltage differential	-0.3		40	V
Output Current			1.5	A
Operating temperature	-40		125	°C
Reference voltage $T_J = 25^\circ\text{C}$	1.238	1.250	1.262	V
Dropout Voltage	1		2.5	V
Adjustment pin current		50	100	μA
Minimum load current		3.5	10	mA
Temperature stability		1%		
RMS output noise, % of V_{OUT}		0.003%		
Ripple rejection ratio	66	80		dB
$V_{out} = 1.25V \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + I_{adj} \times R_2$				
$I_{out} = \left(\frac{V_{ref}}{R_1}\right) + I_{adj}$				

Εικόνα 17: Τεχνικά Χαρακτηριστικά LM317 και Κυκλωματικό Διάγραμμα [17]

Το LM317 διαθέτει τρεις ακροδέκτες: τον ακροδέκτη εισόδου V_{in} όπου εφαρμόζεται η συνεχής τάση η οποία πρόκειται να σταθεροποιηθεί, τον ακροδέκτη ρύθμισης Adj μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η ρύθμιση της τάσης εξόδου καθώς και τον ακροδέκτη εξόδου V_{out} μέσω του οποίου λαμβάνεται η σταθεροποιημένη συνεχής τάση. Για την ρύθμιση της τάσης εξόδου απαιτείται μόνο ένα ζεύγος εξωτερικών αντιστάσεων R_1 και R_2 :

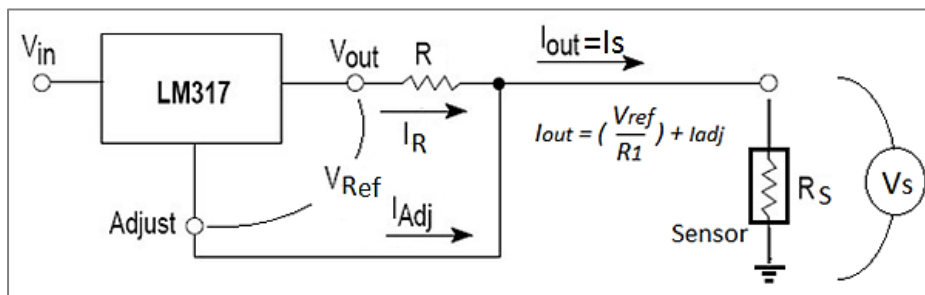
$$V_{out} = V_{ref} \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + I_{adj} \times R_2$$

όπου V_{ref} η σταθερή τάση μεταξύ των ακροδεκτών Adj και V_{out} και I_{adj} το πολύ μικρό ρεύμα που διέρχεται από τον ακροδέκτη ρύθμισης. Τυπικές τιμές των παραπάνω μεγεθών με βάση το datasheet είναι $V_{ref}=1.25\text{ Volt}$ και $I_{adj}=50\mu\text{A}$ [17].

Εκτός από τις παραπάνω δύο αντιστάσεις υπάρχουν και κάποια παθητικά στοιχεία που προαιρετικά απαρτίζουν το βασικό κυκλωματικό διάγραμμα. Οι πυκνωτές C_1 και C_2 συνδέονται στην είσοδο και στην έξοδο του ολοκληρωμένου αντιστοίχως: ο πυκνωτής C_1 απαιτείται όταν η είσοδος του ολοκληρωμένου απέχει πάνω από 6 inches από τη πηγή τάσης εισόδου προς αποφυγή τυχόν αυτοδιεγέρσεων, ενώ ο πυκνωτής C_2

χρησιμοποιείται με σκοπό την εξουδετέρωση οποιασδήποτε εναπομείνουσας κυμάτωσης στην τάση εξόδου. Οι δίοδοι $D1$ και $D2$ παρέχουν προστασία για τον σταθεροποιητή LM317 έναντι πιθανής εμφανιζόμενης αντιστροφής τάσης που μπορεί να προκληθεί από τυχόν βραχυκύκλωμα της εισόδου ή της εξόδου του ολοκληρωμένου [17].

Με τη χρήση του παρακάτω κυκλώματος (*Εικόνα18*) επιτυγχάνεται η υλοποίηση μιας σταθερής πηγής ρεύματος (I_{out}) ανεξάρτητης από το φορτίο, εκμεταλλευόμενη της ιδιότητας του σταθεροποιητή LM317 να εμφανίζει σταθερή τάση V_{ref} μεταξύ των ακροδεκτών εξόδου (V_{out}) και ρύθμισης (Adj) [17], [19].



Εικόνα 18 : Συνδεσμολογία LM317 ως πηγή ρεύματος

Στην είσοδο του σταθεροποιητή LM317 εφαρμόζεται μία συνεχή τάση V_{in} , ενώ τα άκρα του αισθητήρα προς οδήγηση συνδέονται μεταξύ του ακροδέκτη ρύθμισης (Adj) του LM317 και της γείωσης (ground). Συνδέοντας μια αντίσταση σταθερής τιμής R ανάμεσα στον ακροδέκτη ρύθμισης και την έξοδο, επιτυγχάνεται το ρεύμα I_{out} που διέρχεται από τον αισθητήρα να είναι σταθερό, ανεξάρτητο της αντίστασης του R_s και ίσο με :

$$I_{OUT} = I_R + I_{Adj} = \frac{V_{Ref}}{R} + I_{Adj} \rightarrow I_{OUT} = \frac{1.25 V}{R} + 50\mu A$$

Αποτέλεσμα είναι οποιαδήποτε μεταβολή του φυσικού μεγέθους που ισοδυναμεί με αλλαγή της ωμικής αντίστασης του αισθητήρα R_s , μεταφράζεται με μεταβολή της τάσης στα άκρα του αισθητήρα V_s , καθώς ο αισθητήρας θα διέρχεται πάντοτε από σταθερό ρεύμα I_{out} .

$$V_s = I_{OUT} \times R_s.$$

Η τιμή της τάσης αυτής θα αποτελεί το μέτρο της μεταβολής του φυσικού μεγέθους που μετρά ο αισθητήρας και θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως είσοδος στη βαθμίδα προσαρμογής της αναλογικής διάταξης (signal conditioning).

Το ρεύμα λειτουργίας του εκάστοτε αισθητήρα καθορίζεται από την επιλογή της αντίστασης R .

$$I_{OUT} = I_R + I_{Adj} = \frac{V_{Ref}}{R} + I_{Adj} \rightarrow I_{OUT} = \frac{1.25 V}{R} + 50\mu A \rightarrow$$

$$R = \frac{V_{Ref}}{I_{OUT} - I_{Adj}} \rightarrow R = \frac{1.25 V}{I_{OUT} - 50\mu A}$$

Στον παρακάτω Πίνακα2 φαίνονται διάφορες τιμές σταθερής πηγής ρεύματος I_s σε αντιστοιχία με την μεταβολή της αντίστασης R . Για παράδειγμα για την υλοποίηση σταθερής πηγής ρεύματος $I_s=1mA$, που αποτελεί κοινό ρεύμα λειτουργίας πολλών αισθητήρων, και πηγή τάσης εισόδου $V_c = 5V$, επιλέγεται τιμή αντίστασης $R=1,326k\Omega$, η οποία επιτυγχάνεται με την εν σειρά διασύνδεση δύο αντιστάσεων :

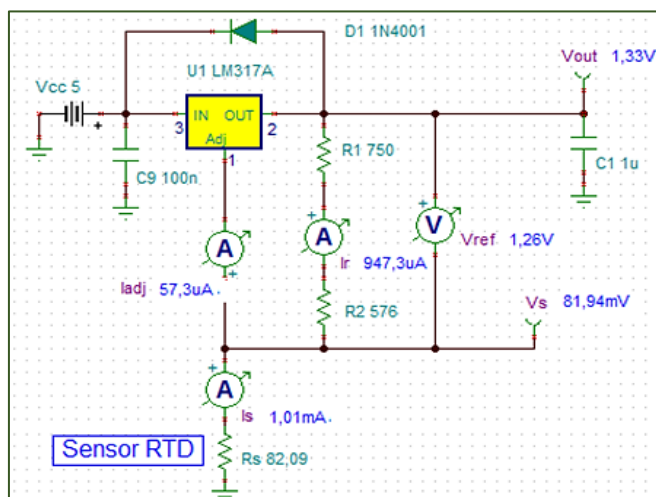
$R1A = 750\Omega$, $\pm 0.1\%$, $1/8W$, $0805 SMD$ και

$R1B = 576\Omega$, $\pm 0.1\%$, $1/8W$, $0805 SMD$

CONSTANT CURRENT GENERATOR																																										
	Vcc	5,00	V	$R = V_{ref} / I_R$																																						
	Vref	1,26	V																																							
	Iadj	5,00E-05	A																																							
	Vdrop	1,5	V																																							
	Vin = Vcc	5,00	V																																							
	$V_{out} = V_{ref} + V_s$ $V_{out} = V_{ref} + (I_s \times R_s)$		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">[mA]</th> <th colspan="2">[kΩ]</th> </tr> <tr> <th>I_s</th> <th>I_R</th> <th>R</th> <th>0805 ±0.1</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,25</td> <td>0,20</td> <td>6,300</td> <td>4k87 1k43</td> </tr> <tr> <td>0,4mA</td> <td>0,35</td> <td>3,600</td> <td>1k78 1k82</td> </tr> <tr> <td>0,5</td> <td>0,45</td> <td>2,800</td> <td>1k4 1k4</td> </tr> <tr> <td>1mA</td> <td>0,95</td> <td>1,326</td> <td>750 576</td> </tr> <tr> <td>1,4</td> <td>1,35</td> <td>0,933</td> <td>511 & 422</td> </tr> <tr> <td>1,7</td> <td>1,65</td> <td>0,764</td> <td>432 332</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>2,95</td> <td>0,427</td> <td>249 178</td> </tr> </tbody> </table>		[mA]		[kΩ]		I_s	I_R	R	0805 ±0.1	0,25	0,20	6,300	4k87 1k43	0,4mA	0,35	3,600	1k78 1k82	0,5	0,45	2,800	1k4 1k4	1mA	0,95	1,326	750 576	1,4	1,35	0,933	511 & 422	1,7	1,65	0,764	432 332	3	2,95	0,427	249 178		
	[mA]		[kΩ]																																							
	I_s	I_R	R	0805 ±0.1																																						
	0,25	0,20	6,300	4k87 1k43																																						
	0,4mA	0,35	3,600	1k78 1k82																																						
0,5	0,45	2,800	1k4 1k4																																							
1mA	0,95	1,326	750 576																																							
1,4	1,35	0,933	511 & 422																																							
1,7	1,65	0,764	432 332																																							
3	2,95	0,427	249 178																																							
$V_{out(max)} = V_{in} - V_{drop}$ $V_{out} = 1,34$ V		$V_{OUT} = 1.26 V \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{ADJ} (R_2)$																																								
Max. Rtd=Rs vs φορτίο <table border="1"> <thead> <tr> <th>Φορτίο Is [mA]</th> <th>Rs [kΩ] max</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>2,25</td> </tr> <tr> <td>0,4</td> <td>5,63</td> </tr> <tr> <td>0,25</td> <td>9</td> </tr> <tr> <td>1,4</td> <td>1,61</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0,75</td> </tr> </tbody> </table>		Φορτίο Is [mA]	Rs [kΩ] max	1	2,25	0,4	5,63	0,25	9	1,4	1,61	3	0,75	$R_s = \frac{R \times (V_{out} - V_{ref})}{(V_{ref} + (I_{adj} \times R))} \rightarrow$ $R_s = \frac{R \times (V_{cc} - V_{drop} - V_{ref})}{(V_{ref} + (I_{adj} \times R))}$																												
Φορτίο Is [mA]	Rs [kΩ] max																																									
1	2,25																																									
0,4	5,63																																									
0,25	9																																									
1,4	1,61																																									
3	0,75																																									
		Is [constant I]	1,00E-03	A																																						
		IR	9,50E-04	A																																						

Πίνακας 2 : Συνδεσμολογία LM317 ως πηγή ρεύματος

Η προσομοίωση και η επαλήθευση των παραπάνω τιμών γίνεται με το πρόγραμμα TINA-Ti V.9 της Texas Instruments, όπως φαίνεται στην *Εικόνα19*.



Εικόνα 19 : Προσομοίωση Συνδεσμολογίας LM317 ως πηγή ρεύματος 1mA

Επίσης στον ίδιο Πίνακα υπολογίζεται η μέγιστη μεταβολή αντίστασης R_{s_max} που μπορεί να υποστεί ο κάθε αισθητήρας για συγκεκριμένη πηγή ρεύματος. Για μεγαλύτερες αντιστάσεις απαιτείται η αύξηση της τροφοδοσίας $V_c > 5V$. Στο παραπάνω παράδειγμα για πηγή ρεύματος $I_s = 1mA$, η μέγιστη μεταβολή αντίστασης του αισθητήρα θα πρέπει να είναι $R_{s_max} = 2,25k\Omega$.

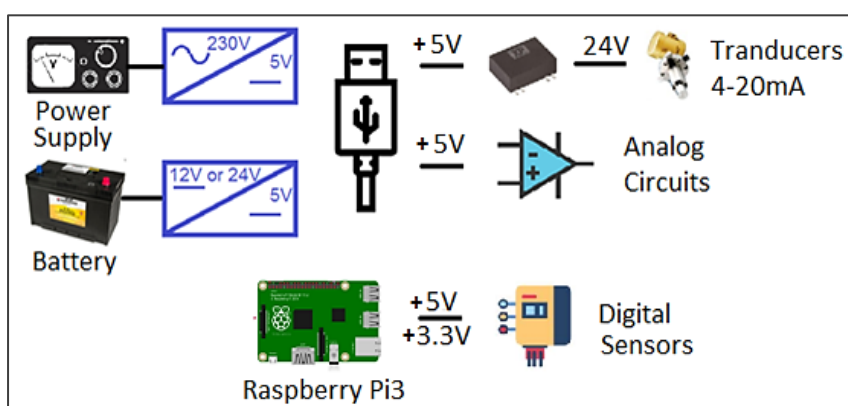
Γίνεται αντιληπτό ότι ανάλογα με το επιθυμητό ρεύμα λειτουργίας του εκάστοτε αισθητήρα, επιλέγεται η αντίστοιχη τιμή πηγή σταθερού ρεύματος, μέσω κατάλληλης επιλογής της αντίστασης R του παραπάνω κυκλώματος.

2.8 Απαιτήσεις τροφοδοσίας και επιλογή τροφοδοτικής διάταξης

Ένα απ' τα βασικά μέρη ενός συστήματος, είναι η τροφοδοτική του διάταξη, με σκοπό την ομαλή του λειτουργία. Όσον αφορά τη τροφοδοσία του συστήματος, το όλο σύστημα τροφοδοτείται από εξωτερική τροφοδοτική διάταξη συνεχούς τάσης +5V ενώ διαθέτει και dc-to-dc converter +24V/100mA για την παροχή κατάλληλης τάσης, απαραίτητη σε κυκλώματα οδήγησης αισθητηρίων ρεύματος 4-20mA. Ο υπολογιστής τσέπης Raspberry Pi3 τροφοδοτείται από ανεξάρτητη δική του διάταξη +5V/2A.

Η επιλογή των +5V dc γίνεται λαμβάνοντας υπόψη ότι πρόκειται για μία πολύ κοινή τάση τροφοδοσίας, εύκολα υλοποιήσιμη, που μπορεί να προέρθει είτε από εξωτερική τροφοδοτική διάταξη, είτε μέσω μιας θύρας USB 3.0, είτε ακόμη από κατάλληλη μετατροπή των 12V ή 24V μιας μπαταρίας. Τέλος μέσω του συνδετήρα του Raspberry Pi υπάρχει δυνατότητα τροφοδότησης αισθητηρίων ψηφιακής εξόδου με τάσεις +5V και +3.3V όπου απαιτηθεί. Σημειώνεται ότι οι τροφοδοσίες των αναλογικών αισθητηρίων παρέχονται από ξεχωριστές πηγές.


Στην *Εικόνα20* φαίνεται συνοπτικά το μπλοκ διάγραμμα τροφοδοσιών :



Εικόνα 20 : Μπλοκ Διάγραμμα Τροφοδοσιών

Υπολογισμός κατανάλωσης Ρεύματος

Για τον υπολογισμό του συνολικού ρεύματος κατανάλωσης, πρέπει να ληφθούν υπόψη όλες οι επιμέρους καταναλώσεις των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων που υπάρχουν πάνω στην πλακέτα επέκτασης (shield) καθώς και εκείνες που δημιουργούνται από την ύπαρξη των pull-up αντιστάσεων. Οι καταναλώσεις αυτές υπολογίζονται με βάση τα datasheets του κάθε εξαρτήματος και βεβαίως εξαρτώνται από τον αριθμό των ολοκληρωμένων που χρησιμοποιούνται. Στον παρακάτω Πίνακα έχουν καταγραφεί τα ολοκληρωμένα κυκλώματα (IC's) καθώς και η κατανάλωση του καθενός.

Πίνακας Υπολογισμού Κατανάλωσης Ρεύματος Πηγής +5V		I [mA]
1.	Opamp's : 8 x T.E OPA4171AID - SOIC14N - 4IC [13] <ul style="list-style-type: none"> • 1 Socket - 4 Opamps \forall για κάθε κανάλι <ul style="list-style-type: none"> • 2 opamps για Signal Conditioning • 2 opamps για filtering • 48mA κατανάλωση \forall IC (12mA / Opamp) • 8 channels x 48mA = 384mA 	384mA
2.	Drivers Κυκλωμάτων [17] <ul style="list-style-type: none"> • 10mA \forall για κάθε κανάλι • 8 channels x 10mA = 80mA 	80mA
3.	ADC : 2 x MCP3424 IC [30] <ul style="list-style-type: none"> • 10mA κατανάλωση \forall IC • 2 IC x 10mA = 20mA 	20mA
4.	I2C Level Converters : 3 x FDC6301N IC [31] <ul style="list-style-type: none"> • 1mA κατανάλωση \forall IC • 3 IC x 1mA = 3mA 	3mA
5.	Constant Current Drivers : 2 x LM317 IC <ul style="list-style-type: none"> • 0mA κατανάλωση \forall IC • 2 IC x 0mA = 0mA 	0mA
6.	Power Converter 5V to 24V : 1 x XP Power ISU0305S24 <ul style="list-style-type: none"> • 730mA κατανάλωση = 730mA [16] 	730mA
 Συνολική Κατανάλωση :		1217mA

Πίνακας 3: Πίνακας Υπολογισμού Κατανάλωσης Ρεύματος

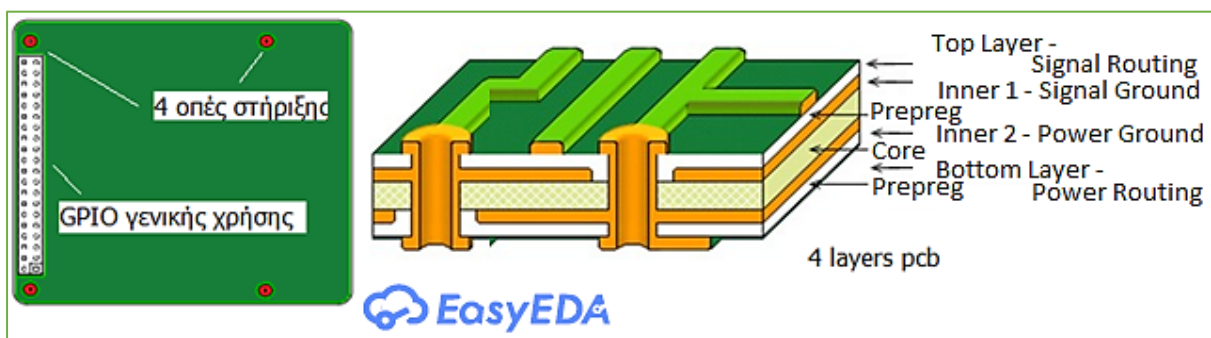
Από τον Πίνακα 3 προκύπτει ότι η συνολική απαίτηση σε κατανάλωση ρεύματος είναι **1217mA**. Λαμβάνοντας υπόψη τυχόν ανάγκες μελλοντικής επέκτασης καθώς και δημιουργία ανάγκης τροφοδότησης κάποιου αναλογικού αισθητήρα, επιλέγεται εξωτερική τροφοδοτική διάταξη +5V / 2A.

2.9 Το Τυπωμένο Κύκλωμα

Η Σχεδίαση του θεωρητικού καθώς και του τυπωμένου κυκλώματος (pcb) γίνεται με το σχεδιαστικό πακέτο “Easy EDA”. Πρόκειται για ένα online πρόγραμμα σχεδίασης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, ανοικτού κώδικα “open source”, επιτρέποντας την δωρεάν απόκτηση και χρήση των εφαρμογών χωρίς καμία υποχρέωση. Εφόσον δύναται η δυνατότητα ελεύθερης διανομής του κώδικα του προγράμματος online, υπάρχει ασφάλεια στη χρήση και δυνατότητα βελτίωσής του, χάρη των επεκτάσεων και διορθωτικών παρεμβάσεων που γίνονται από τους χρήστες [18].

Το “Easy EDA” είναι ένα επαγγελματικό πρόγραμμα σχεδίασης τυπωμένων κυκλωμάτων, το οποίο παρέχει ασφαλή σχεδίαση του pcb μέσω κατάλληλων ελέγχων και κανόνων σχεδίασης (drc check & rules) που παρέχει το ίδιο το πρόγραμμα. Ακόμη δύναται η ικανότητα διασύνδεσης με προγράμματα εξομοίωσης, ενώ το γραφικό του περιβάλλον και τα πλήκτρα συντόμευσης το καθιστούν φιλικό προς το χρήστη. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα είναι η τεράστια βιβλιοθήκη εξαρτημάτων που διαθέτει με τη δυνατότητα επιλογής πληθώρας αριθμών γεωμετριών (package) για κάθε εξάρτημα. Επιπλέον υπάρχει η προοπτική της απ’ ευθείας (online) αγοράς και προμήθειας των εξαρτημάτων μέσω δικτυακής πλατφόρμας πολυεθνικής εταιρίας.

Το τυπωμένο κύκλωμα επέκτασης (pcb shield) συνδέεται πάνω στον υπολογιστή Raspberry Pi 3B μέσω του συνδετήρα κοινής χρήσης GPIO, αποτελώντας την “upper card” του συστήματος. Οι διαστάσεις του τυπωμένου κυκλώματος περιορίζονται στις διαστάσεις του υπολογιστή Raspberry Pi με “κλειδωμένη” τη διάσταση του μήκους του και δυνατότητα αύξησης της διάστασης του πλάτους για εύκολο debugging. Μελλοντικά, σε τυχόν ανασχεδίαση, η τοποθέτηση των εξαρτημάτων θα γίνει και από τις δύο πλευρές της πλακέτας, περιορίζοντας σημαντικά το μέγεθός της. Μηχανολογικές θέσεις του pcb αποτελούν οι τέσσερις (4) οπές για την στήριξή του μέσα στο κουτί, οι τέσσερις (4) οπές για την στήριξη του Raspberry Pi πάνω σε αυτό και φυσικά ο συνδετήρας γενικής χρήσης.



Εικόνα 21 : Μηχανολογικό Σχέδιο Τυπωμένου Κυκλώματος Επέκτασης [18]

Το τυπωμένο κύκλωμα περιλαμβάνει τα στοιχεία όλου του αναλογικού κυκλώματος μαζί με τα στοιχεία του αναλογικού σε ψηφιακού μετατροπέα, διαθέτει συνδετήρες για την τροφοδοσία της πλακέτας με τα +5V dc, τους ακροδέκτες εισόδων

των έντεκα (11) αναλογικών και ψηφιακών αισθητήρων καθώς και τους ακροδέκτες παροχής διαφόρων τροφοδοσιών (+5V, +24V, +3.3V). Επίσης, το τυπωμένο κύκλωμα περιλαμβάνει συνδετήρες για τον προγραμματισμό και την σειριακή επικοινωνία του ψηφιακού σε αναλογικού μετατροπέα (ADC), τον συνδετήρα γενικής χρήσης (GPIO) για την διασύνδεση του τυπωμένου κυκλώματος με το Raspberry Pi και τέλος πολλαπλά σημεία ελέγχου/ακίδων (test points) στην έξοδο κάθε βαθμίδας (signal conditioning) για την δυνατότητα ελέγχου και ανάπτυξης του τελικού προϊόντος.

Η σχεδίαση του τυπωμένου κυκλώματος περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

- τη δημιουργία του έργου (project),
- την σχεδίαση του θεωρητικού κυκλώματος (schematic drawing),
- την αντιστοίχιση των εξαρτημάτων με την κατάλληλη γεωμετρία (librarian / package),
- την μετάβαση στο πρόγραμμα σχεδίασης του τυπωμένου κυκλώματος με την κατάλληλη τοποθέτηση των εξαρτημάτων (placement) και την δρομολόγηση των αγωγών (routing), έχοντας ορίσει τις διαστάσεις της πλακέτας και τους κανόνες σχεδίασης,
- τον έλεγχο κανόνων σχεδίασης (design rule checking - drc rules),
- την εξαγωγή των αρχείων (gerber files) και προετοιμασία του φακέλου για την παραγωγή της πλακέτας.

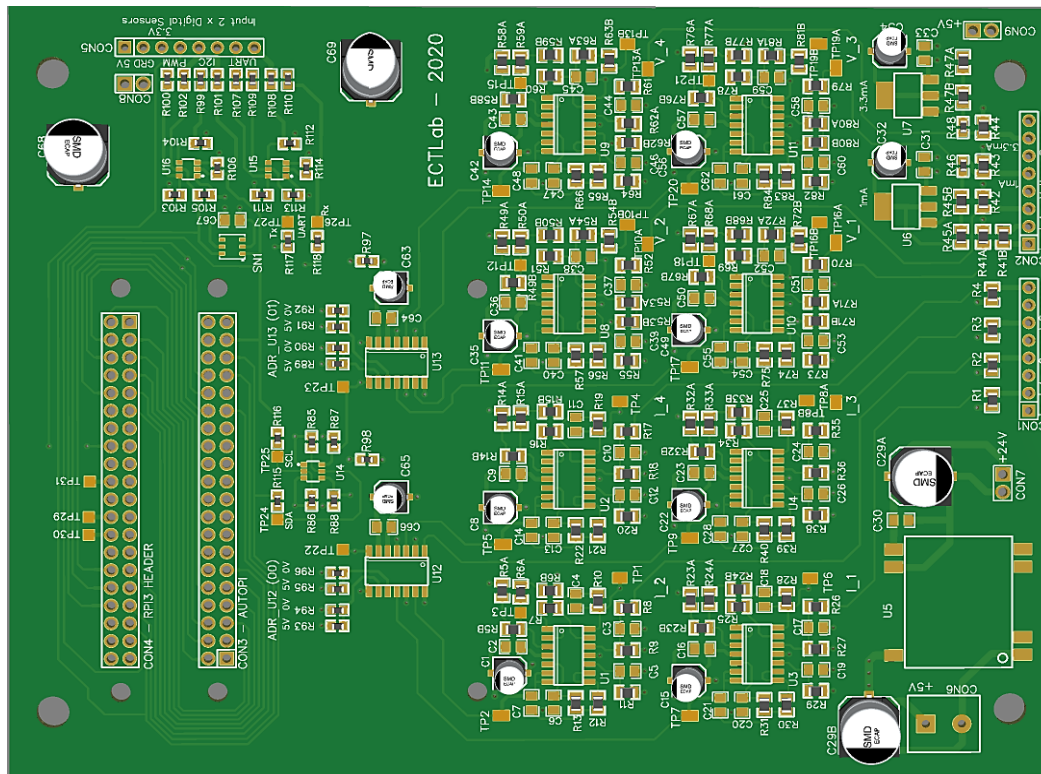
Ο τρόπος σχεδίασης ενός τυπωμένου κυκλώματος αποτελεί ένα πολύ σημαντικό στάδιο της ποιοτικής του λειτουργίας. Κατά την σχεδίαση του τυπωμένου κυκλώματος επέκτασης (pcb shield) δίνεται ιδιαίτερη προσοχή ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα θορύβου και παρεμβολών (crosstalk και EMI) που επηρεάζουν την συμπεριφορά του κυκλώματος και κυρίως στα κυκλώματα οδήγησης των αισθητήρων αναλογικής εξόδου ρεύματος (Μεταδότες dc Ρεύματος 4-20mA), λόγω της χρήσης κοινής πηγής τροφοδοσίας των +24Vdc. Για το λόγο αυτό το τυπωμένο κύκλωμα επιλέγεται να είναι τεσσάρων (4) στρωμάτων (layers) περιλαμβάνοντας κατάλληλα επίπεδα τροφοδοσίας και γείωσης (power and ground planes). Συγκεκριμένα στα επίπεδα της άνω όψης “top layer” και του 1^{ου} εσωτερικού “Inner1” γίνεται η δρομολόγηση όλων σημάτων (signal routing) και η επιστροφή αυτών (power signal) αντιστοίχως. Στο κάτω επίπεδο “bottom layer” δρομολογούνται όλες οι τροφοδοσίες των +24V, +5V και +3.3V (power routing) ενώ στο 2^ο εσωτερικό επίπεδο “Inner2” οι επιστροφές αυτών (power ground).

Επιπρόσθετα διαθέτει μάσκα ύλης συγκόλλησης (soldermask), επιστροφή υλικού για την περιγραφή των εξαρτημάτων (silkscreen) καθώς και επιμεταλλωμένες οπές (plated thru-hole). Όλα τα εξαρτήματα τοποθετούνται στην άνω όψη (top layer) και είναι επιφανειακής στήριξης (smd), πλην των συνδετήρων οι οποίοι είναι τεχνολογίας οπών (thru hole) για λόγους μηχανικής αντοχής.

Ως γεωμετρία (package) των παθητικών στοιχείων (αντιστάσεων και πυκνωτών) ορίζεται η “rc0805” με ενισχυμένους τους ακροδέκτες των εξαρτημάτων (pads) προσφέροντας ευκολία στην κόλληση και αποκόλληση των εξαρτημάτων κατά την διαδικασία της ανάπτυξης και του λειτουργικού ελέγχου του κυκλώματος (development

/ debugging). Οι δε ηλεκτρικές αποστάσεις (clearances Cu-Cu και pad-Cu) καθώς και το ελάχιστο πάχος νησίδων χαλκού (track width) ορίζονται στα 12mils, με ελάχιστο νία 16mils/35mils (hole diameter/annular ring), προδιαγραφές τυπικά υλοποιήσιμες από πολλούς κατασκευαστές τυπωμένων κυκλωμάτων (design for manufacturing).

Στην Εικόνα που ακολουθεί φαίνεται η άνω όψη του τυπωμένου κυκλώματος, ενώ στο Παράρτημα Γ δίνονται τα αρχεία layout (Gerber files) για την υλοποίησή του.



Εικόνα 22 : Το Τυπωμένο Κύκλωμα Επέκτασης (pcb shield)

2.10 Επιλογή Υλικών και Προσομοίωση κυκλωμάτων

Η αναζήτηση και η επιλογή όλων των υλικών και εξαρτημάτων γίνεται μέσω των ιστοσελίδων της Digi-Key και Mouser Electronics. Πρόκειται για τους μεγαλύτερους διανομείς ηλεκτρονικών εξαρτημάτων σε επίπεδο πλακέτας. Διαθέτουν εμπλουτισμένες διαδικτυακές ιστοσελίδες, φιλικές προς το χρήστη με δυνατότητα επιλογής πολλών φίλτρων για αναζήτηση και τελικά εύρεση του βέλτιστου υλικού. Πραγματικό εργαλείο για κάθε ηλεκτρονικό μηχανικό.

Η προσομοίωση όλων των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και η επαλήθευση των τιμών των εξαρτημάτων που επιλέγονται, γίνεται με το πρόγραμμα TINA-Ti V.9 της Texas Instruments καθώς και χρήση της διαδικτυακής εφαρμογής που διαθέτει η ιστοσελίδα της “Analog Devices”.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

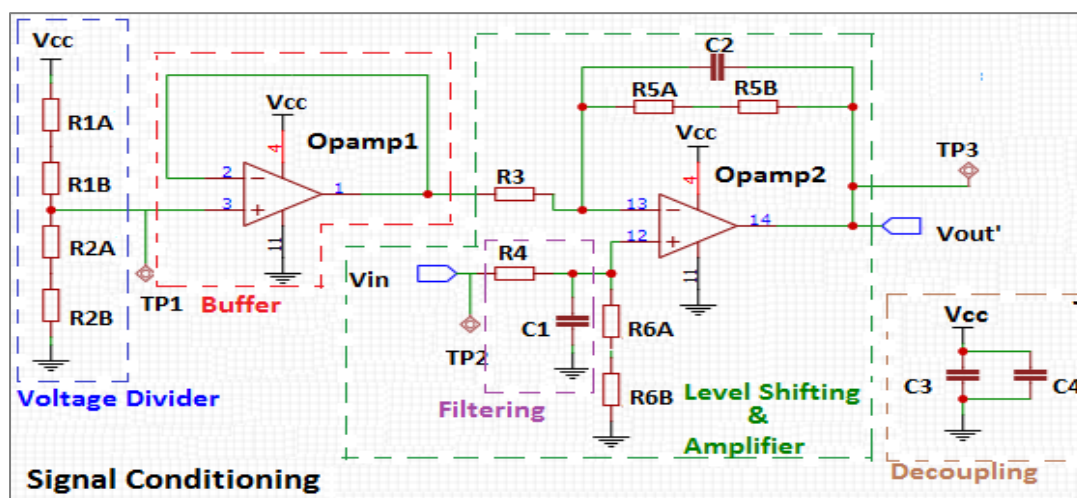
ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΑΝΑΛΟΓΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται η σχεδίαση του αναλογικού κυκλώματος, η ανάλυση και ο υπολογισμός όλων των εξαρτημάτων εκείνων που απαρτίζουν τα επιμέρους κυκλώματα οδήγησης των αισθητηρίων τάσεως και ρεύματος και που αφορούν και τα οκτώ (8) κανάλια εισόδων. Το κάθε κανάλι εισόδου έχει το δικό του αυτόνομο ηλεκτρικό κύκλωμα ρύθμισης σήματος (signal conditioning) όπου οι τιμές των εξαρτημάτων εξαρτώνται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε αισθητήρα που συνδέεται σ' αυτό. Η μεθοδολογία και η προσέγγιση όμως της σχεδίασης (σηματικό διάγραμμα), είναι κοινή και για τα οκτώ κανάλια, ανεξαρτήτως των αισθητηρίων που χρησιμοποιούνται και αναπτύσσεται παρακάτω. Τα Σηματικά Διαγράμματα της αναλογικής διάταξης παρουσιάζονται στο *Παράρτημα Β*.

Η καινοτομία της συγκεκριμένης εφαρμογής, όπως ειπώθηκε και στην εισαγωγή, έγκειται στη δυνατότητα διασύνδεσης και οδήγησης οποιουδήποτε αισθητήρα αναλογικής εξόδου, με ελάχιστες τροποποιήσεις του αναλογικού κυκλώματος, αλλαγές που αφορούν στις τιμές των αντιστάσεων και μόνο του κάθε καναλιού.

3.1 Βασικό Κύκλωμα Οδήγησης Αισθητηρίων (Signal Conditioning)

Στην *Εικόνα 23* παρουσιάζεται το τελικό σχηματικό κύκλωμα που προκύπτει από την σύμπτυξη των βασικών κυκλωμάτων που αναλύθηκαν στην Ενότητα 1.4, για την υλοποίηση των βαθμίδων “signal conditioning and filtering” του κάθε καναλιού οδήγησης αναλογικού αισθητήρα τάσεως ή ρεύματος.



Εικόνα 23: Κύκλωμα Οδήγησης Αναλογικών Αισθητηρίων

Το κυκλωματικό διάγραμμα αποτελείται από συνολικά 4 επιμέρους βαθμίδες [12], [19] :

- Έναν διαιρέτη τάσης (V_offset creator)
- Έναν Τ.Ε σε συνδεσμολογία απομονωτή (buffer)
- Έναν ακόμη Τ.Ε σε συνδεσμολογία διαφορικού ενισχυτή (level shifting & amplifier)
- Ένα φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων RC (anti-aliasing filter)

Στο παραπάνω κυκλωματικό, οι Αντιστάσεις $R1 (A,B)$ και $R2 (A,B)$ αποτελούν έναν διαιρέτη τάσης και ορίζουν το απαιτούμενο $Voffset$, τη τάση που αντιστοιχεί στο μέγιστο ή ελάχιστο μετρούμενο φυσικό μέγεθος του κάθε αισθητηρίου.

$$V_{offset} = \frac{(R2A + R2B)}{(R2A + R2B + R1A + R1B)} \times V_{cc}$$

Ο Τελεστικός Ενισχυτής $Opamp2$ σε συνδεσμολογία διαφορικού ενισχυτή μαζί με τις αντιστάσεις $R3, R4, R5 (A,B)$ και $R6 (A,B)$ συνθέτουν τη βαθμίδα “Level Shifting & Pre-Amplifier”. Η συγκεκριμένη διάταξη είναι υπεύθυνη για την αφαίρεση της τάσης V_offset από την μετρούμενη κάθε φορά τάση του αισθητηρίου $Vin = V_{sensor}$ (μετατόπιση του dc-offset) και ταυτόχρονα την ενίσχυση ή εξασθένηση του σήματος. Το κέρδος G (gain) της ενισχυτικής διάταξης θα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε στην έξοδό της, η μέγιστη τάση $Vout$ να μην ξεπερνά τη μέγιστη επιτρεπόμενη τάση που δέχεται στην είσοδό του ο χρησιμοποιούμενος ADC (στη προκειμένη περίπτωση 2,048 Volt).

Γίνεται επιλογή αντιστάσεων $R3 = R4, (R5A + R5B) = (R6A + R6B)$, οπότε το κέρδος (G) θα ισούται με :

$$G = \frac{(R5A + R5B)}{(R3)} = \frac{(R6A + R6B)}{(R4)} = \frac{Vout}{(Vin - Voffset)}$$

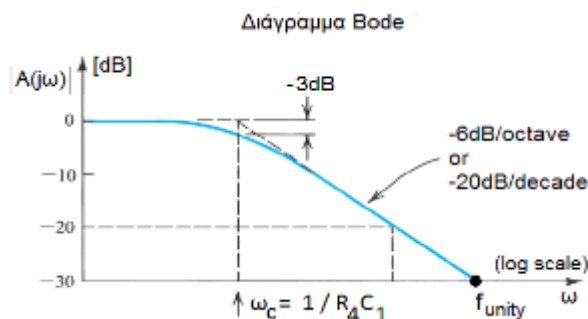
Ο Τελεστικός Ενισχυτής $Opamp1$ σε συνδεσμολογία “Buffer” συμβάλλει στη πλήρη απομόνωση της ρύθμισης της τάσης $Voffset$ από το υπόλοιπο κύκλωμα.

Τα παθητικά στοιχεία $R4, C1$ καθώς και $R3, C2$ δημιουργούν ένα χαμηλοπερατό φίλτρο συνθέτοντας τη βαθμίδα του “Anti-Aliasing Filter”. Η κρίσιμη συχνότητα αποκοπής του κυκλώματος πάνω από την οποία το κέρδος τάσης θα ελαττώνεται με ρυθμό 20dB ανά δεκάδα, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$f_c = \frac{1}{2 \times \pi \times R4 \times C1} = \frac{1}{2 \times \pi \times R3 \times C2}$$

Επειδή $R3 = R4$ συνεπάγεται ότι και :

$$C1 = C2$$



Εικόνα 24 : Απόκριση Βαθυπερατού Φίλτρου

Για την επαρκή λειτουργία του φίλτρου, η συχνότητα αποκοπής f_c επιλέγεται να είναι όσο το δυνατό χαμηλότερη, ώστε να εξασφαλίζεται επαρκή μείωση της τάσης θορύβου σε συχνότητες πλησίον της τάσης δικτύου. Επιλέγεται συχνότητα αποκοπής, κοινή για όλα τα κανάλια οδήγησης των αισθητήρων και ίση με : $f_c = 5\text{Hz}$.

Γίνεται η εξής επιλογή Αντιστάσεων :

$$R3 = R4 = 107k, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805\text{ SMD}$$

Οπότε :

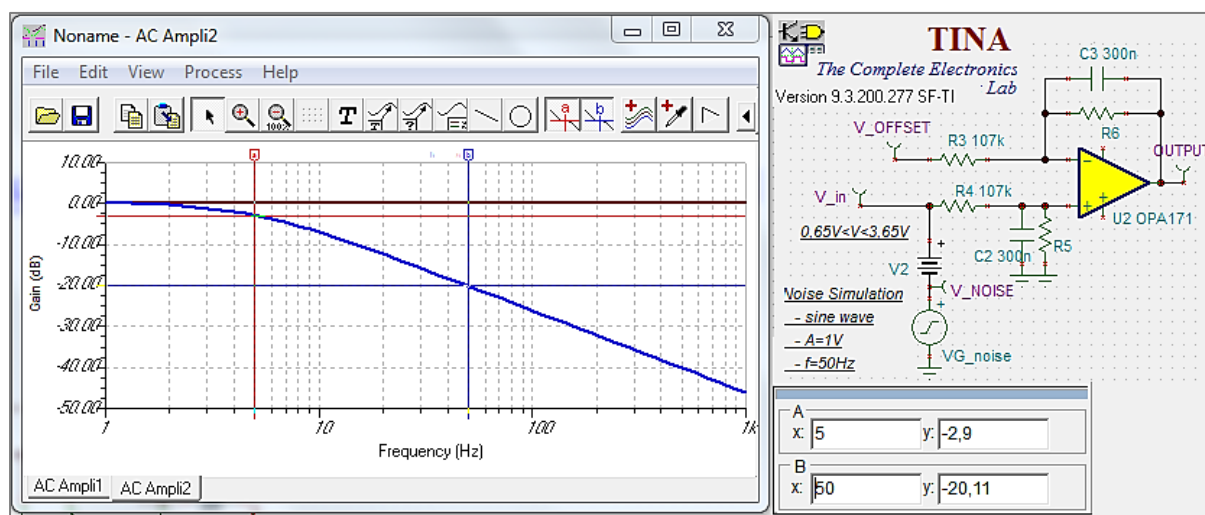
$$f_c = \frac{1}{2 \times \pi \times R4 \times C1} \rightarrow C1 = \frac{1}{2 \times \pi \times R4 \times f_c} \rightarrow C1 = 0,298\mu F$$

Από το εμπόριο επιλέγονται οι παρακάτω κεραμικοί πυκνωτές :

$$C1 = C2 = 330nF, \pm 10\%, 25V, 0805\text{ SMD X7R}$$

Οι παραπάνω τιμές του φίλτρου RC θα είναι κοινές και για τα οκτώ (8) κανάλια εισόδου.

Η επαλήθευση και προσομοίωση των παραπάνω τιμών γίνεται με το πρόγραμμα TINA-Ti V.9 της Texas Instruments. Για την πραγματοποίηση της AC Ανάλυσης, στην είσοδο της ενισχυτικής βαθμίδας, σε σειρά με την πηγή σταθερούς τάσης, τοποθετείται μια γεννήτρια ακουστικών συχνοτήτων παραγωγής ημιτονικής τάσης πλάτους 1Volt και συχνότητας 50Hz (συχνότητα δικτύου) παριστάνοντας την εισαγωγή ισχυρού θορύβου στην αναλογική διάταξη (Εικόνα25). Τα αποτελέσματα της AC Ανάλυσης φαίνονται στην Εικόνα που ακολουθεί όπου στη συχνότητα των 50Hz η εξασθένηση του σήματος είναι είσαι με -20,1dB. Για καλύτερα αποτελέσματα και γρηγορότερη απόκριση του φίλτρου, μετά την ενισχυτική διάταξη ακολουθεί βαθυπερατό φίλτρο Butterworth 3^{ης} τάξης, όπως αναλύεται στην Ενότητα 3.4.



Εικόνα 25 : Προσομοίωση Κυκλώματος οδήγησης Αισθητήρων Ρεύματος (Ac Analysis)

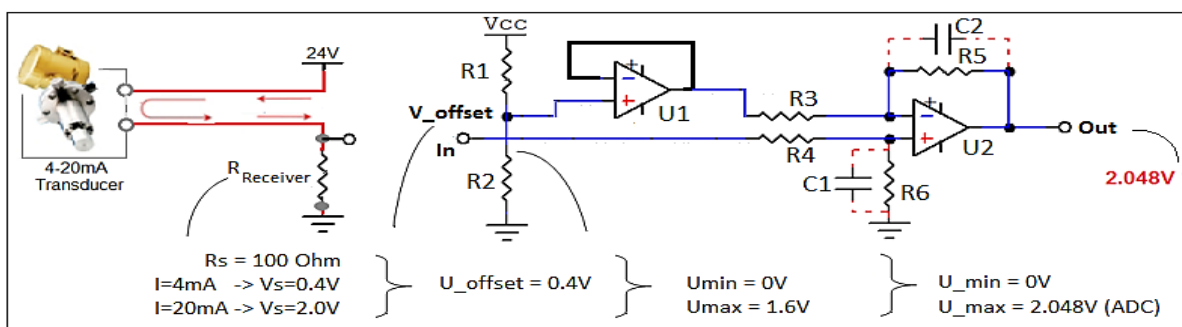
Επισημαίνεται ότι όπου απαιτείται μεγάλη ακρίβεια στους υπολογισμούς της αναλογικής διάταξης, όπως η ρύθμιση της τάσης Voffset και η ρύθμιση του Gain, έχει προβλεφθεί η θέση κάλυψης δύο αντιστάσεων εν σειρά ($R_x = R_{xA} + R_{xB}$) πάνω στο τυπωμένο κύκλωμα, έτσι ώστε να είναι δυνατή η επίτευξη της επιθυμητής τιμής με το άθροισμα των αντιστάσεων εκείνων που κυκλοφορούν στο εμπόριο. Στις περιπτώσεις όπου οι τιμές των αντιστάσεων που προκύπτουν από τους υπολογισμούς υφίστανται στην αγορά, τότε $R_{xA} = R_x$ και $R_{xB} = 0R$. Επιπλέον για μεγαλύτερη ακρίβεια όλες οι αντιστάσεις έχουν επιλεγεί με ανοχή $\pm 0,1\%$. Τέλος σε κάθε βαθμίδα έχουν τοποθετηθεί συνδετήρες ελέγχου (test points) που βοηθούν στην ανάπτυξη και αποσφαλμάτωση του κυκλώματος.

3.2 Υπολογισμός Στοιχείων Κυκλωμάτων Οδήγησης Αισθητήρων Ρεύματος

Δεδομένου ότι η λειτουργία μιας πολύ μεγάλης γκάμας αισθητηρίων υιοθετεί τη δημοφιλή τεχνική χρήσης μεταδοτών (driver) 4-20mA με όλα τα πλεονεκτήματα που αναλύθηκαν στην Ενότητα 1.3.2, αποφασίστηκε από τις οκτώ (8) αναλογικές θέσεις εισόδου οι τέσσερις (4) να αφορούν θέσεις οδήγησης αισθητήρων ρεύματος.

Οι μεταδότες 4-20mA χρησιμοποιούν ένα βρόχο ρεύματος 4-20mA. Το ρεύμα αυτό είναι ανάλογο της μετρούμενης φυσικής μεταβλητής του αισθητηρίου : τα 4mA αντιπροσωπεύουν τη χαμηλότερη μετρούμενη τιμή, ενώ τα 20mA αντιπροσωπεύουν την υψηλότερη τιμή [8]. Τα +24Volt παρέχουν την απαιτούμενη τάση για τη λειτουργία του κυκλώματος και παράγονται από τον μετατροπέα ISU0305S24 της XP Power (Ενότητα 2.6), ενώ η αντίσταση “δέκτη” $R_{Receiver}$ χρησιμοποιείται για την μετατροπή του μεταβαλλόμενου ρεύματος σε μεταβαλλόμενη τάση, με σκοπό την οδήγηση της τάσης αυτής στην αναλογική διάταξη ρύθμισης του αισθητήρα.

Στην *Εικόνα26* που ακολουθεί φαίνεται το αναλυτικό κυκλωματικό διάγραμμα που χρησιμοποιείται για κάθε κανάλι εισόδου αισθητήρα ρεύματος. Επειδή τα όρια μεταβολής του ρεύματος είναι συγκεκριμένα και κυμαίνονται από 4mA έως 20mA ανεξαρτήτως του αισθητήρα που έχει επιλεγεί, οι τιμές των εξαρτημάτων του ηλεκτρονικού κυκλώματος θα είναι κοινές και για τα τέσσερα (4) κανάλια αισθητηρίων ρεύματος.



Εικόνα 26 : ΗΝ Κύκλωμα οδήγησης Αισθητήρων Ρεύματος

Για την ορθότητα του κυκλώματος έχει επιλεγεί ο αισθητήρας πίεσης της Honeywell σειράς PX2 με εύρος μετρήσεων: από 1bar έως 50bar για θερμοκρασίες που κυμαίνονται $-40^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq +150^{\circ}\text{C}$. Πρόκειται για αισθητήρα βρόγχου ρεύματος 4-20mA, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οποίου παραθέτονται στην παρακάτω *Εικόνα* [22].

Heavy Duty Pressure Transducers

PX2 Series, 1 bar to 70 bar | 100 kPa to 7 MPa | 15 psi to 1000 psi

Honeywell

50069942

Issue I

Datasheet

CH Current: 4 mA to 20 mA



DESCRIPTION

Honeywell's PX2 Series Heavy Duty Pressure Transducers are a portfolio of configurable pressure sensors that use piezoresistive sensing technology with ASIC (Application Specific Integrated Circuit) signal conditioning in a stainless steel housing. The PX2 Series is fully calibrated and compensated for offset, sensitivity, temperature effects and non-linearity using the on-board ASIC. These transducers measure absolute, sealed gage, or vented gage pressure. The absolute versions have an internal vacuum reference and an output value proportional to absolute pressure, sealed gage versions have an internal pressure reference of one atmosphere at sea level, and vented gage versions measure pressure with respect to ambient pressure. They are RoHS compliant and are designed and manufactured according to ISO 9001 standards.

POTENTIAL APPLICATIONS

- Industrial: Refrigerant pressure monitoring in HVAC/R systems; air compressor system pressure
- Transportation: Air system monitoring; hydraulic oil pressure monitoring



Wire Color	Current Output
red	supply
blac	RTN



FEATURES

- Pressure range: 1 bar to 70 bar | 100 kPa to 7 MPa | 15 psi to 1000 psi
- Pressure reference: Absolute, sealed gage or vented gage
- Pressure port types: 7/16-20 UNF 1/4 in 45° Flare Female Schrader (SAE J512), 7/16-20 UNF 45° Flare Male (SAE J513), 7/16-20 UNF 37° Flare Male (SAE J514), G1/4 (ISO 1179-3), G1/8 (ISO 1179-3), M12 x 1.5 (ISO 6149-3), 1/4-18 NPT, 1/8-27 NPT, 9/16-18 UNF (SAE J1926-3), or 7/16-20 UNF (SAE J1926-3)
- Electrical connector types: Metri-Pack 150 (UL 94 HB or V-0 options), Micro M12, DIN, Deutsch, or cable harness (1 m, 2 m, 3 m, or 5 m)
- Total Error Band: $\pm 2.0\%$
- Operating and compensated temperature range: -40°C to 125°C [-40°F to 257°F]
- Response time: < 2 ms
- Life: Minimum of 10 million cycles to operating pressure
- Output transfer function: Ratiometric, regulated or current
- Mechanical shock rating: 100 G per MIL-STD-202F, Method 213B, Cond. F
- Vibration rating: 20 G sweep, 10 Hz to 2000 Hz
- Ingress protection: Up to IP69K
- Radiated immunity protection: Up to 100 V/m (ISO 11452-2)
- Flame retardant options: UL 94 HB standard on all electrical terminations; UL 94 V-0 available upon request

Table . Electrical Specifications

Characteristic	Current Output
	CH
Output transfer function ¹ :	
null output value	4 mA
full scale output value	4 mA
full scale span (FSS)	16 mA
operating supply voltage, min. (Vs) ²	8 V
operating supply voltage, typ. (Vs) ²	—
operating supply voltage, max. (Vs) ²	30 V ⁴
Supply current (typ.)	—
Operating temperature range ²	-40°C to 125°C
Offset error ⁶	$\pm 1\%$ FSS ¹
Accuracy ⁷	$\pm 0.25\%$ FSS ¹
Absolute voltage ratings ⁵ :	
minimum ⁵	-16 V
maximum ⁵	30 V
maximum applied to output pin (short circuit protection) ⁷	—

Εικόνα 27 : Τεχνικά Χαρακτηριστικά Αισθητήρα Πίεσης PX2 της Honeywell [22]

Γίνεται επιλογή αντίστασης του δέκτη $R_{Receiver}$:

$$\underline{R_{Receiver} = 100\ \Omega, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805\ SMD}$$

Με βάση τη συγκεκριμένη τιμή αντίστασης και δεδομένου ότι το ρεύμα που διέρχεται από αυτήν κυμαίνεται από $4\text{mA} \sim 20\text{mA}$, η πτώση τάσης που δημιουργείται στα άκρα της και που θα διαβάσει η αναλογική διάταξη (V_{in}) θα είναι με βάση το νόμο του Ohm μεταξύ $0.4V \sim 2V$. Η Ελάχιστη τάση αποτελεί και την τάση V_{offset} η οποία και θα πρέπει να αφαιρεθεί από την βαθμίδα μετατόπισης (level shifting).

- Υπολογισμός στοιχείων Διαιρέτη Τάσης :

Στο παραπάνω κυκλωματικό, οι Αντιστάσεις $R1$ και $R2$ αποτελούν έναν διαιρέτη τάσης και ορίζουν το απαιτούμενο V_{offset} .

$$V_{offset} = \frac{(R2)}{(R1 + R2)} \times V_{cc}$$

Με δεδομένο ότι $V_{cc} = +5\text{V}$ και θεωρώντας ότι το ρεύμα που διέρχεται από τις Αντιστάσεις είναι πολύ μικρό $I = 100\mu\text{A}$, η συνολική τιμή των αντιστάσεων θα είναι :

$$R_{ολ} = R1 + R2 = \frac{V_{cc}}{I} = \frac{5V}{100\mu\text{A}} = 50k\Omega \text{ και η αντίσταση } R2 \text{ θα ισούται με :}$$

$$R2 = \frac{V_{offset}}{I} = \frac{0.4V}{100\mu\text{A}} \rightarrow R2 = 4k\Omega$$

Γίνεται επιλογή των εξής αντιστάσεων $R2A + R2B = R2$

$$\underline{R2A = 1k, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805\ SMD} \text{ και } \underline{R2B = 3k, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805\ SMD}$$

Οπότε $R1 = R_{ολ} - R2 = 50k - 4k \rightarrow R1 = 46k\Omega$.

Επιλέγονται από το εμπόριο αντιστάσεις, ώστε $R1A + R1B = R1$

$$\underline{R1A = 22k, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805\ SMD} \text{ και } \underline{R1B = 24k, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805\ SMD}$$

- Υπολογισμός στοιχείων Ενισχυτικής Βαθμίδας :

Ορίζονται $R3 = R4$ και $R5 = R6$ οπότε το κέρδος (G) της ενισχυτικής διάταξης θα είναι:

$$G = \frac{R5}{R3} = \frac{R6}{R4} = \frac{V_{out_max}}{(V_{in} - V_{offset})} = \frac{2,048V}{(2V - 0,4V)} \rightarrow G = 1,28$$

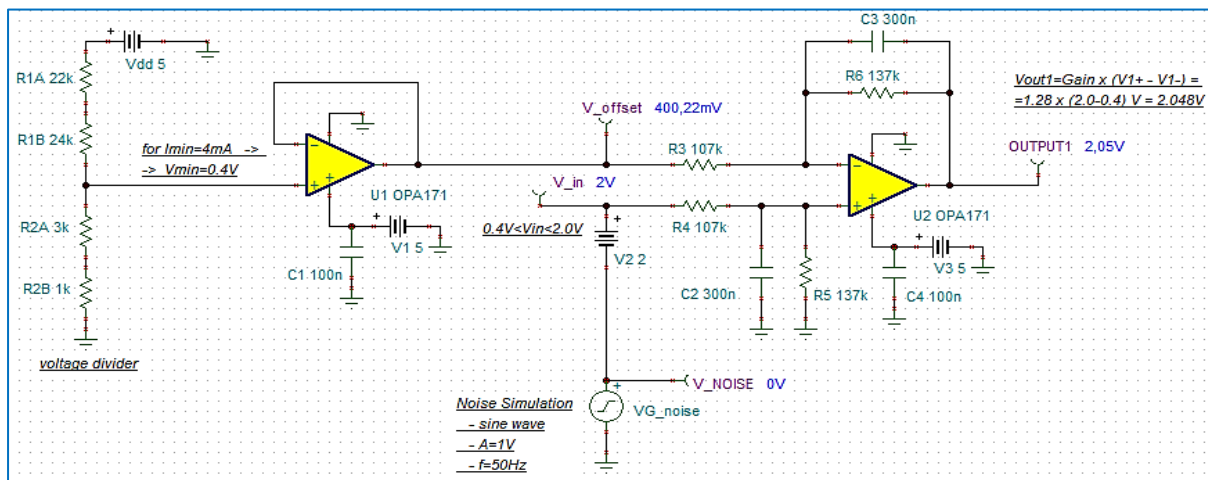
Γίνεται η εξής επιλογή Αντιστάσεων :

$$\underline{R3 = R4 = 107k, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805\ SMD}$$

Οπότε : $R5 = R6 = G \times R3 = 1,28 \times 107k \rightarrow R5 = R6 = 136,96k$ Επιλέγονται :

$$\underline{R5 = R6 = 137k, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805\ SMD}$$

Η επαλήθευση και προσομοίωση των παραπάνω τιμών γίνεται με το πρόγραμμα TINA-Ti V.9 της Texas Instruments και φαίνεται στην *Εικόνα28*.



Εικόνα 28 : Προσομοίωση Κυκλώματος οδήγησης Αισθητήρων Ρεύματος (Dc Analysis)

Με την DC Ανάλυση, παρατηρείται η επαλήθευση της κατάλληλης τάσης $V_{offset}=400mV$ και η παραγωγή της μέγιστης τάσης στην έξοδο της ενισχυτικής βαθμίδας, ίση με εκείνη του μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακού ADC ($V_{out}=2,05V$) για μέγιστη τάση εισόδου στα $V_{in}=2V$.

3.3 Υπολογισμός Στοιχείων Κυκλωμάτων Οδήγησης Αισθητήρων Τάσεως

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η λειτουργία μιας πολύ μεγάλης γκάμας αισθητηρίων βασίζεται στη παραγωγή ηλεκτρικού σήματος τάσης στην έξοδό τους με τη μεταβολή του φυσικού μεγέθους, ορίστηκε το σύστημα να έχει τη δυνατότητα συλλογής δεδομένων από τέσσερα (4) αισθητήρια τάσεως. Έτσι από τις οκτώ (8) συνολικά αναλογικές εισόδους (κανάλια) που διαθέτει το σύστημα, οι τέσσερις (4) αφορούν αισθητήρες οδήγησης τάσης και οι υπόλοιπες τέσσερις (4), θέσεις οδήγησης αισθητήρων ρεύματος.

Η λογική σχεδίασης των κυκλωμάτων ρύθμισης (signal conditioning) των εν λόγω αισθητηρίων είναι ακριβώς η ίδια. Βασική διαφοροποίηση-ιδιαιτερότητα; οι τιμές των εξαρτημάτων που απαρτίζουν το κύκλωμα οδήγησης του κάθε αισθητήρα τάσης δεν είναι κοινές για όλα τα κανάλια αλλά προκύπτουν κατόπιν μελέτης του εκάστοτε αισθητηρίου. Και αυτό γιατί το κάθε αισθητήριο αυτής της κατηγορίας, διαφέρει ως προς το εύρος του παραγόμενου σήματος τάσεως στην έξοδό του, ανεξαρτήτως του είδους μεταβολής του φυσικού του μεγέθους. Για το λόγο αυτό ο υπολογισμός των κυκλωμάτων γίνεται χωριστά για κάθε κανάλι και με βάση το αισθητήριο που θα συνδεθεί κάθε φορά.

Είναι αυτονόητο ότι αισθητήρες μέτρησης διαφορετικού φυσικού μεγέθους, αλλά με κοινό εύρος παραγόμενης τάσης στην έξοδό τους, μπορούν να κάνουν χρήση του ίδιου καναλιού, αφού οι προδιαγραφές για την σχεδίαση του αναλογικού κυκλώματος

οδήγησης είναι ακριβώς οι ίδιες (ίδια τάση V_{offset} , ίδιο κέρδος (gain) της ενισχυτικής διάταξης).

Στις παρακάτω επιμέρους ενότητες υπολογίζονται οι τιμές των εξαρτημάτων των κυκλωμάτων οδήγησης του κάθε καναλιού ξεχωριστά, με βάση τους αισθητήρες που έχουν επιλεγεί.

3.3.1 Στοιχεία υπολογισμού 1^{ου} Καναλιού Οδήγησης Αισθητήρων Τάσεως

Για τον υπολογισμό των στοιχείων του κυκλώματος οδήγησης αισθητήρα τάσεως του πρώτου καναλιού, γίνεται χρήση του αισθητήρα θερμοκρασίας NTC-1000 της εταιρίας Honeywell σειράς LTP, με εύρος μέτρησης θερμοκρασίας από -40°C έως $+150^{\circ}\text{C}$ [23], τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οποίου παραθέτονται στην *Εικόνα 29*.

Όπως φαίνεται στην ίδια εικόνα, για την οδήγηση του εν λόγω αισθητήρα, απαιτείται αρχικά η ύπαρξη μίας Pull-up αντίστασης. Θεωρώντας ότι το ρεύμα που διέρχεται από αυτή και κατ' επέκταση μέσα από το αισθητήριο είναι σχετικά μικρό:

$$I = 1\text{mA} < I_{MAX} = 10\text{mA} \text{ και για } V_{CC}=5\text{Volt, επιλέγεται τιμή αντίστασης :}$$

$$\underline{R_p = 4k7, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805 SMD}$$

Οποιαδήποτε ανιχνεύσιμη μεταβολή της θερμοκρασίας, προκαλεί μεταβολή της ωμικής αντίστασης του αισθητηρίου (αρχή λειτουργίας NTC), μεταβολή η οποία μπορεί να μεταφραστεί σε μεταβολή της τάσης στα άκρα του.

Έτσι με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου αισθητήρα με εύρος μέτρησης θερμοκρασίας $-40^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq +150^{\circ}\text{C}$, δημιουργείται μεταβολή της ωμικής του αντίστασης $19,31\Omega \leq R_{sen} \leq 33487,40k\Omega$ [23] και κατ' επέκταση μεταβολή της τάσης στα άκρα του $20,47\text{mV} \leq V_{sensor} \leq 4,38\text{V}$, όπως προκύπτει από τους παρακάτω υπολογισμούς.

Υπολογισμός εύρους μεταβολής εμφανιζόμενης Τάσης στα άκρα του Αισθητήρα NTC

1^η Περίπτωση :

$$\text{Για } \theta = +150^{\circ}\text{C} \rightarrow R_{S_{150}} = 19,310\Omega$$

$$I_{150} = \frac{V_{CC}}{R_p + R_{S_{150}}} = \frac{5\text{V}}{4k7 + 19,31} = 1,06\text{mA}$$

$$\text{Οπότε } V_{S_{150}} = I_{150} \times R_{S_{150}} = 20,47\text{mV}$$

2^η Περίπτωση :

$$\text{Για } \theta = -40^{\circ}\text{C} \rightarrow R_{S_{-40}} = 33,487k\Omega$$

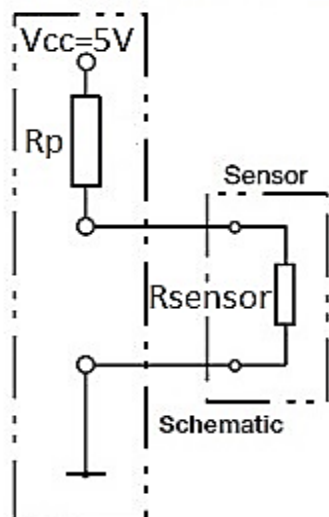
$$I_{-40} = \frac{V_{CC}}{R_p + R_{S_{-40}}} = \frac{5\text{V}}{4k7 + 33,487k} = 130,93\mu\text{A}$$

$$\text{Οπότε } V_{S_{-40}} = I_{-40} \times R_{S_{-40}} = 4,38\text{V}$$

Honeywell NTC THERMISTOR LTP -40 TO 150oC

Low Temperature Passive Probes Thermistor Curve

LTP Series LTP Series joins the R300 NTC thermistor sensor curves,



A NTC-1000 at 25 °C (3947 Beta 0 °C/100 °C)

Probe Tip Length
30 30 ±1,0 mm

LTPCTAA30UEBITX01

Typical voltages:
Power supply: Up = +5 ±0.1 Vdc (Depends on application system.)

Typical resistance:
Pull-up: Rp = precision resistor (±0.1% typical)



Notes:

1. Maximum current through the circuit: 10 mA
2. Self heating error needs to be considered and is additional to sensor basic accuracy

Table 1. Operating and Environmental Specifications

Characteristic	Parameter
Sensing element	NTC thermistor
Sensed media capability	engine coolant, engine oil, fuel, air, hydraulic oil, water
Response time (T63.2%)	less than 15 s in stirred silicon oil temperature step 25 °C to 85 °C [77 °F to 185 °F]
Current	10 mA max. (self heating)
Insulation resistance	>10 MOhm at 250 Vdc, 25 °C [77 °F]
Accuracy	±0.8 °C, 25 °C to 100 °C (See Table 3.)
Operating temperature range	-40 °C to 150 °C [-40 °F to 302 °F]
Operating pressure	10 bar max.
Burst pressure	40 bar max.
Compliance	RoHS, REACH

Table 2. Resistance vs Temperature Curve and Sensor Accuracy

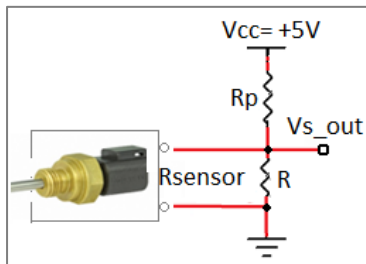
Thermistor Curve	Temperature (°C)	Resistance (Ohm)			Temperature Tolerance (°C)
		Minimum	Nominal	Maximum	
NTC-1000 at 25 °C (3947 Beta 0 °C/100 °C)	-40	28141.68	33487.40	38833.11	±2.5
	25	964.88	1000.0	1035.12	±0.8
	100	67.63	69.24	70.86	±0.8
	150	17.75	19.31	20.87	±3.5

Εικόνα 29: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Αισθητήρα NTC-1000 Honeywell [23]

Μέθοδος Γραμμικοποίησης Αισθητήρα θερμοκρασίας NTC [24]

Επειδή η τιμή της μέγιστης τάσης που εμφανίζεται στα άκρα του αισθητηρίου κατά τη μέτρηση της ελάχιστης θερμοκρασίας είναι αρκετά μεγάλη (4,38V) σε σχέση με την μέγιστη επιτρεπόμενη τάση εισόδου του μετατροπέα ADC (2,048V) και στη προσπάθεια γραμμικοποίησης των Αισθητήρων θερμοκρασίας NTC, παράλληλα με το αισθητήριο τοποθετείται μία αντίσταση R.

Έτσι το αρχικό κύκλωμα διαμορφώνεται όπως φαίνεται στην *Εικόνα30*.



Η αντίσταση που “βλέπει” η είσοδος της αναλογικής διάταξης είναι πλέον ο παραλληλισμός των αντιστάσεων : $R_{\text{sensor}} // R$.

Εικόνα 30 : Τεχνική Γραμμικοποίησης NTC

Για τον υπολογισμό της τιμής της αντίστασης R που θα πρέπει να τοποθετηθεί παράλληλα με τον αισθητήρα, λαμβάνεται υπόψη το χειρότερο σενάριο (worst case) : εκείνο όπου ο αισθητήρας διαρρέεται με το μέγιστο ρεύμα και αυτό συμβαίνει κατά τη μέτρηση της μέγιστης θερμοκρασίας $\theta = 150^{\circ}C$, όπου $I_{+150^{\circ}C} = 1,06mA$ (περίπτωση 1). Στη περίπτωση αυτή η μέγιστη επιθυμητή τάση στα άκρα του αισθητήρα θα πρέπει να είναι :

$$V_{S'_{-40}} = V_{ADC} + V_{offset} = 2,048V + 20,47mV = 2,0685V. \text{ Όμως :}$$

$$V_{S'_{-40}} = I_{\max} \times R_{\text{ολ}} \rightarrow R_{\text{ολ}} = \frac{V_{S_{-40}}}{I_{\max}} = \frac{2,069V}{1,06mA} \rightarrow R_{\text{ολ}} = 1,952k\Omega$$

Επειδή

$$R_{\text{ολ}} = R_p + R_{\text{ολ}'} = R_p + \frac{R_{S_{-40}} \times R}{(R_{S_{-40}} + R)} \rightarrow R = \frac{R_{\text{ολ}} \times R_{S_{-40}}}{(R_{S_{-40}} - R_{\text{ολ}})} \rightarrow R = 2,073k\Omega$$

επιλέγεται τιμή αντίστασης : $R = 2k1, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805 SMD$

Επαναπροσδιορισμός μετρήσεων λαμβάνοντας υπόψη και την αντίσταση R :

1^η Περίπτωση :

$$- \theta = +150^{\circ}C \rightarrow R_{S_{150}} = 19,310\Omega$$

$$- V_{S_{+150}} = (R_{S_{150}} // R) \times I_{150} \approx R_{S_{150}} \times I_{150}$$

$$I_{150} = \frac{V_{cc}}{R_p + (R_{S_{150}} // R)} = \frac{5V}{R_p + R_{S_{150}}} \rightarrow$$

$$I_{150} = 1,06mA \text{ Οπότε :}$$

$$V_{S_{150}} = R_{S_{150}} \times I_{150} = 20,45mV$$

2^η Περίπτωση :

$$- \theta = -40^{\circ}C \rightarrow R_{S_{-40}} = 33,487k\Omega$$

$$- V_{S_{-40}} = (R_{S_{-40}} // R) \times I_{-40} \approx R \times I_{-40}$$

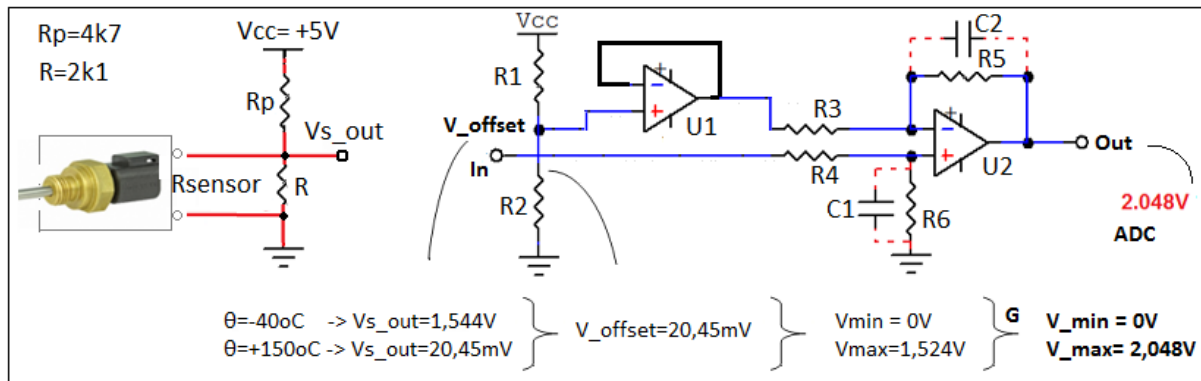
$$I_{-40} = \frac{V_{cc}}{R_p + (R_{S_{-40}} // R)} = \frac{5V}{R_p + R} \rightarrow$$

$$I_{-40} = 0,74mA \text{ Οπότε :}$$

$$V_{S_{-40}} = R_{S_{-40}} \times I_{-40} = 1,544V$$

Κυκλωματικό Σχηματικό Διάγραμμα Οδήγησης Αισθητήρα NTC

Στην *Εικόνα* που ακολουθεί φαίνεται το αναλυτικό κυκλωματικό διάγραμμα που χρησιμοποιείται για την οδήγηση ενός αισθητήρα θερμοκρασίας NTC.



Εικόνα 31 : ΗΝ Κύκλωμα οδήγησης Αισθητήρων Θερμοκρασίας NTC

Με την προσθήκη της αντίστασης R παράλληλα στον αισθητήρα, η μεταβολή της τάσης στα άκρα του διαμορφώνεται από $20,45mV \leq V_{sensor} \leq 1,54V$. Η Ελάχιστη τάση αποτελεί και την τάση V_{offset} η οποία και θα πρέπει να αφαιρεθεί από την βαθμίδα μετατόπισης (level shifting).

- Υπολογισμός στοιχείων Διαιρέτη Τάσης :

Στο παραπάνω κυκλωματικό, οι Αντιστάσεις $R1$ και $R2$ αποτελούν έναν διαιρέτη τάσης και ορίζουν το απαιτούμενο V_{offset} .

$$V_{offset} = \frac{(R2)}{(R1 + R2)} \times V_{cc}$$

Με δεδομένο ότι $V_{cc}=+5V$ και θεωρώντας ότι το ρεύμα που διέρχεται από τις Αντιστάσεις είναι πολύ μικρό $I=100\mu A$, η συνολική τιμή των αντιστάσεων θα είναι :

$$R_{ολ} = R1 + R2 = \frac{V_{cc}}{I} = \frac{5V}{100\mu A} = 50k\Omega \text{ και η αντίσταση } R2 \text{ θα ισούται με :}$$

$$R2 = \frac{V_{offset}}{I} = \frac{20,45mV}{100\mu A} \rightarrow R2 = 204,5\Omega$$

Γίνεται επιλογή αντίστασης :

$$\underline{R2 = 200\ \Omega, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805\ SMD}$$

$$\text{Οπότε } R1 = R_{ολ} - R2 \rightarrow R1 = 48k7.$$

Επιλέγονται αντιστάσεις $R1A+R1B=R1$

$$\underline{R1A = 47k, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805\ SMD} \quad \text{και}$$

$$\underline{R1B = 1k6, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805\ SMD}$$

- Υπολογισμός στοιχείων Ενισχυτικής Βαθμίδας:

Ορίζονται $R3 = R4$ και $R5 = R6$ οπότε το κέρδος (G) της ενισχυτικής διάταξης θα είναι:

$$G = \frac{R5}{R3} = \frac{R6}{R4} = \frac{V_{out_max}}{(V_{in} - V_{offset})} = \frac{2,048V}{(1,544V - 20,45mV)} \rightarrow G = 1,344$$

Γίνεται η εξής επιλογή Αντιστάσεων :

$$\underline{R3 = R4 = 107k, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805 SMD}$$

Οπότε : $R5 = R6 = G \times R3 = 1,344 \times 107k \rightarrow R5 = R6 = 143,786k$ Επιλέγονται :

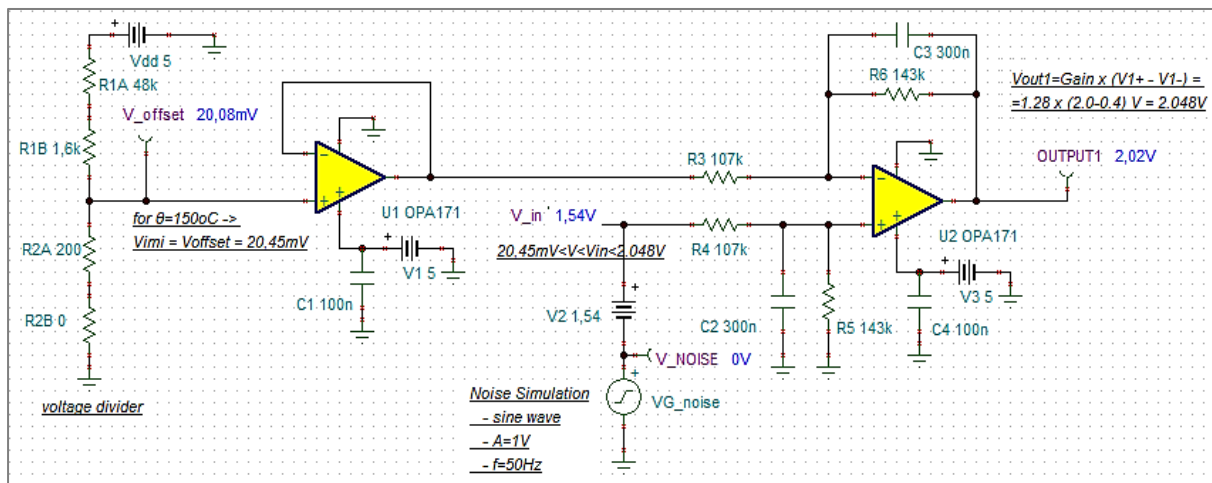
$$\underline{R5A = R6A = 143k, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805 SMD}$$
 και

$$\underline{R5B = R6B = 787, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805 SMD}$$

ώστε $R5A+R5B=R5=R6=R6A+R6B$

- Προσομοίωση κυκλώματος οδήγησης Αισθητήρα NTC:

Η επαλήθευση και προσομοίωση των παραπάνω τιμών γίνεται με το πρόγραμμα TINA-Ti V.9 της Texas Instruments και φαίνεται στην *Εικόνα32*.



Εικόνα 32 : Προσομοίωση Κυκλώματος οδήγησης Αισθητήρα θερμοκρασίας NTC (Dc Analysis)

Με την DC Ανάλυση παρατηρείται η επαλήθευση της κατάλληλης τάσης $V_{offset}=20,08mV$ και η παραγωγή της μέγιστης τάσης στην έξοδο της ενισχυτικής βαθμίδας ίση με εκείνη του μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακού ADC ($V_{out}=2,05V$) για μέγιστη τάση εισόδου στα $V_{in}=1,544V$ (πηγή συνεχούς τάσης στην είσοδο).

3.3.2 Στοιχεία υπολογισμού 2^{ου} Καναλιού Οδήγησης Αισθητήρων Τάσεως

Για τον υπολογισμό των στοιχείων του κυκλώματος του δεύτερου καναλιού οδήγησης αισθητήρα τάσεως, γίνεται χρήση του αισθητήρα μέτρησης απόστασης GP2Y0A60SZ0F της εταιρίας SHARP, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οποίου καταγράφονται στην παρακάτω *Εικόνα*.

Οποιαδήποτε μεταβολή της απόστασης, συνεπάγεται μεταβολή της τάσης στους ακροδέκτες εξόδου του αισθητηρίου. Έτσι, για τάση τροφοδοσίας +5V και δυνατότητα μέτρησης απόστασης $10\text{cm} \leq d \leq 150\text{cm}$, εμφανίζεται μεταβολή της τάσης εξόδου $3,65\text{V} \geq V_{\text{sensor}} \geq 0,65\text{V}$ [25].

SHARP
GP2Y0A60SZ0F/GP2Y0A60SZLF

GP2Y0A60SZ0F GP2Y0A60SZLF

■ Description

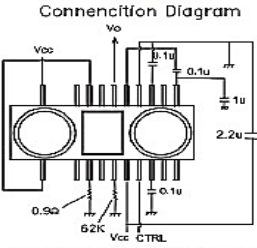

GP2Y0A60SZ0F/GP2Y0A60SZLF is a distance measuring sensor unit, composed of an integrated combination of PSD (position sensitive detector), IR-LED (infrared emitting diode) and signal processing circuit.

The variety of the reflectivity of the object, the environmental temperature and the operating duration are not influenced easily to the distance detection because of adopting the triangulation method.

This device outputs the voltage corresponding to the detection distance. So this sensor can also be used as a proximity sensor.

Distance Measuring Sensor Unit
Measuring distance : 10 to 150 cm
Analog output type

Connnection Diagram

Above connection is the case of Vcc = 3V.
In the case of Vcc=5V, terminal No.4 is connected to GND.

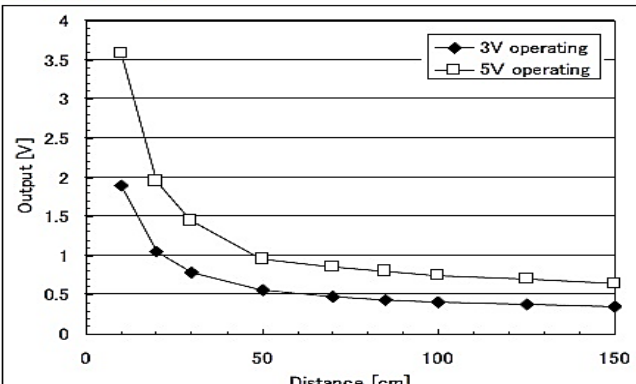
■ Recommended operating conditions

Parameter	Symbol	Rating	Unit	Remark
Supply voltage	Vcc	4.5 to 5.5	V	5V
Supply voltage	Vcc	2.7 to 3.6	V	3V
Operating temperature	Topr	-10 to +60	°C	-

Parameter	Symbol	Conditions	MIN.	TYP.	MAX.	Unit
Measuring distance range	ΔL	(Note 1)	10	-	150	cm
			(Ta=25°C, Vcc=3V)			
Output terminal voltage	V _o	L=150cm (Note 1)	0.05	0.35	0.65	V
Output voltage difference	ΔV_o	Output change at L change (10cm → 150cm) (Note 1)	1.35	1.60	1.85	V

Parameter	Symbol	Conditions	MIN.	TYP.	MAX.	Unit
Measuring distance range	ΔL	(Note 1)	10	-	150	cm
			(Ta=25°C, Vcc=5V)			
Output terminal voltage	V _o	L=150cm (Note 1)	0.15	0.65	1.15	V
Output voltage difference	ΔV_o	Output change at L change (10cm → 150cm) (Note 1)	2.75	3.00	3.25	V
Average supply current	I _{cc1}	Vcc=5V, V _{CTRL} =5V	-	33	50	mA
Stand-by supply current	I _{cc2}	Vcc=5V, V _{CTRL} =0V	-	-	5	μA

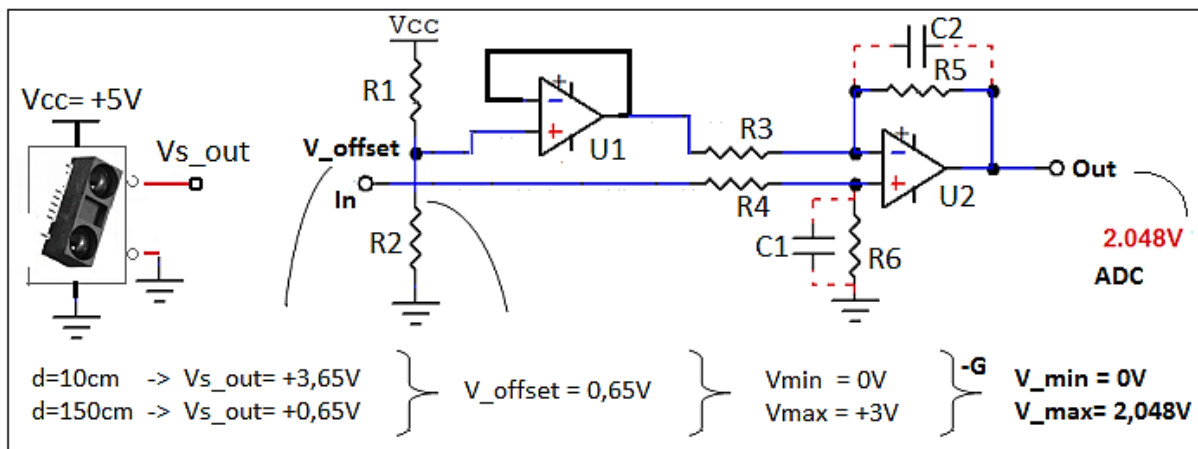
■ Supplements



Distance [cm]	Output Voltage	
	Vcc = 3V	Vcc = 5V
10	1,95	3,65
20	1,05	1,95
30	0,8	1,45
40	0,7	1,2
50	0,6	0,95
70	0,45	0,9
125	0,35	0,75
150	0,3	0,65

Εικόνα 33 : Τεχνικά Χαρακτηριστικά Αισθητήρα Απόστασης Sharp [25]

Στην *Εικόνα34* φαίνεται το αναλυτικό κυκλωματικό διάγραμμα που χρησιμοποιείται για την οδήγηση του εν λόγω αισθητήρα μέτρησης απόστασης.



Εικόνα 34 : HN Κύκλωμα οδήγησης Αισθητήρα Μέτρησης Απόστασης Sharp

Η μεταβολή της τάσης στα άκρα του αισθητήριου διαμορφώνεται από $0,65\text{V} \leq V_{\text{sensor}} \leq 3,65\text{V}$. Η Ελάχιστη τάση των $0,65\text{V}$ αποτελεί και την τάση *Voffset* η οποία και θα πρέπει να αφαιρεθεί από την βαθμίδα μετατόπισης (level shifting).

- Υπολογισμός στοιχείων Διαιρέτη Τάσης :

Στο παραπάνω κυκλωματικό, οι Αντιστάσεις *R1* και *R2* αποτελούν έναν διαιρέτη τάσης και ορίζουν το απαιτούμενο *Voffset*.

$$V_{\text{offset}} = \frac{(R2)}{(R1 + R2)} \times V_{\text{cc}}$$

Με δεδομένο ότι $V_{\text{cc}}=+5\text{Volt}$ και θεωρώντας ότι το ρεύμα που διέρχεται από τις Αντιστάσεις είναι πολύ μικρό $I=10\mu\text{A}$, η συνολική τιμή των αντιστάσεων θα είναι :

$$R_{\text{ολ}} = R1 + R2 = \frac{V_{\text{cc}}}{I} = \frac{5\text{V}}{10\mu\text{A}} = 500\text{k}\Omega \text{ και η αντίσταση } R2 \text{ θα ισούται με :}$$

$$R2 = \frac{V_{\text{offset}}}{I} = \frac{0,65\text{V}}{10\mu\text{A}} \rightarrow R2 = 65\text{k}\Omega$$

Γίνεται επιλογή αντιστάσεων έτσι ώστε $R2A+R2B=R2$:

$$\underline{R2A = 64\text{k}9, \pm 0.1\%, 1/8\text{W}, 0805\text{ SMD}} \text{ και } \underline{R2B = 1\text{k}6, \pm 0.1\%, 1/8\text{W}, 0805\text{ SMD}}$$

$$\text{Οπότε } R1 = R_{\text{ολ}} - R2 \rightarrow R1 = 435\text{k}.$$

Επιλέγονται αντιστάσεις $R1A+R1B=R1$

$$\underline{R1A = 215\text{k}, \pm 0.1\%, 1/8\text{W}, 0805\text{ SMD}} \text{ και}$$

$$\underline{R1B = 220\text{k}, \pm 0.1\%, 1/8\text{W}, 0805\text{ SMD}}$$

- Υπολογισμός στοιχείων Ενισχυτικής Βαθμίδος :

Παρατηρείται επίσης ότι η τιμή της μέγιστης τάσης που εμφανίζεται στα άκρα του αισθητηρίου κατά τη μέτρηση της μέγιστης απόστασης (3,65V) είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη επιτρεπόμενη τάση εισόδου του μετατροπέα ADC (2,048V). Για το λόγο αυτό το κέρδος της ενισχυτικής βαθμίδος θα είναι μικρότερος της μονάδας (εξασθένηση).

Ορίζονται $R3 = R4$ και $R5 = R6$ οπότε το κέρδος (G) της ενισχυτικής διάταξης θα είναι:

$$G = \frac{R5}{R3} = \frac{R6}{R4} = \frac{V_{out_max}}{(V_{in} - V_{offset})} = \frac{2,048V}{(3,65V - 0,65V)} \rightarrow G = 0,683$$

Γίνεται η εξής επιλογή Αντιστάσεων :

$$\underline{R3 = R4 = 107k, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805 SMD}$$

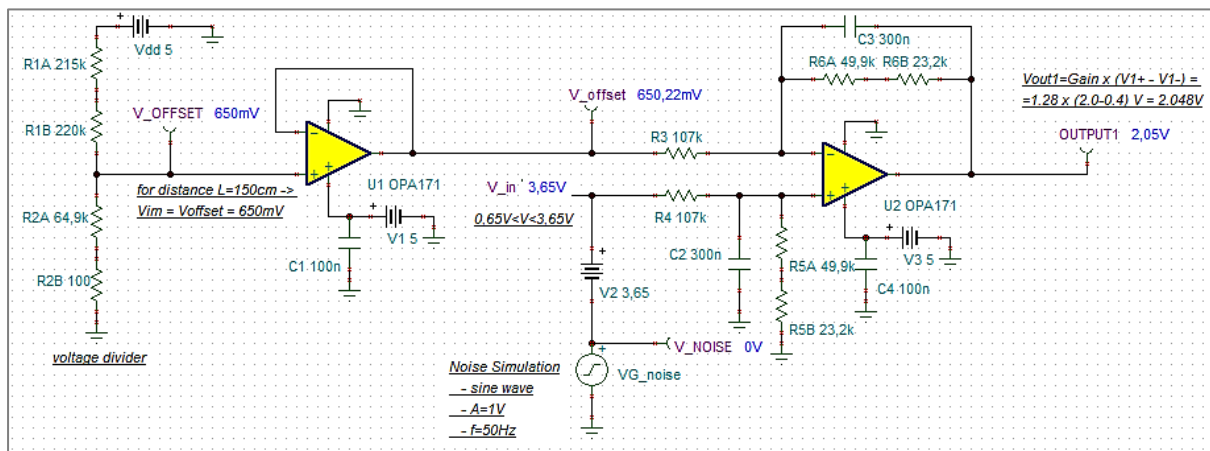
Οπότε : $R5 = R6 = G \times R3 = 0,683 \times 107k \rightarrow R5 = R6 = 73k081$ Επιλέγονται :

$$\underline{R5A = R6A = 49k9, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805 SMD} \quad \text{και}$$

$$\underline{R5B = R6B = 23k2, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805 SMD} \quad \text{ώστε } R5A+R5B=R5=R6=R6A+R6B$$

- Προσομοίωση κυκλώματος οδήγησης Αισθητήρα Απόστασης :

Η επαλήθευση και προσομοίωση των παραπάνω τιμών γίνεται με το πρόγραμμα TINA-Ti V.9 της Texas Instruments και φαίνεται στην *Εικόνα35*.




Εικόνα 35 : Προσομοίωση Κυκλώματος οδήγησης Αισθητήρα θερμοκρασίας NTC (Dc Analysis)


Με την DC Ανάλυση παρατηρείται η δημιουργία της κατάλληλης τάσης $V_{offset}=0,65V$ και η παραγωγή της μέγιστης τάσης στην έξοδο της ενισχυτικής βαθμίδας ίση με εκείνη του μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακού ADC ($V_{out}=2,05V$) για μέγιστη τάση εισόδου στα $V_{in}=3,65V$.

3.3.3 Στοιχεία υπολογισμού 3ου Καναλιού Οδήγησης Αισθητήρων Τάσεως

Οι υπολογισμοί των κυκλωμάτων του τρίτου και του τέταρτου καναλιού γίνονται με βάση τον αισθητήρα μέτρησης θερμοκρασίας RTD της εταιρίας Sensata PT-200 σειράς DARTs, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάζονται παρακάτω.



DARTS | SERIES
TEMPERATURE SENSOR PROBES



DARTS200-Ds

Introduction

The DARTS series is a line of thin film platinum RTD based temperature sensors ideal for demanding air conditioning, refrigeration and industrial applications where long term reliability is a must. Each configuration is specifically designed to optimize cost, robustness, and high absolute accuracy.

Specifications

SENSOR FAMILY	DARTS200-Ds
SENSOR ELEMENT	PT-200 platinum RTD
NOMINAL RESISTANCE	200Ω at 0°C
TEMPERATURE RANGE	Continuous: -40°C to 850°C Peak: 900°C
ACCURACY	±2.5% from -40°C to 280°C ±0.9% from 280°C to 850°C
RESPONSE TIME T63	<11 seconds at 300°C, air velocity of 11m/s <6.5 seconds at 300°C, air velocity of 70m/s
INSULATION RESISTANCE	>1MΩ at 20°C, VDC 500 Volt
FASTENING	Mounting Nut
CONNECTOR	Cable with connector chosen by customer

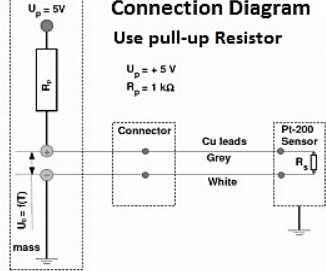
Features

- Available Metric and English Mounting Threads
- Thin Film Platinum temperature sensors displaying high linearity
- Flexibility in insertion depth: 25mm, 35mm, 40mm, 50mm, 70mm
- Straight and bended configurations for rear housing, 0° to 120° to facilitate installation on the engine

Applications

- Industrial Exhaust Gas
- HVAC
- Industrial
- Rugged immersion and air temperature sensing

RTD circuit to MCU



Connection Diagram
Use pull-up Resistor

$U_p = +5V$
 $R_p = 1k\Omega$

Pull-Up Voltage	$U_p = +5V \pm 0.1\%$
Pull-Up Resistance	$R_p = 1k\Omega \pm 0.1\%$
A/D Converter Accuracy	10 bit
Polarity	Signal: Grey Ground: White
Operational Current	Between 2.7mA and 4.2mA

(Same methodology applies for other voltage systems (e.g. 3.3V), but operational current must be lower than 5mA)

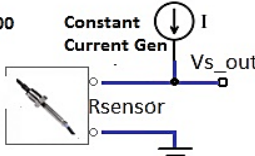
T (°C)	Rs (Ω)	U0 (V)	T (°C)	Rs (Ω)	U0 (V)
-40	169.7	0.725	400	488.1	1.640
0	200.5	0.835	500	554.1	1.783
25	219.6	0.900	600	617.8	1.909
50	238.5	0.963	700	679.2	2.022
100	275.9	1.081	800	738.2	2.123
200	349.0	1.293	850	766.8	2.170
300	419.7	1.478			

$R_s = R_l + R_0(1 + \alpha T + \beta T^2)$
 $\alpha = 3.8285 \cdot 10^{-3}$
 $\beta = -5.85 \cdot 10^{-7}$

Position	Temperature
A (Tip)	850 °C
B (Flange)	625 °C
C (Rearhousing)	260 °C
D (Cable Seal)	180 °C

Use Constant Current 3.3mA for RTD SENSOR TEMPERATURE PT200

Vss = 5 oC	I [mA] = 3.3mA		I [mA] 2.7 - 4.2	
	Rs [Ω]	Vsensor	Rs [Ω]	Vsensor
-40	169.7	3,300 560,010 mV	4,275	725,400 mV
+200	349	3,300 1151,700 mV	3,706	1293,551 mV
+850	766.8	3,300 2530,440 mV	2,830	2170,025 mV



Constant Current Gen

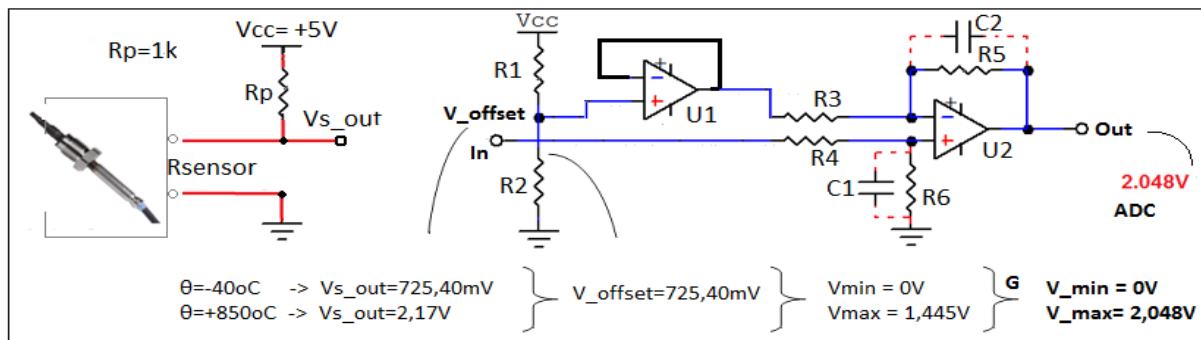
Εικόνα 36 : Τεχνικά Χαρακτηριστικά Αισθητήρα Θερμοκρασίας PT-200 της Sensata [26]

Οι αισθητήρες θερμοκρασίας αυτής της τεχνολογίας μπορούν γενικά να οδηγηθούν στην αναλογική διάταξη με δύο τρόπους, ανάλογα με τη πρόταση του εκάστοτε κατασκευαστή: χρήση αντίστασης pull-up ή χρήση πηγής σταθερού ρεύματος.

Ο μεν πρώτος τρόπος αποτελεί έναν κλασικό τρόπο οδήγησης, όπου οποιαδήποτε μεταβολή της θερμοκρασίας, προκαλεί αλλαγή της ωμικής αντίστασης του αισθητηρίου (αρχή λειτουργίας RTD), αλλαγή η οποία μεταφράζεται σε μεταβολή της τάσης στα άκρα

του. Ο δεύτερος τρόπος κάνει χρήση πηγής παροχής σταθερού ρεύματος και βασίζεται στη μέτρηση της πτώσης τάσης στα άκρα του αισθητηρίου όταν αυτό διαρρέεται από ρεύμα σταθερής τιμής.

Στην *Εικόνα37* φαίνεται το κυκλωματικό διάγραμμα για την οδήγηση του αισθητήρα θερμοκρασίας RTD PT-200 της Sensata με χρήση Pull-up Αντίστασης.



Εικόνα 37: ΗΝ Κύκλωμα οδήγησης Αισθητήρα θερμοκρασίας RTD – χρήση pull-up αντίστασης

Με δυνατότητα εύρος μέτρησης θερμοκρασίας $-40oC \leq \theta \leq +850oC$, η μεταβολή της τάσης στα άκρα του αισθητηρίου διαμορφώνεται από $725,40mV \leq V_{sensor} \leq 2,17V$ [26]. Η τάση των 725,40mV αποτελεί και την τάση *Voffset* η οποία και θα πρέπει να αφαιρεθεί από την βαθμίδα μετατόπισης (level shifting).

- Υπολογισμός στοιχείων Διαιρέτη Τάσης :

Στο παραπάνω κυκλωματικό, οι Αντιστάσεις *R1* και *R2* αποτελούν έναν διαιρέτη τάσης και ορίζουν το απαιτούμενο *Voffset*.

$$V_{offset} = \frac{(R2)}{(R1 + R2)} \times V_{cc}$$

Με δεδομένο ότι $V_{cc} = +5V$ και θεωρώντας ότι το ρεύμα που διέρχεται από τις Αντιστάσεις είναι πολύ μικρό $I = 10\mu A$, η συνολική τιμή των αντιστάσεων θα είναι :

$$R_{ολ} = R1 + R2 = \frac{V_{cc}}{I} = \frac{5V}{10\mu A} = 500k\Omega \text{ και η αντίσταση } R2 \text{ θα ισούται με :}$$

$$R2 = \frac{V_{offset}}{I} = \frac{725,40mV}{10\mu A} \rightarrow R2 = 72,54k\Omega$$

Γίνεται επιλογή αντιστάσεων έτσι ώστε $R2A + R2B = R2$:

$$\underline{R2A = 71k5, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805 SMD} \text{ και } \underline{R2B = 1k04, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805 SMD}$$

$$\text{Οπότε } R1 = R_{ολ} - R2 \rightarrow R1 = 427,46k.$$

Επιλέγονται αντιστάσεις $R1A + R1B = R1$

$$\underline{R1A = 422k, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805 SMD} \text{ και } \underline{R1B = 5k49, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805 SMD}$$

- Υπολογισμός στοιχείων Ενισχυτικής Βαθμίδας:

Ορίζονται $R3 = R4$ και $R5 = R6$ οπότε το κέρδος (G) της ενισχυτικής διάταξης θα είναι:

$$G = \frac{R5}{R3} = \frac{R6}{R4} = \frac{V_{out_max}}{(V_{in} - V_{offset})} = \frac{2,048V}{(2,17V - 0,725V)} \rightarrow G = 1,418$$

Γίνεται η εξής επιλογή Αντιστάσεων :

$$\underline{R3 = R4 = 107k, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805 SMD}$$

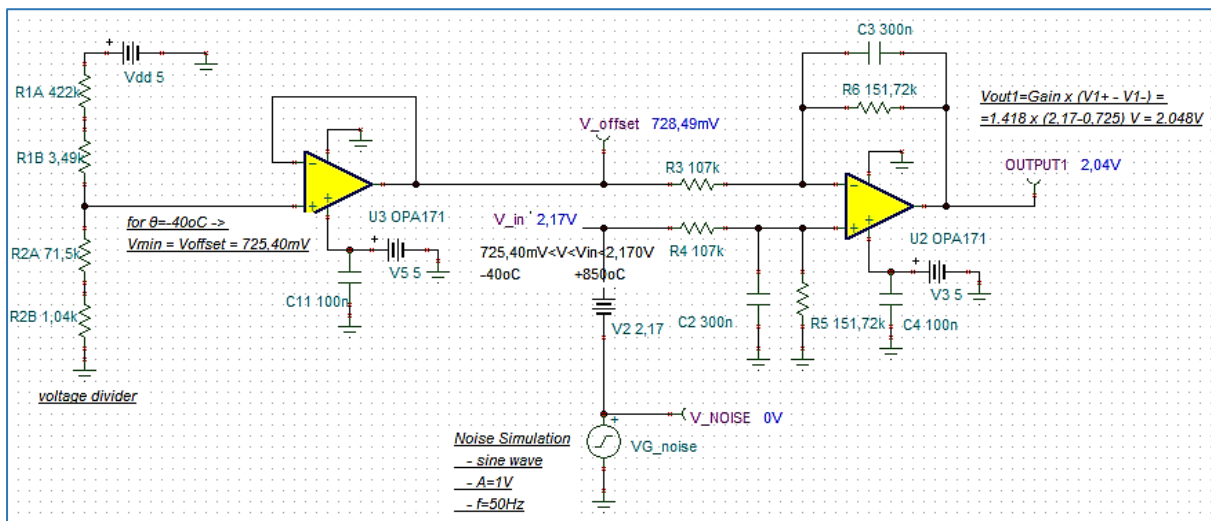
Οπότε : $R5 = R6 = G \times R3 = 1,418 \times 107k \rightarrow R5 = R6 = 151k726$ Επιλέγονται :

$$\underline{R5A = R6A = 150k, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805 SMD}$$
 και

$$\underline{R5B = R6B = 1k72, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805 SMD}$$
 ώστε $R5A+R5B=R5=R6=R6A+R6B$

- Προσομοίωση κυκλώματος οδήγησης Αισθητήρα RTD (χρήση pull-up):

Η επαλήθευση και προσομοίωση των παραπάνω τιμών γίνεται με το πρόγραμμα TINA-Ti V.9 της Texas Instruments και φαίνεται στην *Εικόνα* που ακολουθεί.



Εικόνα 38 : Προσομοίωση Κυκλώματος οδήγησης Αισθητήρα θερμοκρασίας RTD (Dc Analysis) – χρήση pull-up αντίστασης

Με την DC Ανάλυση παρατηρείται η δημιουργία κατάλληλης τάσης $V_{offset}=728mV$ και η παραγωγή της μέγιστης τάσης στην έξοδο της ενισχυτικής βαθμίδας ίση με εκείνη του μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακού ADC ($V_{out}=2,05V$) για μέγιστη τάση εισόδου στα άκρα του αισθητηρίου ίση με $V_{in}=2,17V$.

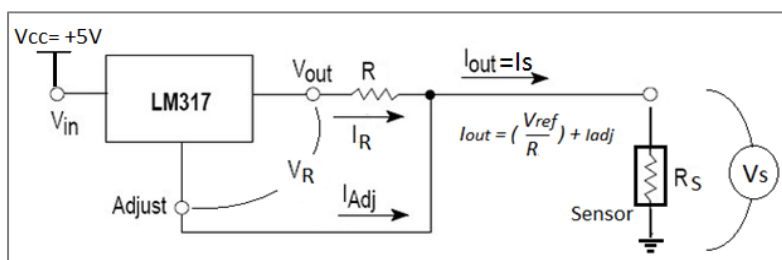
3.3.4 Στοιχεία υπολογισμού 4^{ου} Καναλιού Οδήγησης Αισθητήρων Τάσεως

Για την λειτουργία των αισθητήρων θερμοκρασίας τεχνολογίας RTD, πολλές φορές προτείνεται η χρήση πηγής παροχής σταθερού ρεύματος. Η εν λόγω τεχνική βασίζεται στη μέτρηση της πτώσης τάσης στα άκρα του αισθητηρίου όταν αυτό διαρρέεται από σταθερό ρεύμα. Ένα κύκλωμα πηγής σταθερού ρεύματος μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί με χρήση του σταθεροποιητή LM317 όπως αναλύθηκε στην Ενότητα 2.7.

Ο αισθητήρας θερμοκρασίας PT-200 της Sensata λειτουργεί ικανοποιητικά όταν διαρρέεται από ρεύμα το οποίο κυμαίνεται μεταξύ $2,7mA \leq I \leq 4,2mA$. Επιλέγεται ο αισθητήρας αυτός στη προκειμένη περίπτωση να διαρρέεται από σταθερό ρεύμα $I=3.3mA$.

Ο Σταθεροποιητής LM317 ως πηγή σταθερού ρεύματος 3,3mA

Μία πηγή σταθερού ρεύματος μπορεί να υλοποιηθεί με χρήση του σταθεροποιητή LM317, όπως φαίνεται στη παρακάτω εικόνα. Μεταξύ των ακροδεκτών V_{out} και Adj συνδέεται μία αντίσταση R , ενώ ο αισθητήρας R_s συνδέεται στον ακροδέκτη ρύθμισης Adj και τη γη (ground).



Εικόνα 39 : LM317 ως πηγή Σταθερού Ρεύματος

Με βάση το datasheet του ολοκληρωμένου, μεταξύ των ακροδεκτών V_{out} και Adj εμφανίζεται σταθερή τάση αναφοράς ίση με $V_{ref}=1,26V$ ενώ ένα πολύ μικρό ρεύμα διέρχεται από τον ακροδέκτη ρύθμισης Adj ίσο με $I_{adj}=50\mu A$. Τα παραπάνω ισχύουν ανεξαρτήτως των υπολοίπων τιμών του κυκλώματος. Η τιμή του ρεύματος I_s που θα διαρρέει τον αισθητήρα είναι σταθερό και η τιμή του εξαρτάται από την αντίσταση R .

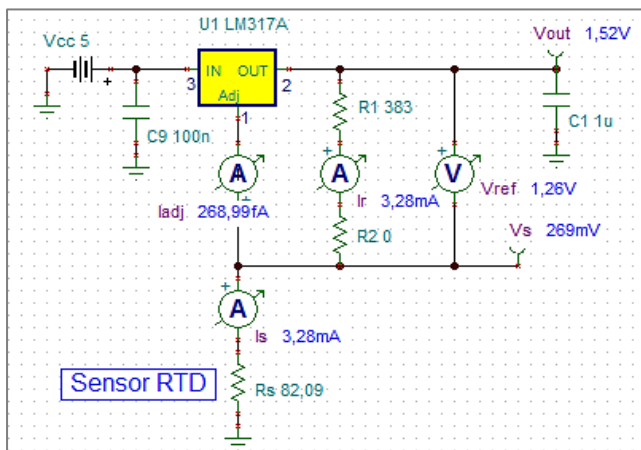
$$I_{OUT} = I_R + I_{Adj} = \frac{V_{Ref}}{R} + I_{Adj} \rightarrow I_{OUT} = \frac{1.26 V}{R} + 50\mu A$$

Για $I_{OUT} = I_s = 3,3mA$, με βάση τη παραπάνω σχέση, η τιμή της αντίστασης R είναι :

$$R = \frac{V_{Ref}}{(I_{OUT} - I_{Adj})} \rightarrow R = \frac{1.26 V}{(3,3mA - 50\mu A)} = \frac{1.26 V}{3,3mA} \rightarrow R = 381,81\Omega$$

Επιλέγεται αντίσταση :

$$\underline{R = 383, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805 SMD}$$

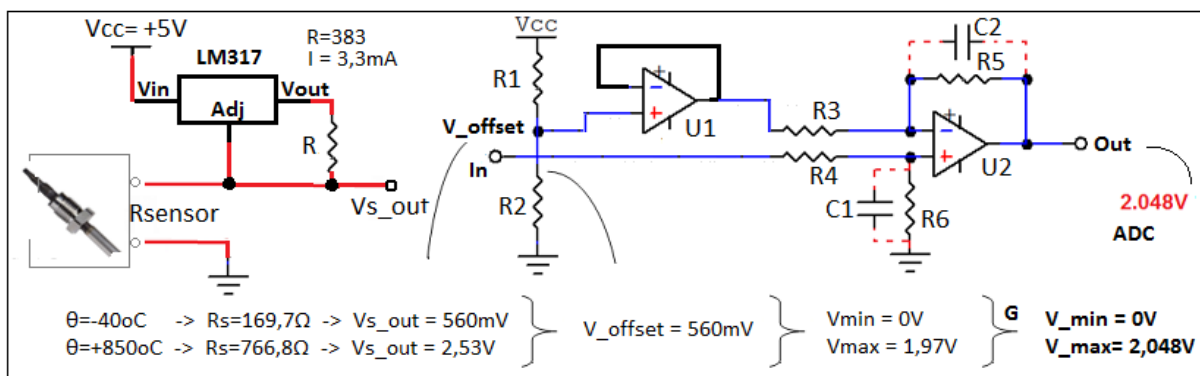


Στη διπλανή εικόνα φαίνεται η επιβεβαίωση όλων των παραπάνω μέσω της προσομοίωσης με το πρόγραμμα TINA-Ti V.9 της Texas Instruments.

Εικόνα 40 : Προσομοίωση LM317 ως πηγή Σταθερού Ρεύματος

Κυκλωματικό Σχηματικό Διάγραμμα Οδήγησης Αισθητήρα RTD μέσω σταθερής πηγής ρεύματος

Στην Εικόνα που ακολουθεί φαίνεται το αναλυτικό κυκλωματικό διάγραμμα που χρησιμοποιείται για την οδήγηση του αισθητήρα θερμοκρασίας RTD PT-200 της Sensata μέσω χρήσης πηγής σταθερού ρεύματος.



Εικόνα 41 : ΗΝ Κύκλωμα οδήγησης Αισθητήρα θερμοκρασίας RTD – χρήση Πηγής Σταθερού Ρεύματος

Με δυνατότητα εύρος μέτρησης θερμοκρασίας $-40^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq +850^{\circ}\text{C}$ και δεδομένου της διέλευσης σταθερής τιμής ρεύματος $I = 3,3\text{mA}$, οποιαδήποτε μεταβολή της τιμής της αντίστασης του αισθητηρίου μεταξύ $169,7\Omega \leq R_{sen} \leq 766,8\Omega$ ισοδυναμεί, με βάση το νόμο του Ohm, σε μεταβολή της τάσης στα άκρα του $560\text{mV} \leq V_{sensor} \leq 2,53\text{V}$. Η τάση των 560mV αποτελεί και την τάση V_{offset} η οποία και θα πρέπει να αφαιρεθεί από την βαθμίδα μετατόπισης (level shifting).

- Υπολογισμός στοιχείων Διαιρέτη Τάσης :

Στο παραπάνω κυκλωματικό, οι Αντιστάσεις $R1$ και $R2$ αποτελούν έναν διαιρέτη τάσης και ορίζουν το απαιτούμενο V_{offset} .

$$V_{offset} = \frac{(R2)}{(R1 + R2)} \times V_{cc}$$

Με δεδομένο ότι $V_{cc}=+5V_{olt}$ και θεωρώντας ότι το ρεύμα που διέρχεται από τις Αντιστάσεις είναι πολύ μικρό $I=10\mu A$, η συνολική τιμή των αντιστάσεων θα είναι :

$$R_{ολ} = R1 + R2 = \frac{V_{cc}}{I} = \frac{5V}{10\mu A} = 500k\Omega \text{ και η αντίσταση } R2 \text{ θα ισούται με :}$$

$$R2 = \frac{V_{offset}}{I} = \frac{560mV}{10\mu A} \rightarrow R2 = 56k\Omega$$

$$\underline{R2 = 56k, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805 SMD}$$

$$\text{Οπότε } R1 = R_{ολ} - R2 \rightarrow R1 = 444k\Omega.$$

Επιλέγονται αντιστάσεις $R1A+R1B=R1$

$$\underline{R1A = 442k, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805 SMD} \quad \text{και}$$

$$\underline{R1B = 2k, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805 SMD}$$

- Υπολογισμός στοιχείων Ενισχυτικής Βαθμίδας :

Ορίζονται $R3 = R4$ και $R5 = R6$ οπότε το κέρδος (G) της ενισχυτικής διάταξης θα είναι:

$$G = \frac{R5}{R3} = \frac{R6}{R4} = \frac{V_{out_max}}{(V_{in} - V_{offset})} = \frac{2,048V}{(2,53V - 0,65V)} \rightarrow G = 1,039$$

Γίνεται η εξής επιλογή Αντιστάσεων :

$$\underline{R3 = R4 = 107k, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805 SMD}$$

$$\text{Οπότε : } R5 = R6 = G \times R3 = 1,039 \times 107k \rightarrow R5 = R6 = 111k173 \quad \text{Επιλέγονται :}$$

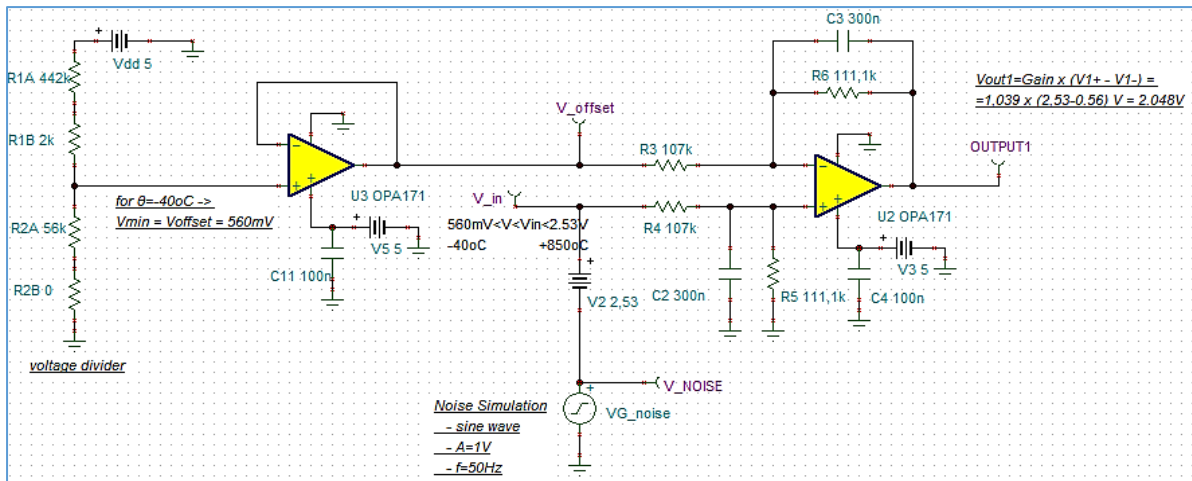
$$\underline{R5A = R6A = 110k, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805 SMD} \quad \text{και}$$

$$\underline{R5B = R6B = 1k1, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805 SMD} \quad \text{ώστε } R5A+R5B=R5=R6=R6A+R6B$$

- Προσομοίωση κυκλώματος οδήγησης Αισθητήρα RTD (χρήση constant current):

Η επαλήθευση και προσομοίωση των παραπάνω τιμών, γίνεται με το πρόγραμμα TINA-Ti V.9 της Texas Instruments και παρουσιάζονται στην *Εικόνα42* που ακολουθεί.

Με την DC Ανάλυση παρατηρείται η δημιουργία κατάλληλης τάσης $V_{offset}=560mV$ και η παραγωγή της μέγιστης τάσης στην έξοδο της ενισχυτικής βαθμίδας ίση με εκείνη του μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακού ADC ($V_{out}=2,05V$) για μέγιστη τάση εισόδου στα $V_{in}=2,53V$.

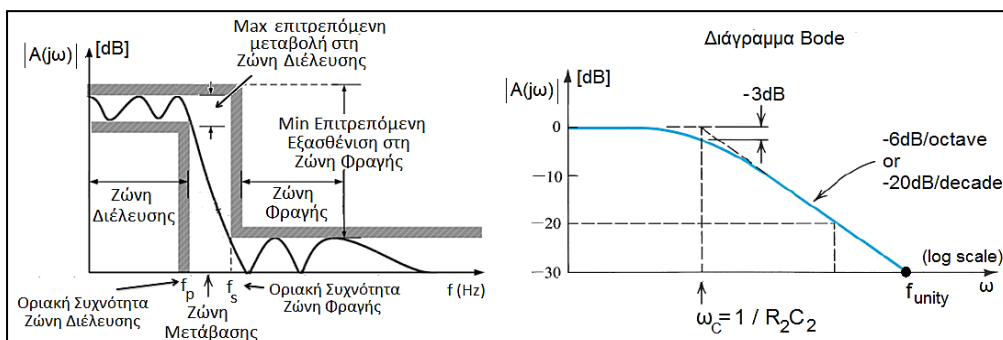


Εικόνα 42 : Προσομοίωση Κυκλώματος οδήγησης Αισθητήρα θερμοκρασίας RTD (Dc Analysis) – χρήση Πηγή Σταθερού Ρεύματος

3.4 Χαμηλοπερατό Φίλτρο Butterworth Sallen-Key 3ης τάξης

Πολλές φορές, κατά την διαδικασία της επεξεργασίας του σήματος εξόδου ενός αισθητηρίου, λαμβάνεται μαζί με αυτό και θόρυβος ο οποίος προέρχεται τόσο από το περιβάλλον όπου βρίσκεται η μετρητική διάταξη όσο και από τον ίδιο τον αισθητήρα. Ο θόρυβος αυτός εισάγει σφάλμα στις μετρήσεις, επηρεάζοντας άμεσα και την ορθή συμπεριφορά του ψηφιακού-αναλογικού μετατροπέα ADC που ακολουθεί και για το λόγο αυτό θα πρέπει να απαλειφθεί με τη χρήση παθητικών ή ενεργών φίλτρων.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι εξασθενήσεις στη ζώνη διέλευσης και στη ζώνη φραγής δεν παραμένουν σταθερές (Εικόνα43) και λόγω της σταδιακής μετάβασης από τη ζώνη διέλευσης στη ζώνη φραγής, συχνά γίνεται χρήση HN ενεργών φίλτρων N-τάξης Butterworth ή Chebyshev. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της τάξης του φίλτρου, τόσο πιο ιδανικό είναι το μέτωπο απόσβεσης και επομένως αποδοτικότερο το φίλτρο.



Εικόνα 43 : Απόκριση Ενεργού Βαθυπερατού Φίλτρου [27]

Τα φίλτρα Butterworth έχουν το πλεονέκτημα της επίπεδης απόκρισης στη ζώνη διέλευσης (maximally flat filters) ενώ, σε σχέση με τα φίλτρα Chebyshev, υστερούν στο χρόνο μετάβασης στη ζώνη αποκοπής. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές όπου απαιτείται ακρίβεια του επιπέδου του σήματος (μέσα σε όλο το φάσμα διέλευσης) κατά τη μεταφορά δεδομένων (anti-aliasing filters) [27] και για το λόγο αυτό αποτελούν ιδανική λύση για την συγκεκριμένη εφαρμογή.

Για την υλοποίηση της συγκεκριμένης βαθμίδας, σε κάθε κανάλι οδήγησης γίνεται χρήση ενός 3ης τάξης Butterworth (2 stages) Sallen-Key μοναδιαίας απολαβής, οι προδιαγραφές του οποίου παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί :

Προδιαγραφές Σχεδίασης Φίλτρου Butterworth	
Συνάρτηση Απλού Κέρδους	$G = 1$
Συχνότητα Αποκοπής στη Ζώνη	$f_p = 5Hz$
Συχνότητα Αποκοπής στη Ζώνη Αποκοπής	$f_s = 50Hz$
Παράμετρος Εξασθένησης Ζώνης Αποκοπής	$A = -60dB$

Πίνακας 4 : Προδιαγραφές Σχεδίασης Φίλτρου Butterworth

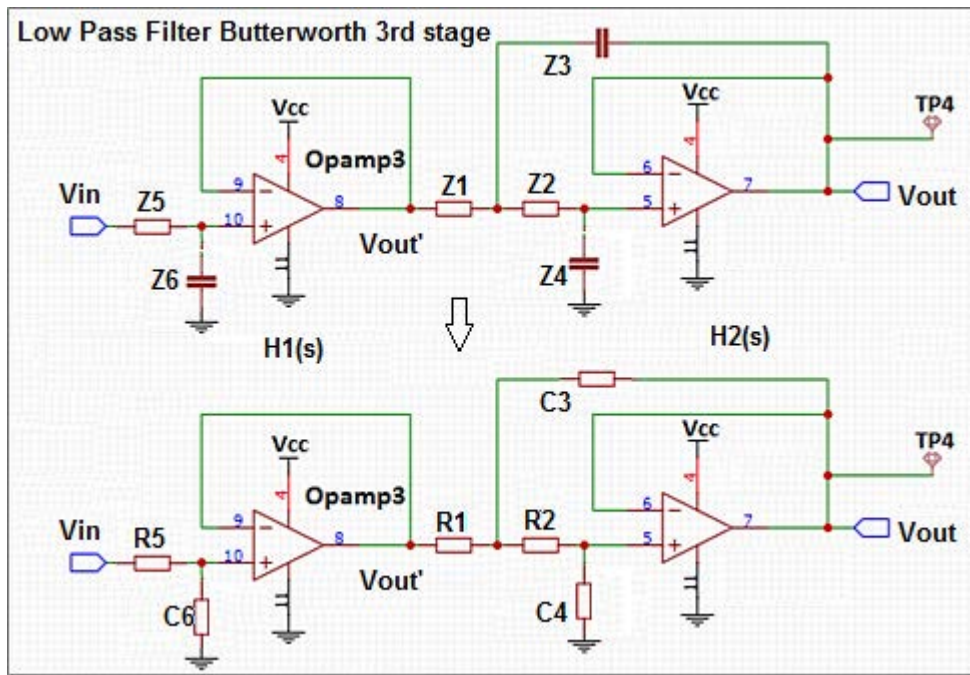
Επιλέγεται συχνότητα αποκοπής, κοινή για όλα τα κανάλια οδήγησης των αισθητήρων και ίση με $f_c = 5Hz$, η επιλογή της οποίας βασίζεται στις ακόλουθες παρατηρήσεις :

- Στην επιλογή αισθητήριων με σχετικά αργή απόκριση (low response time).
- Στην απόφαση λειτουργίας του επιλεγμένου μετατροπέα ADC (MCP3424) με τον μέγιστο αριθμό bit.
- Στην μη αμελητέα απόσταση που απέχουν όλα τα διασυνδεδεμένα αισθητήρια από την κεντρική μονάδα, η διασύνδεση των οποίων επιτυγχάνεται με χρήση μη θωρακισμένης καλωδίωσης.
- Το περιβάλλον λειτουργίας των αισθητήριων καθώς και η τροφοδοσία τους είναι συνήθως υψηλού θορύβου, προερχόμενος από ροή υψηλών ρευμάτων.

Για όλους τους παραπάνω λόγους η σχεδίαση του φίλτρου γίνεται με γνώμονα την αποκοπή όλων των ανεπιθύμητων θορύβων προερχόμενοι από το περιβάλλον των αισθητήριων, θυσιάζοντας μέρος της τυχόν υψηλής απόκρισής τους, επιτυγχάνοντας όμως την ανάγνωση σταθερών μεταβολών των αισθητήριων στην έξοδο της αναλογικής διάταξης κάθε καναλιού.

Υπολογισμός Χαμηλοπερατού Φίλτρου Butterworth Sallen-Key μοναδιαίας απολαβής :

Για την σχεδίαση και υλοποίηση ενός Χαμηλοπερατού Φίλτρου (Χ.Φ) Butterworth Sallen-Key τρίτης (3^{ης}) τάξης (Εικόνα44), χρησιμοποιείται ένα Χ.Φ φίλτρο Sallen-Key πρώτου βαθμού το οποίο συνδέεται σε σειρά με ένα Χ.Φ φίλτρο Butterworth δεύτερης τάξης.



Εικόνα 44 : Φίλτρο Butterworth Sallen-Key 3ης τάξης

Η Συνάρτηση Μεταφοράς προκύπτει από το γινόμενο των επιμέρους συναρτήσεων κάθε φίλτρου $H(s) = H_1(s) \times H_2(s)$ όπου :

$$H_1(s) = \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_{c1}}} \quad , \quad \omega_{c1} = 2\pi f_1 = \frac{1}{R_5 C_6} \quad \text{και}$$

$$H_2(s) = \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_{c2}}\right)^2 + \frac{(R_1 + R_2)C_4}{\sqrt{R_1 R_2 C_3 C_4}} \left(\frac{s}{\omega_{c2}}\right) + 1} \quad , \quad \omega_{c2} = 2\pi f_2 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_3 C_4}}$$

με $\omega_{c1} = \omega_{c2} = \omega_c \rightarrow f_1 = f_2 = f = 5\text{Hz}$. Οπότε :

$$H(s) = H_1(s) \times H_2(s) = \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_c}} \times \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_c}\right)^2 + \frac{(R_1 + R_2)C_4}{\sqrt{R_1 R_2 C_3 C_4}} \left(\frac{s}{\omega_c}\right) + 1}$$

Από τη σύγκριση του παρονομαστή της συνάρτησης μεταφοράς με το πολυώνυμο εκείνο 3ου βαθμού για φίλτρα Butterworth $B_3(s) = (s + 1) \times (s^2 + s + 1)$, και με εφαρμογή του σχετικού τυπολογίου σχεδίασης φίλτρων [27], προκύπτει ένα σύστημα τεσσάρων (4) εξισώσεων με τέσσερις (4) αγνώστους:

$$\frac{(R_1 + R_2)C_4}{\sqrt{R_1 R_2 C_3 C_4}} = 1 \quad \left| \quad 2\pi \times f = \frac{1}{R_5 C_6} = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_3 C_4}} \quad \left| \quad R_2 = \frac{\lambda}{4\omega_c C_4} \quad \left| \quad R_1 = \frac{4}{\lambda \omega_c C_2} \quad \left| \right. \right. \right.$$

(όπου $\lambda = \alpha + \sqrt{\alpha^2 + 8(k - 1)} = 2.838$ για $\alpha = 1.414$ και $k = 1$)

Από τη λύση του παραπάνω συστήματος εξισώσεων προκύπτουν :

$R5 = 9.53k, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805 SMD$ και

$C6 = 3.3\mu F, \pm 10\%, 25V, 0805 SMD X7R$

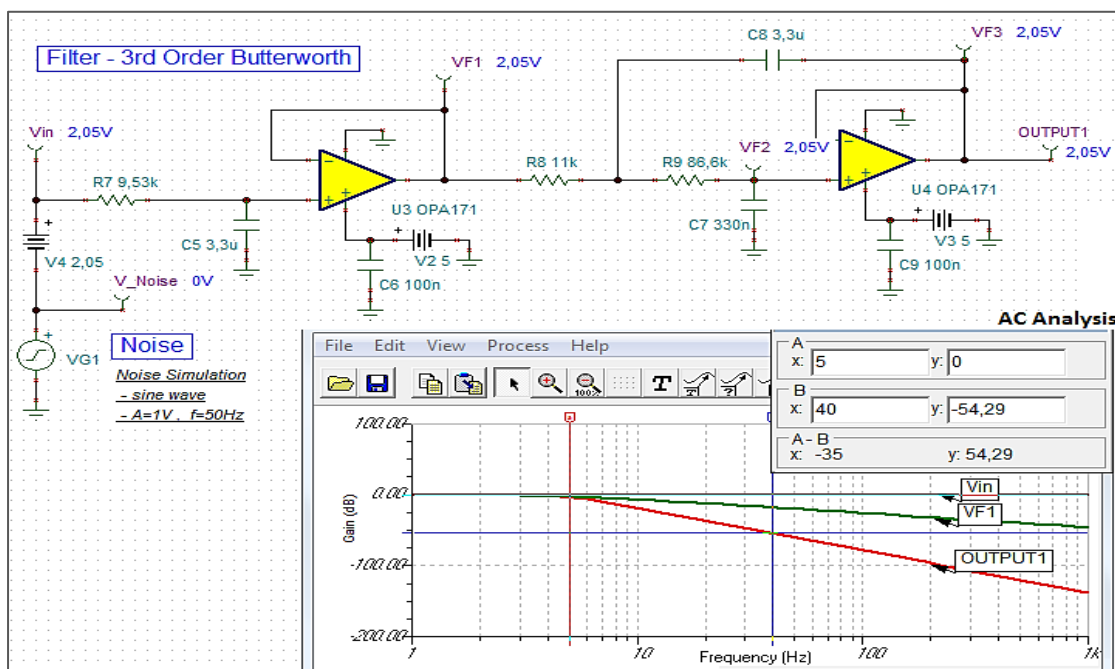
$R1 = 11k, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805 SMD$ και

$C3 = 3.3\mu F, \pm 10\%, 25V, 0805 SMD X7R$

$R2 = 86.6k, \pm 0.1\%, 1/8W, 0805 SMD$ και

$C4 = 330nF, \pm 10\%, 25V, 0805 SMD X7R$

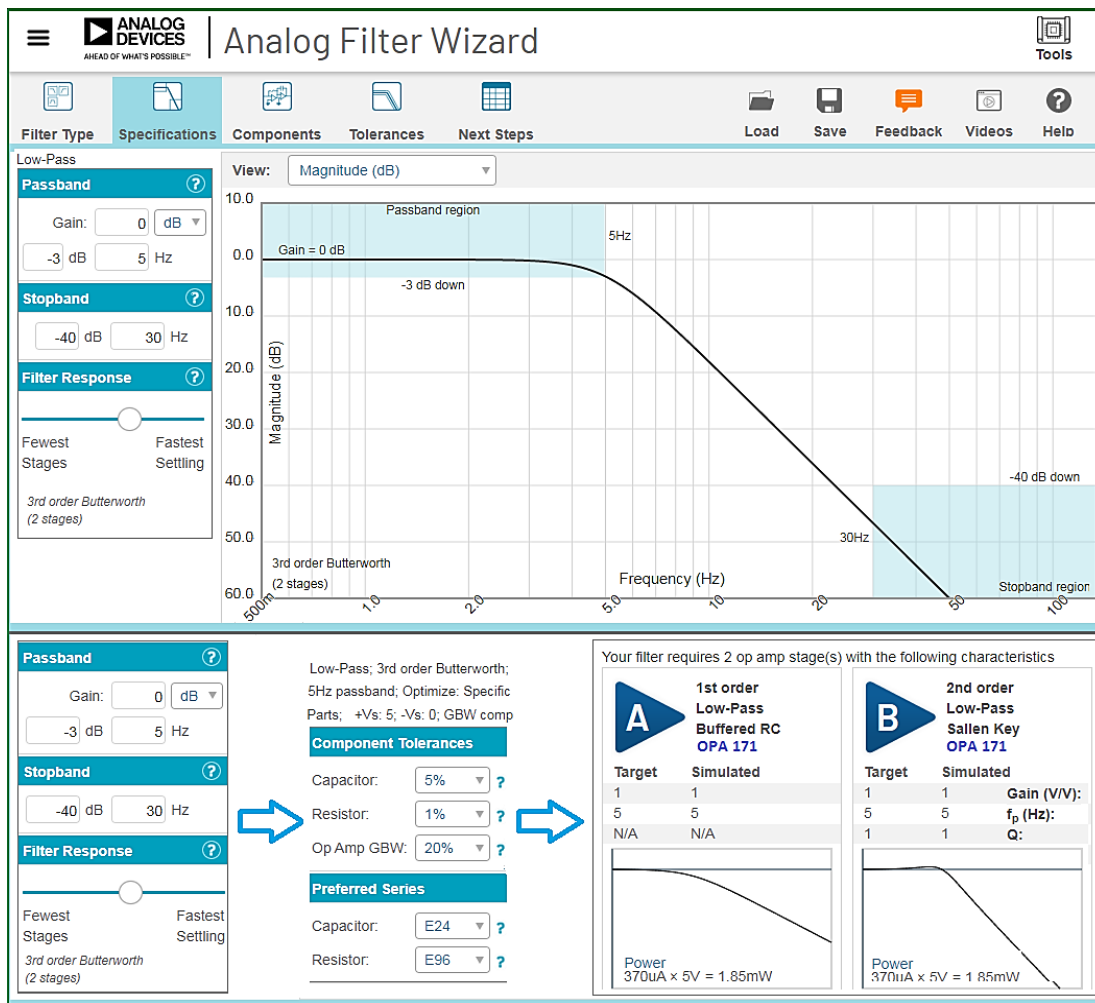
Στην *Εικόνα45* παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και η επαλήθευση των στοιχείων του πίνακα των προσδιαγραφών σχεδίασης (στοιχεία Πίνακα 3). Η προσομοίωση πραγματοποιείται με το πρόγραμμα TINA-Ti V.9 της Texas Instruments.



Εικόνα 45 : Προσομοίωση Κύκλωμα Βαθυπερατού Φίλτρου Butterworth 3ης Τάξης

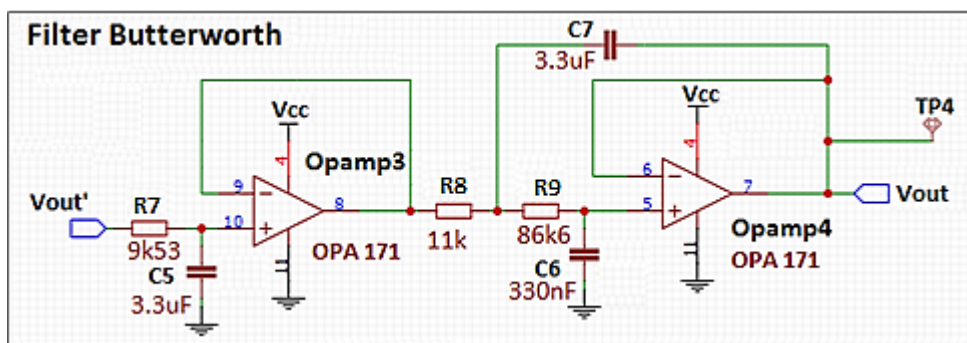
Ο Τελεστικός Ενισχυτής Opa171 σε συνδεσμολογία Buffer, χρησιμοποιείται για την πλήρη απομόνωση των δύο φίλτρων και την δυνατότητα διαδοχικής διασύνδεσης των δύο βαθμίδων χωρίς η μία να επηρεάζει την άλλη, η απουσία του οποίου θα ανάγκαζε τον πυκνωτή C5 λόγω της μεγάλης του χωρητικότητας να στραγγαλίσει την εμπέδηση του ενεργού φίλτρου που ακολουθεί.

Τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά προκύπτουν κάνοντας χρήση του online σχεδιαστικού πακέτου που προσφέρει δωρεάν η εταιρία Analog Devices [29], τα αποτελέσματα του οποίου φαίνονται στην *Εικόνα46*.



Εικόνα 46 : Σχεδίαση Βαθυπερατού Φίλτρου Butterworth 3ης Τάξης [29]

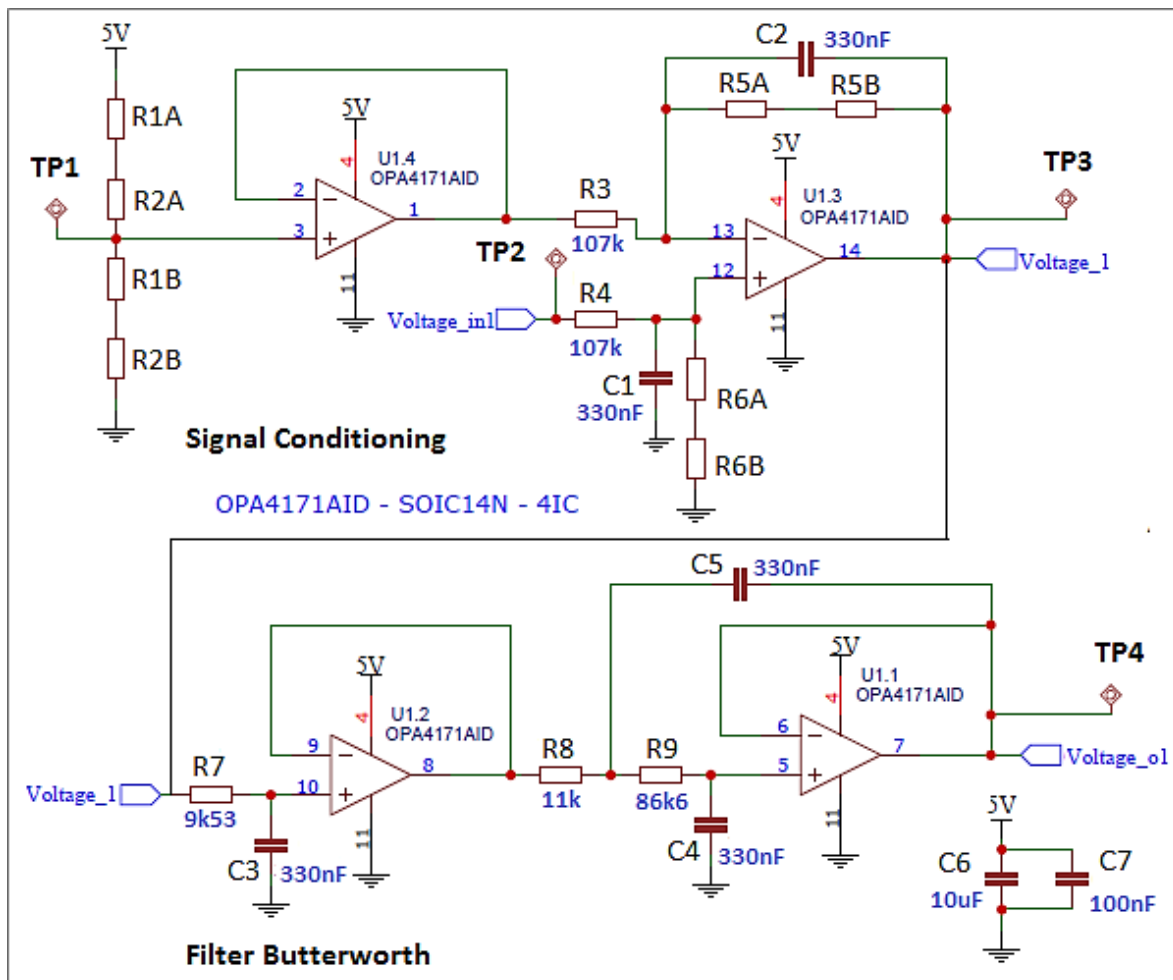
Στην παρακάτω *Εικόνα* φαίνεται το τελικό σχηματικό διάγραμμα του Φίλτρου Butterworth που προκύπτει :



Εικόνα 47 : Κύκλωμα Βαθυπερατού Φίλτρου Butterworth 3ης Τάξης

3.5 Κύκλωμα Οδήγησης Αισθητήριων Αναλογικής Εξόδου

Παρακάτω φαίνεται το κοινό αναλυτικό ηλεκτρονικό σχέδιο που χρησιμοποιεί το κάθε κανάλι για την οδήγηση οποιουδήποτε αισθητήρα αναλογικής εξόδου. Παρατηρείται ότι οι τιμές των εξαρτημάτων που απαρτίζουν το ενεργό βαθυπερατό φίλτρο, το φίλτρο Butterworth καθώς και τους πυκνωτές αποσύζευξης είναι ίδιες για όλα τα κανάλια. Εκείνες που διαφέρουν είναι οι αντιστάσεις $R1$, $R2$ που καθορίζουν τη τάση μετατόπισης (V_{offset}) και η αντίσταση $R6$ όπου μαζί με την $R4$ σταθερής τιμής, ορίζουν το κέρδος/εξασθένιση (G) της κάθε ενισχυτικής βαθμίδας.



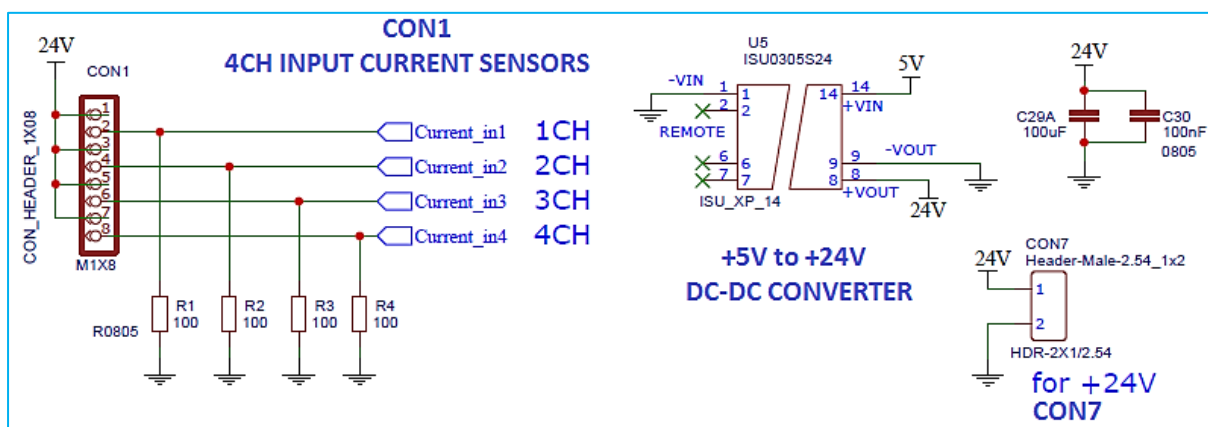
Εικόνα 48: Κύκλωμα Οδήγησης Αισθητήρων Αναλογικής Εξόδου

Επισημαίνεται ότι έχει προβλεφθεί η θέση κάλυψης δύο αντιστάσεων εν σειρά ($R_x = R_{xA} + R_{xB}$) πάνω στο τυπωμένο κύκλωμα, έτσι ώστε να είναι δυνατή η επίτευξη της επιθυμητής τιμής με το άθροισμα των αντιστάσεων εκείνων που κυκλοφορούν στο εμπόριο. Στις περιπτώσεις όπου οι τιμές των αντιστάσεων που προκύπτουν από τους υπολογισμούς είναι υπαρκτές στην αγορά, τότε $R_{xA} = R_x$ και $R_{xB} = 0R$.

Στην έξοδο κάθε βαθμίδας έχουν τοποθετηθεί συνδετήρες ελέγχου (test points) σε τέσσερα (4) διαφορετικά σημεία, που βοηθούν στην ανάπτυξη και αποσφαλμάτωση του κυκλώματος. Αυτά τα σημεία βρίσκονται στην είσοδο I_n της κάθε βαθμίδας (TP2), στον διαίρετη τάσης (TP1) για την μέτρηση της τάσης μετατόπισης V_{offset} , στην έξοδο της ενισχυτικής βαθμίδας (TP3) για τον έλεγχο του κέρδους/εξασθένηση $Gain$ και τέλος μετά το φίλτρο Butterworth (TP4) για την μελέτη απόκρισης του φίλτρου.

3.6 Συνδετήρες Διασύνδεσης Αναλογικών Αισθητήρων και Τροφοδοσίας

Παρακάτω φαίνεται ο συνδετήρας διασύνδεσης (CON1) των Αισθητηρίων Ρεύματος. Πρόκειται για μονής σειράς συνδετήρα (connector) οκτώ σημείων (1x8). Το κάθε ζεύγος παρέχει τη τάση των 24V, την Pull-up Αντίσταση $R=100\Omega$ και αποτελεί ένα κανάλι (#CH). Η τάση των +24V λαμβάνεται από τον μετατροπέα dc-to-dc της εταιρείας MaxPower, ο οποίος δέχεται τη τάση τροφοδοσίας των +5V και τη μετατρέπει σε +24V, τάση απαραίτητη για τη λειτουργία του βρόγχου ρεύματος (4-20mA)

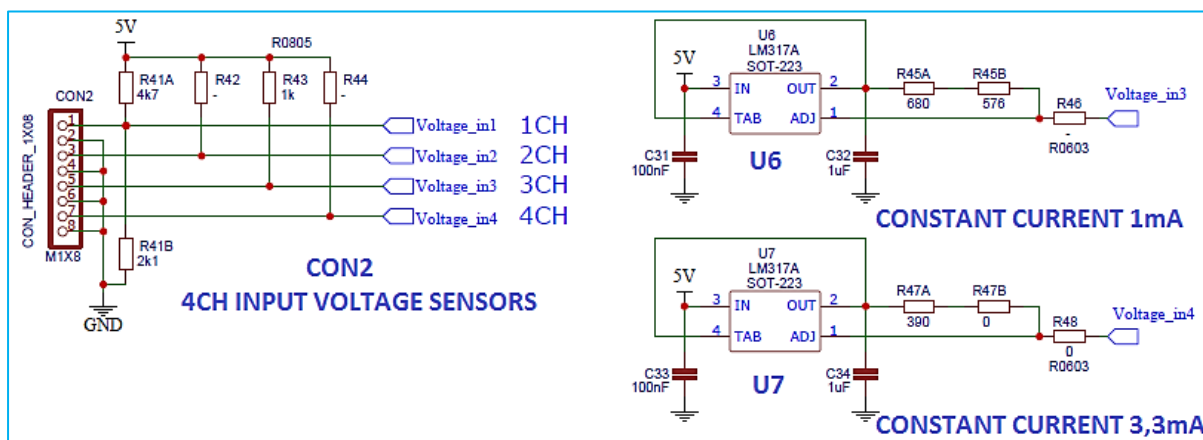


Εικόνα 49: Συνδετήρας Διασύνδεσης (1x8) Αισθητήρων Ρεύματος

Στην *Εικόνα50* αποτυπώνεται ο συνδετήρας διασύνδεσης (CON2) των Αισθητηρίων Τάσεως. Πρόκειται επίσης για μονής σειράς συνδετήρα (connector) οκτώ σημείων (1x8). Το κάθε ζεύγος αποτελεί ένα κανάλι (#CH), παρέχοντας όπου απαιτείται την κατάλληλη Pull-up Αντίσταση στον κάθε αισθητήρα τάσεως, ενώ το άλλο άκρο είναι συνδεδεμένο στη γείωση (ground).

Για μεγαλύτερη ευελιξία στη σχεδίαση και λαμβάνοντας υπόψη ότι για την οδήγηση ορισμένων αισθητηρίων απαιτείται η ύπαρξη σταθερής πηγής ρεύματος, έχει προβλεφθεί η δυνατότητα χρήσης δύο τέτοιων πηγών, με προκαθορισμένες τιμές των $1mA$ και $3,3mA$. Οι τιμές αυτές δεν είναι δεσμευτικές, αλλά μπορεί να επιτευχθεί

οποιαδήποτε τιμή ρεύματος με αλλαγή μόνο των αντιστάσεων $R45$ και $R47$ των δύο κυκλωμάτων που περιέχουν το ολοκληρωμένο LM317 (U6 και U7).

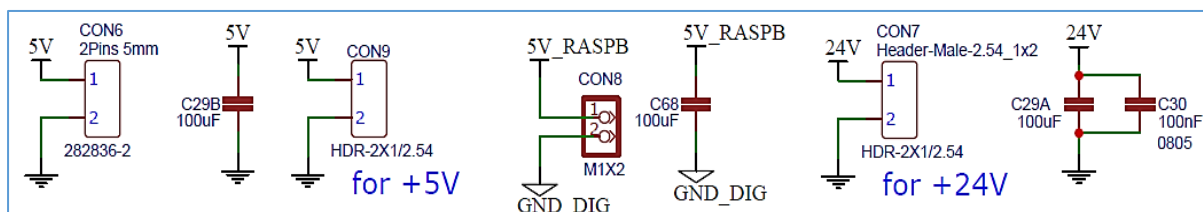


Εικόνα 50 : Συνδετήρας Διασύνδεσης (1x8) Αισθητήρων Τάσεως

Συγκεκριμένα τα κανάλια που παρέχουν τη δυνατότητα αυτή είναι τα δύο τελευταία $CH\#3$ και $CH\#4$, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι έχουν δεσμευτεί και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διασύνδεση αισθητήρων που απαιτούν μόνο την ύπαρξη pull-up αντίστασης. Δηλαδή το ίδιο κανάλι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διασύνδεση αισθητήρων με χρήση pull-up, αλλά και για αισθητήρες που λειτουργούν με πηγή σταθερού ρεύματος.

Ο διαχωρισμός αυτός επιτυγχάνεται μέσω των δύο αντιστάσεων $R46$ και $R48$ που βρίσκονται στο τέλος των δύο κυκλωμάτων πηγής σταθερού ρεύματος και λειτουργούν ως “διακόπτες”. Για παράδειγμα στο κανάλι $CH\#4$ αν είναι αναγκαία η χρήση πηγής ρεύματος τότε επιλέγεται μηδενική τιμή αντίστασης $R48=0\text{ Ohm}$ ενώ η αντίσταση $R44$ (pull-up) δεν χρησιμοποιείται (not used). Αντιθέτως αν στο ίδιο κανάλι συνδεθεί αισθητήρας που είναι αναγκαία η αντίσταση pull-up για την οδήγησή του, στη περίπτωση αυτή η αντίσταση $R48$ αποσυνδέεται (not used) και χρησιμοποιείται η αντίσταση $R44$.

Τέλος ο συνδετήρας CON6 παρέχει την τροφοδοσία +5V του τυπωμένου κυκλώματος ενώ μέσω των CON9, CON7 και CON8 υπάρχει δυνατότητα χρήσης των +5V και +24V καθώς και των +5V από το Raspberry Pi. Όλοι οι συνδετήρες διαθέτουν ηλεκτρολυτικό πυκνωτή αποσύζευξης (decoupling) αλουμινίου : $100\mu\text{F} \pm 20\%$ / 16V SMD.



Εικόνα 51 : Συνδετήρες παροχής τροφοδοσιών του Τυπωμένου Κυκλώματος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΝΑΛΟΓΙΚΟΣ – ΨΗΦΙΑΚΟΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ADC

Το Raspberry Pi μη διαθέτοντας καμία εγκαταστημένη αναλογική είσοδο, καθιστά αδύνατο την απ' ευθείας διασύνδεση των κυκλωμάτων ρύθμισης των αναλογικών αισθητηρίων με αυτό.

Για την μετατροπή των αναλογικών σημάτων σε ψηφιακή μορφή, η έξοδος του κάθε αναλογικού καναλιού οδηγείται στον μετατροπέα “ADC Differential Pi” [30]. Πρόκειται για ένα αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπέα σχεδιασμένο να συνεργάζεται πλήρως με το Raspberry Pi, με διαθέσιμη υποστηριζόμενη βιβλιοθήκη και πηγαίο κώδικα για τον προγραμματισμό του.

4.1 Μετατροπέας ADC MCP3424

Ο Μετατροπέας ADC είναι ένας 8-κάναλος μετατροπέας αναλογικού σε ψηφιακού σήματος, χαμηλής ισχύος, βασιζόμενο σε δύο ολοκληρωμένα κυκλώματα A/D MCP3424 της Microchip Technologies, όπου το καθένα αποτελείται από 4 αναλογικές διαφορικές εισόδους χαμηλού θορύβου [30]. Πρόκειται για μετατροπέα τεχνικής “δέλτα-σίγμα”, που το κάθε σήμα εισόδου υπόκειται σε υπέρ-δειγματοληψία αυξάνοντας το εύρος ζώνης και μειώνοντας την τιμή του μέσου παραγόμενου θορύβου. Η αρχιτεκτονική αυτή είναι κατάλληλη για την παρούσα εφαρμογή καθώς απαιτείται υψηλή ανάλυση (resolution) σε μικρό εύρος συχνοτήτων, ενώ στη προκειμένη περίπτωση η καθυστέρηση μετάδοσης εξαιτίας της υπερ-δειγματοληψίας είναι αδιάφορη.

Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων του ADC είναι προγραμματιζόμενος με τιμές 3.75 (18 bit), 15 (16 bit), 60 (14 bit) ή 240SPS (12 bit) δείγματα ανά δευτερόλεπτο. Το ολοκληρωμένο MCP3424 παρέχει μια ενσωματωμένη τάση αναφοράς 2.048V ώστε η είσοδος να μπορεί να μετρά διαφορικά σήματα με εύρους τάσης $\pm 2.048V$. Για την κάλυψη μετρήσεων υψηλότερης τάσης απαιτείται η χρήση εξωτερικού διαιρέτη τάσης. Ένας προγραμματιζόμενος ενισχυτής κέρδους δίνει στο χρήστη ένα επιλέξιμο κέρδος $\times 1$, $\times 2$, $\times 4$ ή $\times 8$ πριν γίνει η μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό [31].

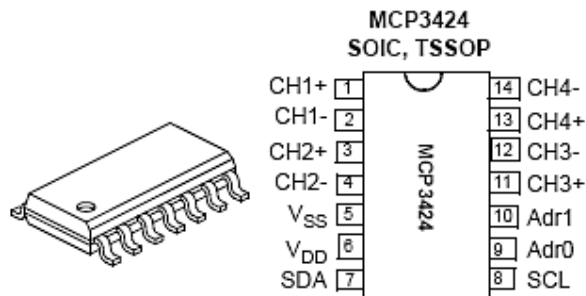
Οι δύο μετατροπείς MCP3424 προγραμματίζονται και επικοινωνούν με τον Raspberry Pi μέσω του σειριακού πρωτόκολλου διασύνδεσης I2C.

Στην *Εικόνα* που ακολουθεί παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εν λόγω μετατροπέα.

18-Bit, Multi-Channel $\Delta\Sigma$ Analog-to-Digital Converter with I²C™ Interface and On-Board Reference

Features

- 18-bit $\Delta\Sigma$ ADC with Differential Inputs:
 - 2 channels: MCP3422 and MCP3423
 - 4 channels: MCP3424
- Differential Input Full Scale Range: $-V_{REF}$ to $+V_{REF}$
- Self Calibration of Internal Offset and Gain per Each Conversion
- On-Board Voltage Reference (V_{REF}):
 - Accuracy: $2.048V \pm 0.05\%$
 - Drift: 15 ppm/°C
- On-Board Programmable Gain Amplifier (PGA):
 - Gains of 1, 2, 4 or 8
- INL: 10 ppm of Full Scale Range
- Programmable Data Rate Options:
 - 3.75 SPS (18 bits)
 - 15 SPS (16 bits)
 - 60 SPS (14 bits)
 - 240 SPS (12 bits)
- One-Shot or Continuous Conversion Options
- Low Current Consumption:
 - 135 μA typical ($V_{DD}= 3V$, Continuous Conversion)
 - 36 μA typical ($V_{DD}= 3V$, One-Shot Conversion with 1 SPS)
- On-Board Oscillator
- I²C™ Interface:
 - Standard, Fast and High Speed Modes
 - User configurable two external address pins for MCP3423 and MCP3424
- Single Supply Operation: 2.7V to 5.5V
- Extended Temperature Range: $-40^{\circ}C$ to $+125^{\circ}C$



Absolute Maximum Ratings†

V_{DD}	7.0V
All inputs and outputs	$V_{SS} - 0.4V$ to $V_{DD} + 0.4V$
Differential Input Voltage	$ V_{DD} - V_{SS} $
Output Short Circuit Current	Continuous
Current at Input Pins	± 2 mA
Current at Output and Supply Pins	± 10 mA
Storage Temperature	$-65^{\circ}C$ to $+150^{\circ}C$
Ambient Temp. with power applied	$-55^{\circ}C$ to $+125^{\circ}C$
ESD protection on all pins	≥ 6 kV HBM, $\geq 400V$ MM
Maximum Junction Temperature (T_J)	$+150^{\circ}C$

General Overview

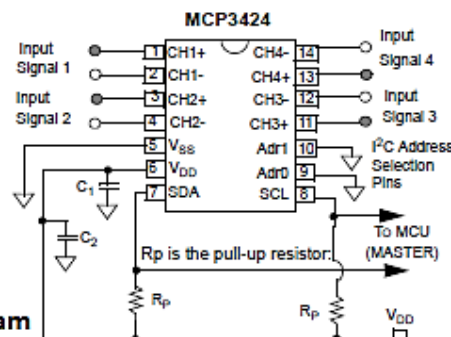
The MCP3422/3/4 devices are differential multi-channel low-power, 18-Bit Delta-Sigma A/D converters with an I²C serial interface. The devices contain an input channel selection multiplexer (mux), a programmable gain amplifier (PGA), an on-board voltage reference (2.048V), and an internal oscillator.

When the device powers up (POR is set), it automatically resets the configuration bits to default settings.

Typical Applications

- Portable Instrumentation and Consumer Goods
- Temperature Sensing with RTD, Thermistor, and Thermocouple
- Bridge Sensing for Pressure, Strain, and Force
- Weigh Scales
- Battery Fuel Gauges
- Factory Automation Equipment

Basic Schematic Diagram

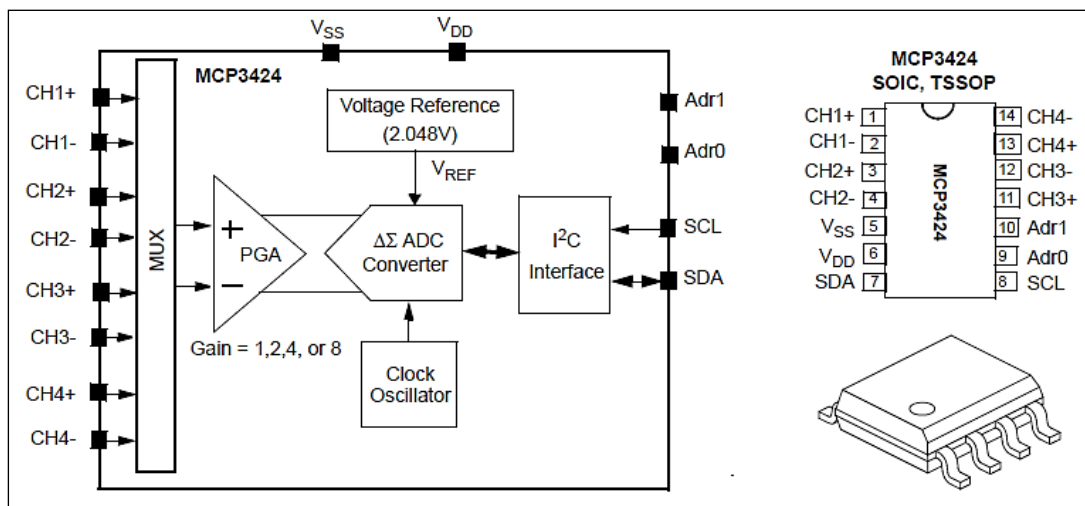


Εικόνα 52 : Τεχνικά Χαρακτηριστικά Μετατροπέα ADC [31]

4.2 Διάγραμμα Βαθμίδων και Τεχνικά χαρακτηριστικά του Μετατροπέα AD

Στην *Εικόνα53* παρουσιάζεται το διάγραμμα βαθμίδων του κάθε μετατροπέα A/D MCP3424, όπου :

- CHx+ : θετική διαφορική Αναλογική Είσοδος 'x' καναλιού
- CHx- : αρνητική διαφορική Αναλογική Είσοδος 'x' καναλιού
- V_{SS} : Ακροδέκτης Γείωσης
- V_{DD} : Ακροδέκτης Τροφοδοσίας
- SDA : Αμφίδρομη κατεύθυνση σειριακών δεδομένων της διεπαφής I²C
- SCL : Παροχή σειριακού παλμού συγχρονισμού (clock) της διεπαφής I²C
- Adr1 , Adr0 : Ακροδέκτες επιλογής διευθυνσιοδότησης



Εικόνα 53 : Διάγραμμα Βαθμίδων μετατροπέα ADC [31]

Στις βασικές του βαθμίδες περιλαμβάνεται ένας πολυπλέκτης (MUX) επιλογής ενός εκ των τεσσάρων καναλιών εισόδου προγραμματιζόμενου κέρδους (PGA) ενισχυτή, μια τάση αναφοράς (V_{ref}) στα 2.048V, ένας εσωτερικός τοπικός ταλαντωτής υπεύθυνος για τον χρονισμό του συστήματος και τέλος μιας διεπαφής πρωτοκόλλου I²C, απαραίτητη για τον προγραμματισμό-έλεγχο του μετατροπέα ADC και την επικοινωνία του με άλλες συσκευές.

Στις εργοστασιακές του ρυθμίσεις (default settings) είναι ενεργοποιημένο το πρώτο κανάλι εισόδου CH#1 με προγραμματισμένο κέρδος ενίσχυσης ίσο με τη μονάδα (Gain=1) και ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 240sps (12 bits).

Η επιλογή του εκάστοτε Καναλιού CH#x ορίζεται από τους ακροδέκτες επιλογής διευθυνσιοδότησης, χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα bits του καταχωρητή. Κάθε κανάλι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως διαφορική ή απλή είσοδο των 18bit max η κάθε μία. Η συχνότητα δειγματοληψίας και κατ' επέκταση ο ρυθμός μετάδοσης καθορίζεται από το χρόνο δειγματοληψίας που ορίζει το λογισμικό μέσω του Raspberry Pi. Η εκλογή της

απολαβής του προγραμματιζόμενου ενισχυτή (PGA) καθορίζεται από το κύκλωμα ανάδρασης της ενισχυτικής βαθμίδας που ελέγχεται επίσης από το λογισμικό. Αυτό επιτρέπει στη συσκευή τη μετατροπή ενός πολύ χαμηλής στάθμης αναλογικού σήματος εισόδου με υψηλή ανάλυση. Τα επίπεδα σήματος εισόδου ενισχύονται από τον εσωτερικό προγραμματιζόμενο ενισχυτή κέρδους (PGA) στο εμπρόσθιο άκρο του διαμορφωτή ΔΣ.

Υπάρχει δυνατότητα λειτουργίας του ψηφιακού μετατροπέα με δύο τρόπους: συνεχής και διακοπτόμενη. Στη λειτουργία συνεχούς μετατροπής (Continuous Conversion Mode), ο ADC προχωρά σε διαρκή δειγματοληψία της επιλεγόμενης εισόδου στην καθορισμένη ταχύτητα μετατροπής, ενώ σε διακοπτόμενη λειτουργία (One-Shot Conversion Mode), η συσκευή μετατρέπει την είσοδο μία φορά και παραμένει στην κατάσταση αναμονής χαμηλής κατανάλωσης έως ότου λάβει εντολή για νέα μετατροπή.

Το εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας του ψηφιακού μετατροπέα ADC είναι από $-40^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq +125^{\circ}\text{C}$. Η τάση τροφοδοσίας του κυμαίνεται από $+2.7\text{V} \leq V_{DD} \leq +5.5\text{V}$ με μέγιστο ρεύμα ακροδεκτών τροφοδοσίας $I_{DD} \leq 10\text{mA}$, το δε ρεύμα κατανάλωσης σε κανονική λειτουργία είναι πολύ μικρό με τιμή $I_{CONS} = 135\mu\text{A}$ ενώ σε κατάσταση αναμονής (standby) η συσκευή καταναλώνει λιγότερο από $1\mu\text{A}$. Το κάθε κανάλι εισόδου μπορεί να δεχθεί τάση από $V_{SS} - 0.3\text{V}$ έως $V_{DD} + 0.3\text{V}$ ($V_{IN} = \pm 2,048\text{Volt}$) με μέγιστο ρεύμα ακροδεκτών εισόδου και εξόδου $I_{IN_MAX} = 2\text{mA}$ και $I_{OUT_MAX} = 10\text{mA}$ αντίστοιχα. Η σύνθετη αντίσταση εισόδου ποικίλλει ανάλογα με τις ρυθμίσεις του ενισχυτή PGA. Η τυπική σύνθετη αντίσταση εισόδου κατά τη διάρκεια κανονικής λειτουργίας είναι $Z_{IN}(f) = 2.25\text{M}\Omega/\text{PGA}$. Δεδομένου ότι ο πυκνωτής δειγματοληψίας μεταβαίνει στους ακροδέκτες εισόδου μόνο κατά τη διάρκεια της μετατροπής, η παραπάνω σύνθετη αντίσταση ισχύει μόνο κατά τις περιόδους μετατροπής. Σε κατάσταση αναμονής η σύνθετη αντίσταση εισόδου είναι πολύ μικρή [31].

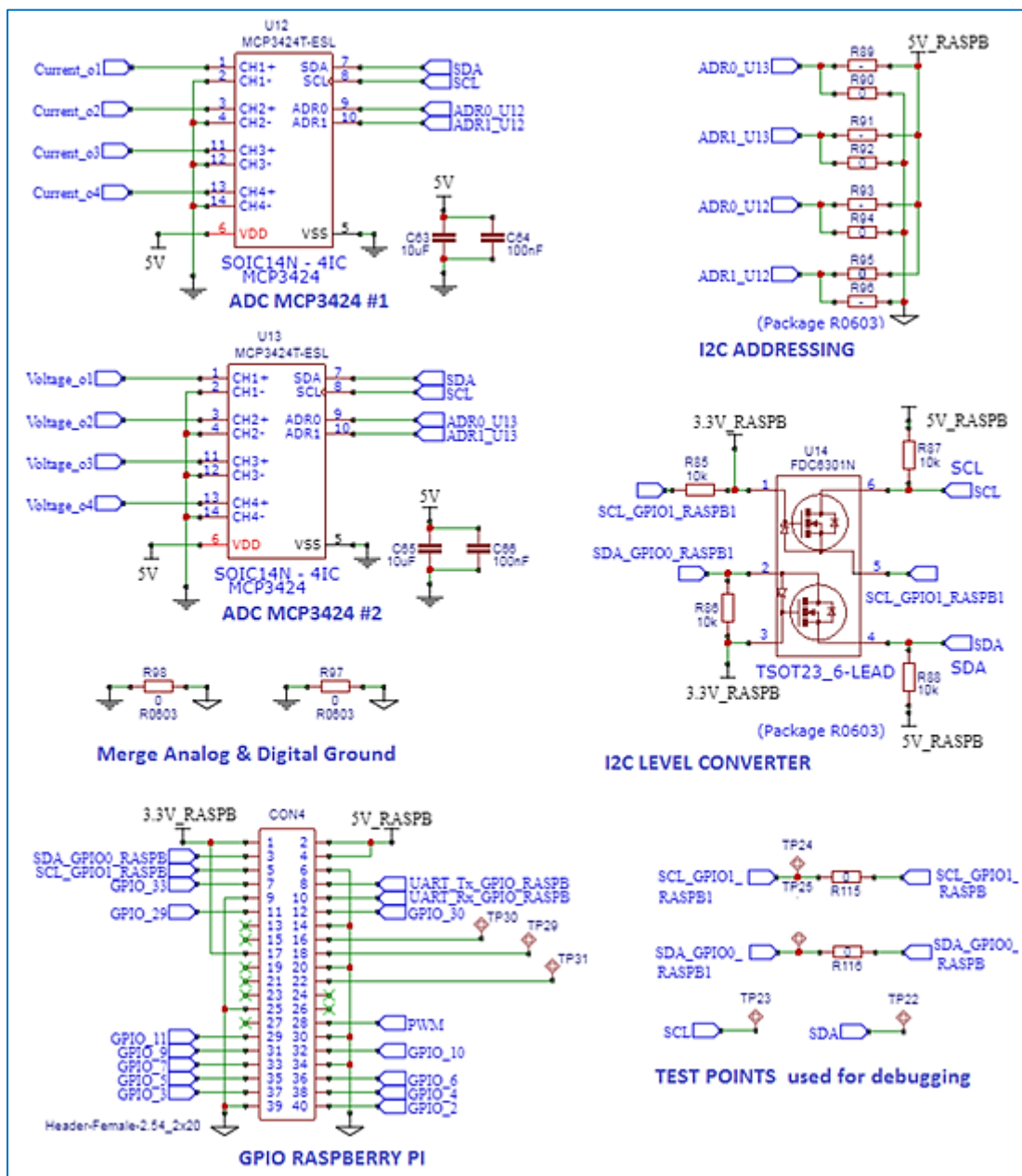
4.3 Σχηματικό Διάγραμμα Μετατροπέα ADC

Στην παρακάτω *Εικόνα 54* παρουσιάζεται το αναλυτικό ηλεκτρονικό σχέδιο του ψηφιακού μετατροπέα ADC. Το όλο κύκλωμα τροφοδοτείται με $+5\text{V}$, μέσω της κύριας τάσης τροφοδοσίας του τυπωμένου κυκλώματος.

Στο ΗΝ σχέδιο διακρίνονται οι δύο προγραμματιζόμενοι μετατροπείς A/D MCP3424 (ολοκληρωμένα U12, U13), ο πρώτος (U12) για την ψηφιακή μετατροπή των αναλογικών σημάτων των 4 καναλιών οδήγησης αισθητήρων ρεύματος και ο δεύτερος (U13) υπεύθυνος για την μετατροπή των σημάτων των 4 καναλιών αισθητήρων τάσης.

Όλα τα κανάλια εισόδου των A/D χρησιμοποιούνται ως απλές εισοδοί με τη τοποθέτηση των αρνητικών εισόδων (CHx-) στη γείωση (ground). Επισημαίνεται ότι η μέγιστη τάση κάθε εισόδου των A/D είναι $V_{IN_MAX} = +2,048\text{V}$, περιορισμός ο οποίος λαμβάνεται υπόψη στο στάδιο της σχεδίασης της αναλογικής διάταξης οδήγησης των αισθητήρων (Κεφάλαιο 3).

Μέσω του συνδετήρα *CON4* επιτυγχάνεται η διασύνδεση της πλακέτας επέκτασης (shield) με τον υπολογιστή Raspberry Pi 3B, από όπου λαμβάνει τη τάση τροφοδοσίας των +3.3V και παρέχει την έξοδο του A/D στη ψηφιακή διάταξη.

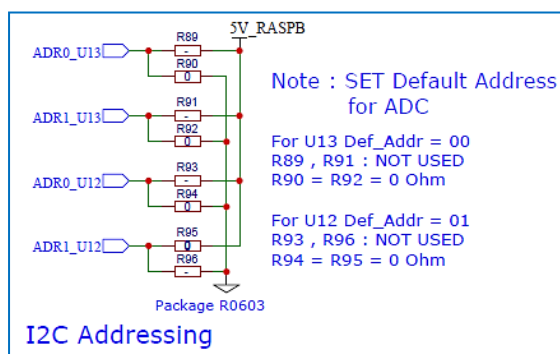


Εικόνα 54: Αναλυτικό Σχηματικό Διάγραμμα Ψηφιακού μετατροπέα ADC

Οι δύο μετατροπείς MCP3424 προγραμματίζονται και επικοινωνούν με τον Raspberry Pi μέσω του σειριακού πρωτόκολλου διασύνδεσης I²C. Το ολοκληρωμένο FDC6301N (U14) αποτελεί το λογικό κύκλωμα προσαρμογής της τάσης εξόδου παρέχοντας την δυνατότητα ρυθμιζόμενης θύρας I²C από τα +5V στα +3.3V [32], καθώς η μέγιστη τάση λειτουργίας του κάθε ακροδέκτη γενικής χρήσης GPIO του Raspberry είναι

τα $+3.3V$ [36]. Το κύκλωμα απομόνωσης χρησιμοποιεί 2-Channel MOSFET με μέγιστο ρεύμα συσσώρευσης (Drain) τα 100mA. Και οι δύο γραμμές SCL και SDA είναι τύπου ανοικτού απαγωγού (open drain). Αυτό σημαίνει ότι κάθε μία από αυτές τις δύο γραμμές, πρέπει να συνδέεται με μία αντίσταση τερματισμού (pull up) στην γραμμή τροφοδοσίας, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα.

Η επιλογή του A/D και κατ' επέκταση του εκάστοτε Καναλιού CH#x, ορίζεται από τους ακροδέκτες επιλογής διευθυνσιοδότησης $ADDR_0$ και $ADDR_1$ του κάθε μετατροπέα A/D. Τα bits διεύθυνσης επιλέγονται μέσω των smd αντιστάσεων $R89$ έως $R96$. Συγκεκριμένα οι αντιστάσεις αυτές με γεωμετρία (package) r0603 παίζουν το ρόλο βραχυκυκλωτήρων (jumpers) όπου ο χρήστης μέσω των αντιστάσεων αυτών και συνδέοντας τους δύο ακροδέκτες επιλογής διεύθυνσης με τάσεις $V_{DD}=+5V$ ή $V_{SS}=0V$, έχει τη δυνατότητα ρύθμισης του κάθε ολοκληρωμένου σε μία από τις οκτώ διαθέσιμες διευθύνσεις. Στο κυκλωματικό με τον τρόπο που έχουν χρησιμοποιηθεί οι παραπάνω αντιστάσεις, επιλέγονται οι εξής διευθύνσεις επικοινωνίας :



(α) για τον μετατροπέα A/D των κυκλωμάτων οδήγησης αισθητήρων ρεύματος U12_ADDR=01 που αντιστοιχεί στη διεύθυνση : 1101010x, ενώ

(β) για τον A/D των κυκλωμάτων οδήγησης αισθητήρων τάσης ορίζεται η U13_ADDR=00 η οποία αντιστοιχεί στη διεύθυνση : 1101000x, με βάση το datasheet λειτουργίας του ADC.

Εικόνα 55 : Επιλογή διευθυνσιοδότησης μετατροπέων ADC

Στο κύκλωμα έχουν τοποθετηθεί σημεία ελέγχου (test points) για τα σήματα SDA/SCL της διεπαφής I2C, ενώ οι αντιστάσεις $R96$ και $R97$ μηδενικής τιμής, αποτελούν τα μόνα κοινά σημεία σύνδεσης της αναλογικής γείωσης με την ψηφιακή (σημεία καλής γείωσης).

Τέλος, με τον διαχωρισμό των ψηφιακών και αναλογικών σημάτων αλλά και την χρήση επιπέδων γείωσης (power ground layer) κατά την σχεδίαση του PCB, τόσο στο στάδιο της τοποθέτησης των εξαρτημάτων (placement) όσο και της δρομολόγησης των σημάτων (routing), επιτυγχάνεται η μείωση στο ελάχιστο των παρεμβολών προς τον μετατροπέα ADC.

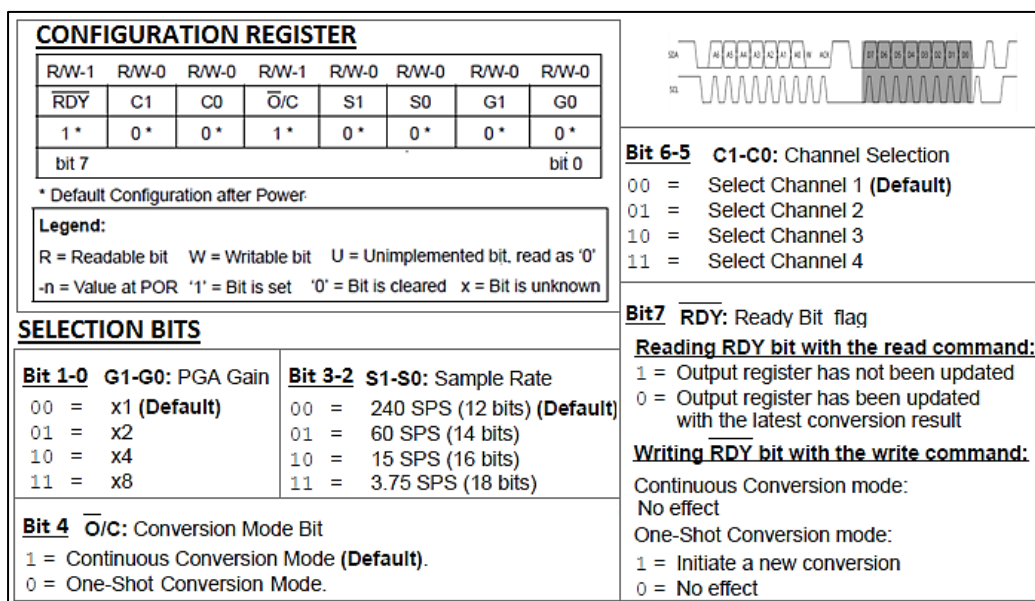
4.4 Προγραμματισμός και Έλεγχος λειτουργιών Μετατροπέα ADC

Η λειτουργία του μετατροπέα ADC ελέγχεται μέσω ενός καταχωρητή διαμόρφωσης χρησιμοποιώντας μια εντολή “write” ($R/\bar{W} = 0$), ενώ με χρήση της

εντολής “read” ($R/\bar{W} = 1$), υπάρχει δυνατότητα ανάγνωσης των δεδομένων. Συγκεκριμένα, ο μετατροπέας ADC διαθέτει έναν καταχωρητή διαμόρφωσης των 8-bits μέσω του οποίου δύναται ο χρήστης να επιλέγει το κανάλι εισόδου, τον τρόπο λειτουργίας και μετατροπής του ADC, το ρυθμό μετάδοσής του καθώς και το κέρδος PGA. Αυτός ο καταχωρητής επιτρέπει στον χρήστη να αλλάζει ή να ελέγχει την κατάσταση λειτουργίας του μετατροπέα ADC. Ο χρήστης μπορεί να επανεγγράψει το byte διαμόρφωσης οποιαδήποτε στιγμή κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της συσκευής.

Με βάση τη δομή του καταχωρητή διαμόρφωσης των 8-bits, μέσω των δύο λιγότερο σημαντικών δυαδικών ψηφίων *-bit0* και *bit1-* ορίζεται το κέρδος απολαβής του προγραμματιζόμενου ενισχυτή (PGA), ενώ τα αμέσως επόμενα δύο λιγότερο σημαντικά bits *-bit2* και *bit3-* καθορίζουν το ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων (SPS). Μέσω του *-bit4* επιλέγεται ο τρόπος λειτουργίας του μετατροπέα ADC: συνεχής μετατροπή ή μετατροπή μιας λήψης. Η επιλογή του εκάστοτε Καναλιού ch# ελέγχεται από τα δύο αμέσως επόμενα bits του καταχωρητή *-bit5* και *bit6-*. Τέλος, το πιο σημαντικό bit (MSB) *-bit7-* ενεργοποιεί μία νέα μετατροπή λήψης και υποδεικνύει εάν ο καταχωρητής εξόδου έχει ενημερωθεί με το τελευταίο αποτέλεσμα μετατροπής στη λειτουργία ανάγνωσης.

Στην *Εικόνα56* φαίνεται συνοπτικά η δομή του Καταχωρητή “Διαμόρφωσης” των 8 bit.



Εικόνα 56: Δομή Καταχωρητή “Διαμόρφωσης” Μετατροπέα ADC [31]

Η έξοδος του Μετατροπέα ADC εξαρτάται τόσο από την τάση εισόδου όσο και από τις τιμές της απολαβής κέρδους του ενισχυτή και του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων που έχουν οριστεί. Το πιο σημαντικό bit (MSB) θεωρείται δείκτης σηματοδότησης και είναι εκείνο που μεταδίδεται πάντοτε πρώτο μέσω της γραμμής I2C. Όταν το MSB είναι λογικής '0', η είσοδος είναι θετική. Όταν το MSB είναι λογικής '1', τότε η είσοδος είναι αρνητική. Στη περίπτωση όπου η τάση εισόδου υπερβεί το μέγιστο εύρος $\pm 2.048V$, η μετατροπή και η ροή δεδομένων σταματά προς την έξοδο. Ο αριθμός των bit

εξόδου εξαρτάται από την επιλογή του ρυθμού μετατροπής από το χρήστη και μπορεί να είναι 18, 16, 16 ή 12 bits. Στον Πίνακα5 δίνεται η τάση που αντιστοιχεί στο ελάχιστο σημαντικό ψηφίο (LSB) του ψηφιακής εξόδου καθώς και τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές που μπορεί να λάβει για κάθε επιλογή ρυθμού μετατροπής.

# Bit R	DR [SPS]	Minimum Code	Maximum Code	LSB Resolution
12	240	-2048	2047	1 mV
14	60	-8192	8191	250 μ V
16	15	-32768	32767	62.5 μ V
18	3.75	-131072	131071	15.625 μ V
MSB	for a negative full scale input voltage (-2.048V)			100...000
	for a zero differential input voltage (0V)			000...000
	for a positive full scale input voltage (+2.048V)			011...111

Πίνακας 5 : Τιμές τάσης LSB έναντι ρυθμών μετατροπής

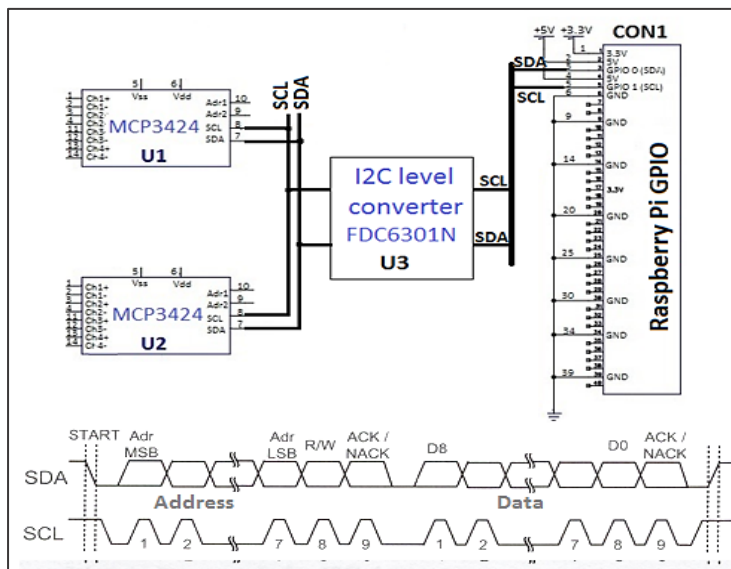
Με βάση τα παραπάνω είναι εμφανές ότι η επιλογή του ρυθμού μετάδοσης (x-bit) αποτελεί ένα σημαντικό κριτήριο κατά το στάδιο βαθμονόμησης των αισθητηρίων, καθώς με βάση τη τάση που αντιστοιχεί στο ελάχιστο σημαντικό ψηφίο (LSB) κρίνεται και η ακρίβεια του μετατροπέα. Εκ πρώτης όψης η επιλογή του ρυθμού μετάδοσης, φαντάζει εύκολη υπόθεση· η επιλογή της μέγιστης τιμής. Όμως θα πρέπει να ληφθεί σημαντικά υπόψη ότι το πλήθος των ψηφιακών δειγμάτων που λαμβάνονται από κάθε είσοδο, καθορίζει και το μέγιστο εύρος ζώνης των σημάτων που μπορεί να καταγράψει το σύστημα, αύξηση του οποίου προκαλεί διεύρυνση του όγκου της ψηφιακής πληροφορίας και κατά επέκταση των απωλειών στην ποιότητα του σήματος λόγω της μετατροπής τους σε ψηφιακή μορφή με σημαντική αύξηση της πιθανότητας του ενός λάθους ανά bit (Bit Error Rate –BER). Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω και κατόπιν δοκιμών αποφασίστηκε να γίνει χρήση ανάλυσης των 14-bit.

4.5 Πρωτόκολλο Διασύνδεσης και Επικοινωνίας με το Μετατροπέα ADC

Η επικοινωνία με τον ψηφιακό μετατροπέα ADC προσφέρεται μέσω του πρωτοκόλλου διασύνδεσης I2C, ενός δημοφιλή τρόπου σειριακής επικοινωνίας συσκευών χαμηλής ταχύτητας και διπλής κατεύθυνσης. Ο μετατροπέας έχει μόνο τον ρόλο του “υποτελή” (slave) ο οποίος αναμένει την καθοδήγηση της “κύριας” (master) συσκευής, που στη προκειμένη περίπτωση το ρόλο αυτό κατέχει ο υπολογιστής Raspberry Pi 3B και ο οποίος ορίζει τις παραμέτρους επικοινωνίας. Για την επικοινωνία των δύο μετατροπέων ADC με το Raspberry χρησιμοποιούνται δύο αγωγοί: η γραμμή ρολογιού (SCL) και η γραμμή δεδομένων (SDA). Οι γραμμές αυτές συνδέονται σε όλες τις

συσκευές που υπάρχουν πάνω στο δίαυλο (bus) του I2C. Η θύρα I2C του Raspberry Pi χρησιμοποιεί τους ακροδέκτες GPIO2 (SDA) και GPIO3 (SCL) όπως φαίνεται στην *Εικόνα57*.

Στο σειριακό πρωτόκολλο I2C, η μετάδοση αρχίζει με την συνθήκη “START” ακολουθούμενη από το πακέτο διεύθυνσης (SLA + R/W), ένα ή περισσότερα πακέτα δεδομένων και τερματίζεται με την συνθήκη “STOP”. Ένα παράδειγμα τυπικής μετάδοσης δεδομένων μεταξύ μιας “master” και “slave” συσκευής φαίνεται στο διάγραμμα της παρακάτω *Εικόνας*.

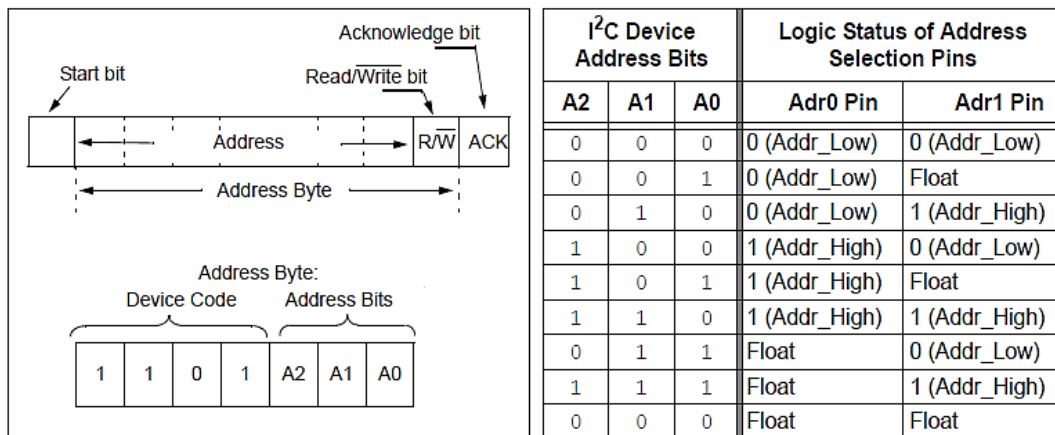


Εικόνα 57: I2C Δίαυλος Επικοινωνίας ADC

Ο κάθε μετατροπέας MCP3424 που συνδέεται στον I2C δίαυλο έχει μία μοναδική διεύθυνση, μεγέθους 7bits. Η διεύθυνση αυτή είναι προκαθορισμένη από τον κατασκευαστή, υπάρχει όμως η δυνατότητα επιλογής μιας μικρής σειράς διευθύνσεων από το χρήστη. Στην *Εικόνα58* παρουσιάζεται η δομή του byte διευθυνσιοδότησης του ψηφιακού μετατροπέα. Το *byte διεύθυνσης* περιλαμβάνει τον κωδικό συσκευής τεσσάρων (4) bits, τα τρία (3) bits διεύθυνσης και ενός ακόμη bit R/W. Ο κωδικός συσκευής προγραμματίζεται εργοστασιακά, δεν μπορεί να αλλάξει και είναι ο “1 1 0 1”. Τα bits διεύθυνσης I²C (A₂, A₁, A₀) διαμορφώνονται από το χρήστη και καθορίζονται από τη λογική κατάσταση των δύο ακίδων επιλογής εξωτερικής διεύθυνσης, pins Adr0 και Adr1 του κάθε ολοκληρωμένου, μέσω των smd αντιστάσεων R89 έως R96 όπως αναλύθηκε στην Ενότητα 4.3. Τα τρία αυτά bits διεύθυνσης I²C επιτρέπουν την σύνδεση έως και οκτώ όμοιων μετατροπέων στον ίδιο δίαυλο (bus) I²C. Τέλος το δυαδικό ψηφίο LSB “R/W” καθορίζει εάν το Raspberry Pi θέλει να διαβάσει τα δεδομένα μετατροπής ή να γράψει στον καταχωρητή διαμόρφωσης.

Για την επικοινωνία των ADC με το Raspberry Pi, ο τελευταίος ως “master” συσκευή πρέπει να καθορίσει, εκτός από τα δεδομένα που θα αποσταλούν, και τις παραμέτρους της επικοινωνίας, δηλαδή θα πρέπει να στείλει και την διεύθυνση της “slave”

συσκευής που θα συμμετέχει στην επικοινωνία (παραλήπτης). Για το λόγο αυτό, χρειάζεται να γνωρίζει εκ των προτέρων τη διεύθυνση που έχει οριστεί στον καθένα. Όταν η συσκευή λάβει το σωστό byte διεύθυνσης, εκπέμπει ένα bit επιβεβαίωσης (ACK) μετά το bit R/W. Προσοχή: κάθε συσκευή στο δίαυλο πρέπει να έχει μια μοναδική διεύθυνση, αν δύο συσκευές μοιράζονται την ίδια διεύθυνση τότε δημιουργείται “σύγκρουση” (conflict) και η λειτουργία των συσκευών διακόπτεται.



Εικόνα 58 : Δομή Byte διεύθυνσης του ADC [31]

Τα τρία (3) bits διεύθυνσης I2C (A_2 , A_1 , A_0) καθορίζονται από το χρήστη με βάση τη λογική κατάσταση των ακίδων επιλογής εξωτερικής διεύθυνσης, pins $Adr0$ και $Adr1$ του κάθε ολοκληρωμένου. Μέσω των smd αντιστάσεων $R89$ έως $R96$ του τυπωμένου κυκλώματος στο πρώτο μετατροπέα οι ακροδέκτες $Adr0$ και $Adr1$ οδηγούνται σε λογικό χαμηλό ($Adr0, Adr1=00$), ενώ στο δεύτερο οι παραπάνω ακροδέκτες οδηγούνται σε λογικό χαμηλό και λογικό υψηλό αντιστοίχως ($Adr0, Adr1=01$). Οι τελικές διευθύνσεις των δύο ψηφιακών μετατροπέων διαμορφώνονται με βάση το παρακάτω πίνακα. Για το μεν πρώτο μετατροπέα (U12) η διεύθυνση είναι “1101010” ενώ για τον δεύτερο (U13), η διεύθυνση είναι “1101000”.

Device Code				I2C Address Bits			←	Logic Status			
1	1	0	1	A2	A1	A0		Adr0	Adr1		
1	1	0	1	0	0	0	←	0	0	x68	ADC MCP3424 (U13)
1	1	0	1	0	1	0	←	0	1	x6a	ADC MCP3424 (U12)

Πίνακας 6 : Διαμόρφωση διευθύνσεων μετατροπέων ADC

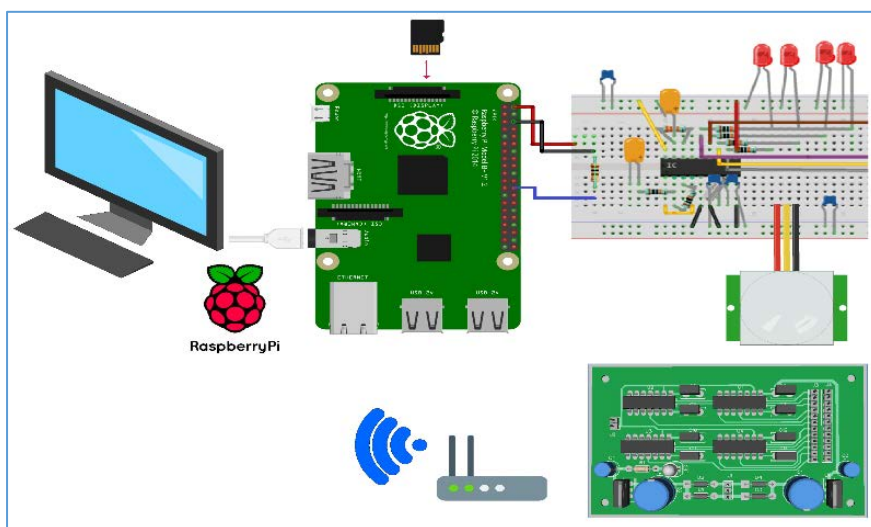
Η λειτουργία και η επικοινωνία του ADC με το Raspberry Pi πραγματοποιείται με τη συγγραφή κώδικα σε γλώσσα προγραμματισμού Python. Ο πηγαίος κώδικας και η χρησιμοποιούμενη βιβλιοθήκη παρουσιάζονται στο Παράρτημα E [30], μαζί με τον συνολικό πηγαίο κώδικα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΨΗΦΙΑΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Η πληροφορία που λαμβάνεται από τα κυκλώματα οδήγησης των αναλογικών αισθητήριων μέσω του μετατροπέα ADC, μετατρέπεται σε ψηφιακή μορφή και μεταφέρεται στη ψηφιακή διάταξη, όπου με την εισαγωγή των πινάκων βαθμονόμησης των αισθητήρων και μέσω κατάλληλου προγραμματισμού επιτυγχάνεται η μελλοντική αποθήκευση, απεικόνιση ή περαιτέρω ανάλυση και μετάδοση των δεδομένων. Η υλοποίηση της Ψηφιακής Διάταξης γίνεται μέσω του υπολογιστή Raspberry Pi και συγκεκριμένα της έκδοσης “Raspberry Pi 3”. Ο κύριος λόγος επιλογής του συγκεκριμένου υπολογιστή, έναντι άλλων μικροϋπολογιστών και μικρό-ελεγκτών, είναι ότι πρόκειται για έναν πλήρη υπολογιστή “τσέπης”, οικονομικό σε σχέση με την επεξεργαστική ισχύ που προσφέρει, διαθέτει σύνδεση ηλεκτρονικού υλικού με ενσωματωμένα διαθέσιμα πρωτόκολλα επικοινωνίας (UART, I2C, SPI) και είναι εύκολα επεκτάσιμος.

Χάρη στον ενσωματωμένο προγραμματιζόμενο μικροελεγκτή με τους ακροδέκτες εισόδου/εξόδου γενικής χρήσης (General Purpose Input / Output pins - GPIO) να είναι προσβάσιμοι, αποτελεί ένα σπουδαίο αναπτυξιακό εργαλείο (development board) για ενσωματωμένα συστήματα διαφόρων αυτοματισμών. Ο πηγαίος κώδικας που απαιτείται για embedded προγραμματισμό είναι γραμμένος σε γλώσσα συνήθως Python ή C, οι δε χρησιμοποιούμενες εφαρμογές είναι εγκατεστημένες στη κάρτα μνήμης που διαθέτει. Επιπλέον οι πολύ μικρές του διαστάσεις 86x54x17[mm] με το βάρος του μόλις στα 45gr, μαζί με την υπολογιστική ισχύ που παρέχει, επιβεβαιώνουν γιατί το Raspberry Pi το καθιστούν ιδανικό στοιχείο συστημάτων αυτοματισμού, αποτελώντας την “καρδιά” του συστήματος, παρέχοντας παράλληλα τη δυνατότητα ασύρματης δικτύωσης και μετάδοσης δεδομένων, ακόμη και τηλεπίβλεψης [33].



Εικόνα 59: Υλοποίηση ΗΝ Κυκλωμάτων και Αυτοματισμών μέσω Raspberry Pi

5.1 Raspberry Pi, ένας υπολογιστής τσέπης

Το Raspberry Pi είναι μία σειρά υπολογιστών “τσέπης”, χαμηλού κόστους, και ανοικτού κώδικα (open hardware) το οποίο αναπτύσσεται στο Ηνωμένο Βασίλειο από τη Raspberry Pi Foundation, μία μη κερδοσκοπική οργάνωση. Βασίζεται κυρίως σε λειτουργικό “Linux” και κυκλοφορεί στην αγορά για πρώτη φορά το 2012, με χρηματοδότηση του πανεπιστημίου του Cambridge, με σκοπό να κεντρίσουν το ενδιαφέρον των μαθητών στα σχολεία σχετικά με τον προγραμματισμό, παρέχοντας ένα χαμηλού κόστους μικρο-υπολογιστή [34].

Το Raspberry Pi είναι ένας μικροσκοπικός πλήρης υπολογιστής σε μέγεθος περίπου μιας πιστωτικής κάρτας. Κάνει χρήση του λεγόμενου System On a Chip (SoC), ενσωματώνοντας CPU και GPU σε ένα ολοκληρωμένο, όπου μαζί με τη μνήμη RAM, τα USB ports και όλα τα υπόλοιπα ηλεκτρονικά στοιχεία να βρίσκονται πάνω στο ίδιο τυπωμένο κύκλωμα, το χαρακτηρίζει ως ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή SBC (Single Board Computer). Δεν απαιτεί μεγάλη κατανάλωση ενέργειας (μόλις 4W), ικανό να λειτουργεί και με έναν συμβατό φορτιστή κινητού τηλεφώνου.

Τα χαρακτηριστικά της βασικής πρώτης έκδοσης του Pi (Pi Zero W) μοιάζουν πολύ με εκείνα ενός παλαιότερης γενιάς smartphone. Διαθέτει έναν τετραπύρηνo ARM επεξεργαστή, 1GB μνήμη RAM καθώς και ασύρματη σύνδεση Wi-Fi και Bluetooth. Το λειτουργικό του σύστημα καθώς και τα προγράμματα προς χρήση είναι εγκατεστημένα σε μία κάρτα micro SD. Επιπλέον διαθέτει θύρα HDMI για χρήση οθόνης, καθώς και δύο (2) θύρες USB για σύνδεση περιφερειακών και εξωτερικού σκληρού δίσκου. Η ειδοποιός διαφορά του σε σχέση με ένα Android τηλέφωνο, είναι ότι στο Pi μπορεί κανείς να εγκαταστήσει το δικό του λειτουργικό σύστημα μετατρέποντάς το σε ένα Android TV-Box, ή σε ένα Linux desktop, χρησιμοποιώντας το ως έναν Backup & VPN Server, ή μία απλή παιχνιδο-μηχανή, ενώ με τους ακροδέκτες γενικής χρήσης (GPIO) του μικροελεγκτή να είναι προσβάσιμοι, το καθιστούν ως ένα σπουδαίο αναπτυξιακό εργαλείο (development board) [33], [34].

Η τελευταία έκδοση του Raspberry Pi4, έχει ήδη κυκλοφορήσει με μικρό κόστος αγοράς, διατηρώντας ταυτόχρονα την συμβατότητα με τις παλιότερες εκδόσεις και έχοντας παρόμοια κατανάλωση ενέργειας. Διαθέτει έναν ταχύτερο επεξεργαστή quad-core 64bit στα 1.5GHz τύπου ARM όπου σε συνδυασμό με τη μνήμη RAM LPDDR4 έως και 4GB, δίνουν απόδοση συγκρίσιμη με τα επιτραπέζια H/Y x86 σε entry-level. Σημαντικά ταχύτερη εκκίνηση και πολύ καλή απόδοση για εργασίες που απαιτούν μεγάλη υπολογιστική ισχύ από την CPU, όπως η εξομοίωση και χρήση του κέντρου πολυμέσων. Μέσω της διπύρηνης κάρτας γραφικών και με διπλή micro-HDMI, παρέχεται υποστήριξη ανάλυσης οθόνης 4K και δυνατότητα ταυτόχρονης χρήσης δύο οθονών υψηλής ευκρίνειας και ανάλυσης. Διαθέτει Ακόμη τέσσερις (4) USB Θύρες (usb 2.0 και 3.0) καθώς και δυνατότητα ενσύρματης δικτύωσης (Ethernet) [33], [34].

5.1.1 Βασική Αρχιτεκτονική και Τεχνικά Χαρακτηριστικά του Raspberry Pi 3B

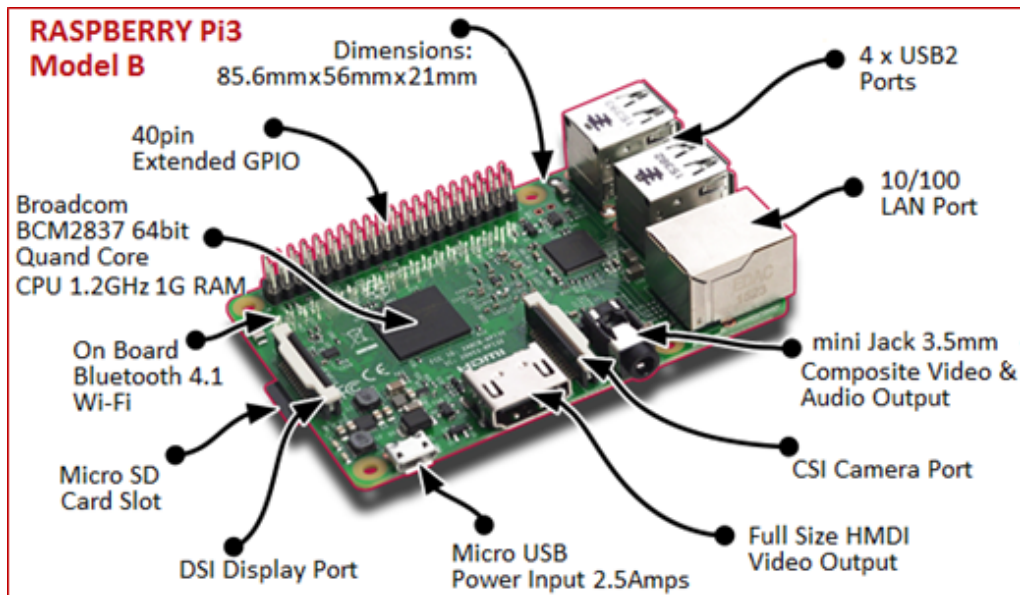
Όπως αναφέρθηκε, για την υλοποίηση της ψηφιακής διάταξης γίνεται χρήση του Raspberry Pi 3B. Η έκδοση αυτή, χρησιμοποιεί ένα System-On-Chip Broadcom BCM2837, το οποίο περιλαμβάνει έναν τετραπύρην 64-bit επεξεργαστή ARM Cortex-A53, ο οποίος «τρέχει» στα 1.2GHz έχοντας μία κοινή κρυφή μνήμη L2 cache μεγέθους 512KB. Είναι σχεδιασμένος για ενσωματωμένες εφαρμογές και συνδυάζει υψηλή απόδοση με μικρή πολυπλοκότητα και χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Το μοντέλο είναι πλήρως διαμορφώσιμο και ιδανικό για σχεδίαση συστήματος σε ψηφίδα (SoC), με προσβάσιμους τους ακροδέκτες εισόδου/εξόδου γενικής χρήσης (GPIO) που διαθέτει μέσω ενός 40pin συνδετήρα (connector). Η παραμετροποίηση και η υλοποίηση γίνεται μέσα από φιλικά προς τον χρήστη εργαλεία που παρέχει η εταιρεία. Διαθέτει 1 GB μνήμη LPDDR2-900SDRAM ενώ η κάρτα γραφικών είναι η Broadcom VideoCore IV, ικανή για την απεικόνιση εικόνας σε ανάλυση HD [35].

Στα βασικά χαρακτηριστικά του, περιλαμβάνονται τέσσερις θύρες USB για τη διασύνδεση περιφερειακών συσκευών, υποδοχή κάρτας microSD για την εγκατάσταση λειτουργικού συστήματος και εφαρμογών, θύρα για σύνδεση κάμερας καθώς και έξοδοι HDMI και mini jack. Διαθέτει ασύρματο δίκτυο μέσω Wi-fi LAN 802.11b/g/n και Bluetooth 4.1 καθώς και ενσύρματη διασύνδεση μέσω Gigabit Ethernet θύρας. Η τροφοδοσία του συστήματος 5V/2.5A παρέχεται από τη διαθέσιμη micro-USB [35].

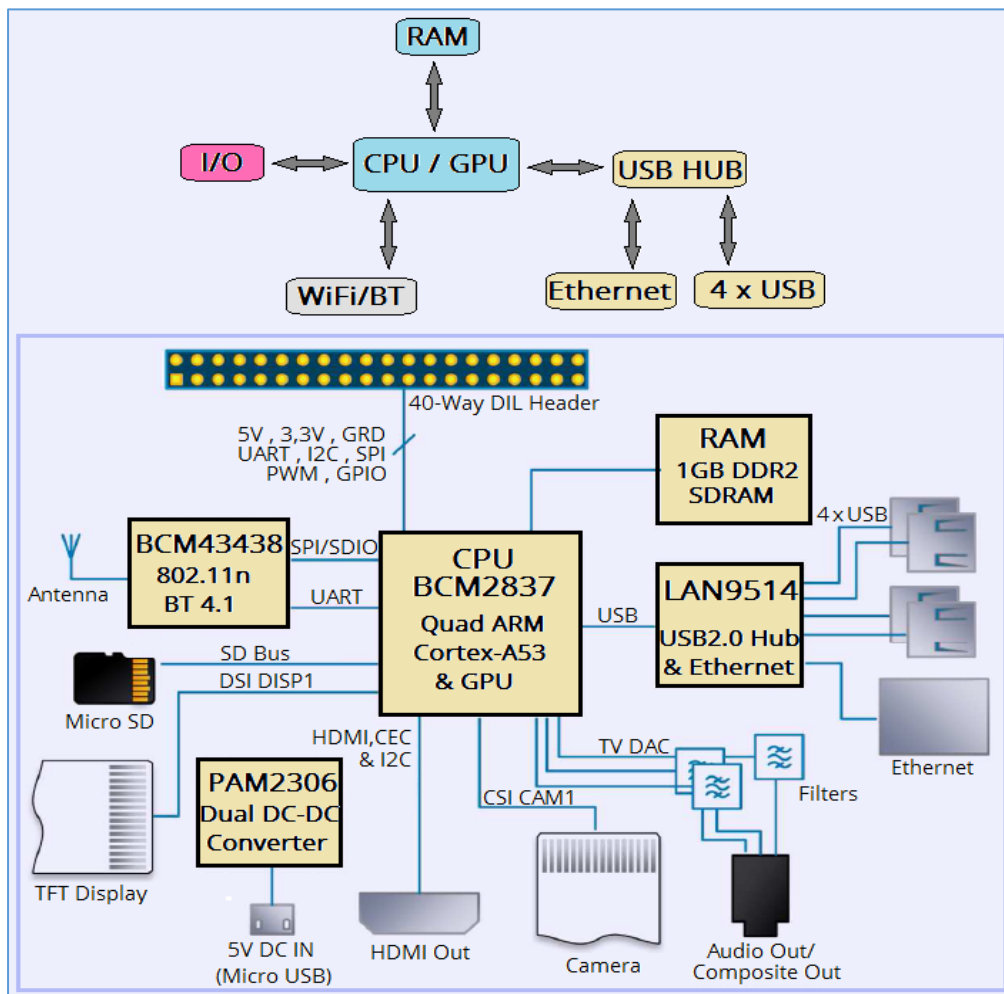
Στον παρακάτω *Πίνακα* αναφέρονται συνοπτικά όλα τα τεχνικά χαρακτηριστικά του Raspberry Pi 3B, ενώ στις *Εικόνες* που ακολουθούν απεικονίζονται αντίστοιχα η κατασκευαστική και αρχιτεκτονική του δομή.

Χαρακτηριστικά Raspberry Pi 3B :	
<u>Επεξεργαστής</u> <ul style="list-style-type: none">• Broadcom BCM2387 chipset.• 1.2GHz Quad-Core ARM Cortex-A53 (64Bit)	<u>Μνήμη</u> <ul style="list-style-type: none">• 1GB LPDDR2 – 900SDRAM
<u>Γραφικά</u> <ul style="list-style-type: none">• Dual Core VideoCore IV® Multimedia Co-Processor.• Provides Open GL ES 2.0, hardware-accelerated OpenVG, and 1080p30 H.264 decode.	
<u>Συνδεσιμότητα</u> <ul style="list-style-type: none">• Ethernet 10/100 BaseT Ethernet socket• Wireless LAN 802.11 b/g/n• Bluetooth 4.1• USB 4 x USB2.0• GPIO Connector : 40-pin 2.54 mm (100 mil) expansion header: 2x20 strip• Camera Connector / 15-pin MIPI Camera Serial Interface (CSI-2)• Memory Card Slot / Push/pull Micro SDIO• Video / Audio Output<ul style="list-style-type: none">○ HDMI (rev 1.3 & 1.4)○ Composite RCA (PAL and NTSC)○ Audio Output 3.5mm jack	
<u>Λειτουργικό Σύστημα</u> <ul style="list-style-type: none">• Boots from Micro SD card,• Running a version of the Linux oper. system	<u>Τροφοδοσία</u> <ul style="list-style-type: none">• Micro USB socket 5V / 2.5A

Πίνακας 7: Τεχνικά Χαρακτηριστικά του Raspberry Pi 3B



Εικόνα 60 : Κατασκευαστική Δομή του Raspberry Pi 3B [33]

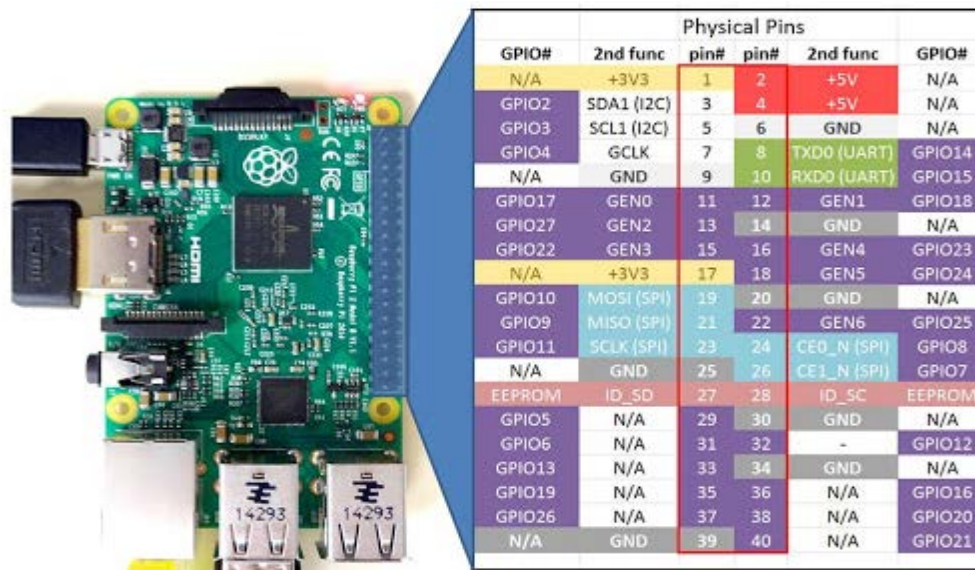


Εικόνα 61 : Βασική Αρχιτεκτονική του Raspberry Pi 3B [36]

5.1.2 Ακροδέκτες Γενικής Χρήσης του Raspberry Pi

Το Raspberry Pi διαθέτει ενσωματωμένο προγραμματιζόμενο μικροελεγκτή, με τις ακίδες ψηφιακής εισόδου/εξόδου γενικής χρήσης (General Purpose Input / Output pins - GPIO) να είναι προσβάσιμες για την διασύνδεση διαφόρων αισθητηρίων και άλλων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, αναδεικνύοντας το ως ένα ιδανικό αναπτυξιακό εργαλείο (development board) για embedded συστήματα σε διάφορους αυτοματισμούς.

Από την έκδοση του Raspberry Pi2 και μετ' έπειτα, διατίθενται συνολικά (40) GPIO από τις οποίες οι (26) είναι προγραμματιζόμενες. Όπως διακρίνεται και στην *Εικόνα62* ο κάθε ακροδέκτης (ακίδα) του 40-Expansion Pin-Header εκτελεί συγκεκριμένη λειτουργία.



GPIO#	2nd func	Physical Pins				GPIO#
		pin#	pin#	2nd func	pin#	
N/A	+3V3	1	2	+5V	N/A	
GPIO2	SDA1 (I2C)	3	4	+5V	N/A	
GPIO3	SCL1 (I2C)	5	6	GND	N/A	
GPIO4	GCLK	7	8	TXD0 (UART)	GPIO14	
N/A	GND	9	10	RXD0 (UART)	GPIO15	
GPIO17	GEN0	11	12	GEN1	GPIO18	
GPIO27	GEN2	13	14	GND	N/A	
GPIO22	GEN3	15	16	GEN4	GPIO23	
N/A	+3V3	17	18	GEN5	GPIO24	
GPIO10	MOSI (SPI)	19	20	GND	N/A	
GPIO9	MISO (SPI)	21	22	GEN6	GPIO25	
GPIO11	SCLK (SPI)	23	24	CE0_N (SPI)	GPIO8	
N/A	GND	25	26	CE1_N (SPI)	GPIO7	
EEPROM	ID_SD	27	28	ID_SC	EEPROM	
GPIO5	N/A	29	30	GND	N/A	
GPIO6	N/A	31	32	-	GPIO12	
GPIO13	N/A	33	34	GND	N/A	
GPIO19	N/A	35	36	N/A	GPIO16	
GPIO26	N/A	37	38	N/A	GPIO20	
N/A	GND	39	40	N/A	GPIO21	

Εικόνα 62 : Ακροδέκτες GPIO του Raspberry Pi [37]

Συνολικά υπάρχουν πέντε (5) κύριες ομάδες ακροδεκτών (απεικονίζονται με διαφορετικό χρώμα) όπως φαίνονται στον παρακάτω πίνακα : Το Raspberry Pi 3B διαθέτει τέσσερις (4) ακροδέκτες που παρέχουν τροφοδοσία +5V και +3.3V, οκτώ (8) ακροδέκτες που χρησιμοποιούνται για γείωση (GND), δύο (2) ακροδέκτες δεσμευμένες ειδικού σκοπού (EEPROM) καθώς και είκοσι-έξι (26) ακροδέκτες γενικής χρήσης με δυνατότητα προγραμματισμού [33], [37].

#	Τύπος Θύρας	Ονομασία	Pin Ακροδεκτών
#1	Τροφοδοσία 5Volt	5V	2, 4
#2	Τροφοδοσία 3.3Volt	3.3V	1, 17
#3	Γείωση	GND	6, 9, 14, 20, 25, 30, 34, 39
#4	Ειδικές θύρες I2C EEPROM	ID_SD, ID_SC	27, 28
#5	Γενικής Χρήσης Προγραμματιζόμενες Εισόδου - Εξόδου	GPIO	3, 5, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 26, 29, 31, 32, 33, 35, 36, 37, 38, 40

Πίνακας 8 : Ακροδέκτες GPIO του Raspberry Pi

Οι (26) ακροδέκτες γενικής χρήσης GPIO χωρίζονται σε (4) υποκατηγορίες με δυνατότητα αναπροσαρμογής και παραμετροποίησής τους ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής και του τρόπου διασύνδεσης και επικοινωνίας του Raspberry Pi με άλλες συσκευές (όπως SPI, PWM, I²C, UART). Οι υποκατηγορίες αυτές είναι οι εξής :

	Τύπος Θύρας	Ονομασία	Pin Ακροδεκτών
#5.1	UART	TXD , RXD	8 , 10
#5.2	I2C	SDA , SCL	3 , 5
#5.3	SPI	MOSI , MISO , SCLK , CE0 , CE1	19 , 21 , 23 , 24 , 26
#5.4	GPIO	GPIO	7 , 8 , 10 , 11 , 12 , 13 , 15 , 16 , 18 , 22 , 29 , 31 , 32 , 33 , 35 , 36 , 37 , 38 , 40

Πίνακας 9 : Ακροδέκτες GPIO του Raspberry Pi (εργοστασιακές ρυθμίσεις)

Υπάρχουν δυο τρόποι αναφοράς στους ακροδέκτες γενικής χρήσης: ο ένας τρόπος είναι αναφέροντας τη φυσική σειρά των ακροδεκτών GPIO (BOARD), ενώ ο δεύτερος είναι προσδιορίζοντας τον αριθμό σειράς BCM των ακροδεκτών μαζί με το πρόθεμα GPIO στο τέλος. Το πλεονέκτημα της φυσικής αναφοράς είναι ότι γίνεται κοινή χρήση των ίδιων ακροδεκτών σε όλες τις εκδόσεις του Raspberry. Γενικά, κατά τον προγραμματισμό των ακροδεκτών, θα πρέπει να αναφέρεται ποιος από τους δύο τρόπους αρίθμησης χρησιμοποιείται (BOARD or BCM).

Τα επίπεδα τάσης του κάθε ακροδέκτη γενικής χρήσης GPIO είναι στα +3.3V με μικρά σχετικά ρεύματα από 2 έως 16mA. Για το λόγο αυτό, για εφαρμογές όπου απαιτούνται μεγαλύτερες τάσεις και επίπεδα ρεύματος, θα πρέπει να αποφεύγεται η απ' ευθείας διασύνδεση των εξαρτημάτων πάνω στους ακροδέκτες των GPIO, αλλά να γίνεται χρήση ενδιάμεσης εξωτερικής πλακέτας με κατάλληλους απομονωτές (buffers) και μετατροπείς αναλογικών εισόδων/εξόδων (analog I/O). Απαιτείται λοιπόν ιδιαίτερη προσοχή στη διασύνδεση των συσκευών και η γνωστοποίηση των επιπέδων τάσεων και ρευμάτων, καθώς το Raspberry δεν παρέχει καμία προστασία λόγω υπερφόρτισης [38].

Όσον αφορά τους ακροδέκτες τροφοδοσίας, για εκείνους που παρέχουν τάση +3.3V, η μέγιστη επιτρεπόμενη αντοχή ρεύματος είναι στα 50mA. Αντιθέτως οι ακροδέκτες τροφοδοσίας των +5V επιτρέπουν λήψη ρεύματος πολύ μεγαλύτερη, της τάξης των 300-400mA, καθώς η πηγή τροφοδοσίας τους προέρχεται απ' ευθείας από την τροφοδοσία του micro-USB, με αποτέλεσμα το ρεύμα που είναι διαθέσιμο να είναι εκείνο της τροφοδοτικής διάταξης μείον το ρεύμα που χρησιμοποιείται για τη λειτουργία του Raspberry Pi [33] [38].

Οι ακροδέκτες γενικής χρήσης GPIO πρέπει να ορίζονται ως ψηφιακοί εισοδοί ή έξοδοι πριν τη χρήση τους. Ο πιο εύκολος τρόπος είναι μέσω της γλώσσας Python (Code Project). Οι περισσότεροι ακροδέκτες συνδέονται άμεσα με το Broadcom chip. Είναι εξαιρετικά σημαντικό να γίνεται κατάλληλος σχεδιασμός και ρύθμιση των στοιχείων που θα συνδεθούν στα pins για την αποφυγή μόνιμης βλάβης του Raspberry Pi. Απλά

εργαλεία όπως ένα πολύμετρο και προσεκτικός έλεγχος της καλωδίωσης καθώς και η χρήση αντιστατικών βραχιολιών προς αποφυγή στατικού ηλεκτρισμού, εξασφαλίζουν τη σωστή λειτουργία του Raspberry Pi.

Στο παρακάτω πίνακα αναφέρονται οι τεχνικές προδιαγραφές των ακροδεκτών γενικής χρήσης [38] :

GPIO Input/Output Pin electrical characteristics	
Output low voltage V_{OL}	< 0.66V
Output high voltage V_{OH}	>2.64V
Input low voltage V_{IL}	<0.54V
Input high voltage V_{IH}	>2.31V
Schmitt trigger Input low threshold V_{T-}	1.09V – 1.16V
Schmitt trigger Input high threshold V_{T+}	2.24V – 2.74V
Pull-up/down Resistance	40k – 65k
Pull-up/down Current	<50 μ A
Pin Capacitance	5pF

Πίνακας 10: Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά Ακροδεκτών γενικής χρήσης GPIO








5.1.3 Πρωτόκολλα Επικοινωνίας και Διασύνδεσης με άλλες Συσκευές

Οι τρεις πρώτες υποκατηγορίες ακροδεκτών GPIO's του Πίνακα 9 αναφέρονται σε συγκεκριμένες λειτουργίες και υποστηριζόμενα πρωτόκολλα που επιτρέπουν την επικοινωνία και σειριακή διασύνδεση του Raspberry Pi με άλλες συσκευές. Συγκεκριμένα τα υποστηριζόμενα πρωτόκολλα διασύνδεσης του είναι τα εξής [38] :

1. UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) : Πρόσβαση σε σειριακή κονσόλα και μετάδοση δεδομένων κατά τη σειριακή ασύγχρονη σύνδεση. Η επικοινωνία γίνεται δια μέσου του πρωτοκόλλου RS-232, RS-422 ή RS-485 [42] .
2. I2C (Inter-Integrated Circuit) : Σειριακός δίαυλος (bus) για την διασύνδεση περιφερειακών μικρής ταχύτητας σε μητρικές κάρτες, ενσωματωμένα συστήματα, κινητά τηλέφωνα και άλλες ηλεκτρονικές συσκευές. Ο δίαυλος I2C δεν χρησιμοποιείται μόνο για την επικοινωνία συσκευών που βρίσκονται πάνω σε ένα τυπωμένο κύκλωμα, αλλά και για την επικοινωνία συσκευών μέσω ενσύρματης δικτύωσης [42].
3. SPI (Serial Peripheral Interface Bus) : Το SPI όπως και το I2C αναπτύχθηκε με σκοπό την εύκολη επικοινωνία και τον καλύτερο τρόπο διασύνδεσης μεταξύ ενός ή περισσότερων περιφερειακών μονάδων και μικροελεγκτών. Το Πρωτόκολλο SPI επιτρέπει την σειριακή σύγχρονη, αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ συσκευών. Η επικοινωνία επιτυγχάνεται μεταξύ τους σε λειτουργία Master/Slave. Η κάθε μετάδοση δεδομένων συγχρονίζεται από ένα χρονικό παλμό ρολογιού [42].

5.1.4 Λειτουργικά Συστήματα

Το Raspberry Pi χρησιμοποιεί κυρίως λειτουργικά συστήματα που βασίζονται σε Linux. Παρέχεται κατάλληλο “install manager” το οποίο ονομάζεται NOOBS (New Out of Box Software) και περιέχει διάφορα λειτουργικά συστήματα. Για πιο εξειδικευμένες εφαρμογές μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας μεταγλωττιστής (compiler) για ARM επεξεργαστές. Η εγκατάσταση του λειτουργικού συστήματος γίνεται στη micro SD κάρτα που διαθέτει το Raspberry Pi. Η σημαντικότερη καινοτομία του Raspberry Pi4 είναι ότι εκτός από διάφορες διανομές Linux, μπορεί να “τρέξει” και λειτουργικό Windows 10, το οποίο μάλιστα διατίθεται δωρεάν για τη συσκευή μέσω του Windows Developer Program for IoT. Όλα τα λειτουργικά συστήματα συνοδεύονται με το λογισμικό “Mathematica” και παρέχονται διάφοροι τύποι κειμενογράφων.

NOOBS	Τίτλος	Περιγραφή
	Raspbian Pi	Το επίσημο λειτουργικό σύστημα του Raspberry
	Windows 10 IOT Core	Windows 10 για το Internet of things
	LibreElec	Linux λειτουργικό προσαρμοσμένο για να τρέξει το KODI
	Ubuntu mate	Λειτουργικό σύστημα Ubuntu
	PINET	Λειτουργικό σύστημα διαχείρισης τάξης
	OSMC	Media centre ανοιχτού κώδικα
	RISC OS	Λειτουργικό σύστημα για ARM επεξεργαστές

Εικόνα 63 : Λειτουργικά Συστήματα μέσω Noobs για RPi [38]

Τα λειτουργικά συστήματα που είναι διαθέσιμα για το Raspberry Pi είναι :

- Το Raspbian, μια παραλλαγή του Debian αποκλειστικά για RPi.
- Το LibreELEC, μια έκδοση του Kodi.
- Το OSMC, ίδια λειτουργικότητα με το Kodi αλλά διαφορετικό περιβάλλον.
- Το RISC OS, λειτουργικό σύστημα για ARM επεξεργαστές.
- Το Ubuntu mate, πλήρες λειτουργικό Linux
- Το Windows 10 IoT Core, μία light έκδοση των windows 10.

Για την υλοποίηση της συγκεκριμένης εφαρμογής γίνεται χρήση του λειτουργικού συστήματος *Raspbian OS*, βασιζόμενο σε μία παραλλαγή του Debian Linux, απόλυτα συμβατό και βελτιστοποιημένο για τον Raspberry Pi. Περιλαμβάνει ένα παραθυρικό γραφικό περιβάλλον εργασίας (GUI) που ονομάζεται PIXEL, εργαλεία περιήγησης στο Internet (Midori) και εργαλεία προγραμματισμού σε γλώσσα C, Python και Scratch. Προεγκατεστημένα υπάρχουν πολλά προγράμματα όπως: File Manager, Task Manager, Image Viewer, Leafpad (notepad), LXTerminal (γραμμή εντολών Linux), Root Terminal, και Xarchiver (συμπίεση αρχείων) [33], [38] .

5.2 Η Γλώσσα Προγραμματισμού Python

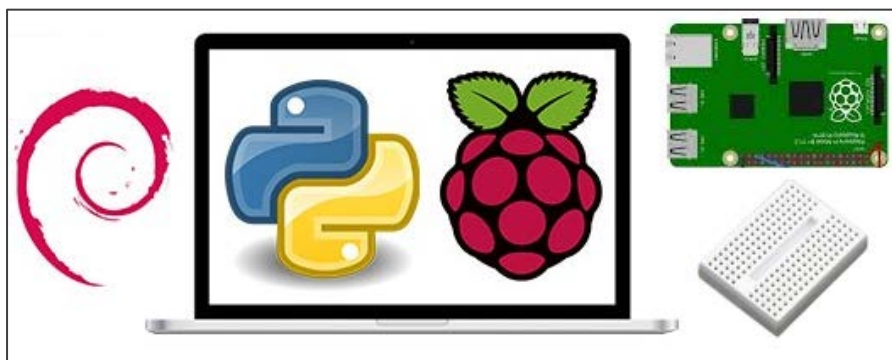
Ο πηγαίος κώδικας που απαιτείται για την συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων που προέρχονται από τους αισθητήρες, έχει γραφεί σε Python ενώ παράλληλα συμπεριλαμβάνονται και έτοιμες βιβλιοθήκες που αφορούν το Raspberry Pi.

Η Python είναι μια γλώσσα προγραμματισμού ανοικτού κώδικα, υψηλού επιπέδου και γενικού σκοπού. Είναι εύκολη στην εκμάθηση με απλό συντακτικό, που μπορεί να υποστηρίξει τόσο το διαδικαστικό (procedural programming) όσο και το αντικειμενοστραφές προγραμματισμό (object-oriented programming) [39]. Μέσω του ολοκληρωμένου γραφικού περιβάλλον ανάπτυξης (IDE) με ενσωματωμένο κειμενογράφο, την καθιστά ακόμη πιο προσιτή. Επιπλέον λόγω της μεγάλης ποικιλίας βιβλιοθηκών που διαθέτει, εξυπηρετεί πολύ την γραφή κώδικα για τέτοιου είδους εφαρμογές, κάνοντας χρήση του Raspberry Pi ως ψηφιακή διάταξη.

Οι διερμηνείς που διαθέτει είναι συμβατοί με πολλά λειτουργικά συστήματα επιτρέποντας στην Python την εκτέλεση κώδικα σε ευρεία γκάμα λειτουργικών συστημάτων (Windows, Linux, MacOS) με μεγάλη ευελιξία. Η χρήση του διερμηνέα της Python επιφέρει εύκολη προσθήκη επιπλέον λειτουργιών και άμεση διευκόλυνση στην κατανόηση από τρίτους της λειτουργίας του συστήματος. Βασικό μειονέκτημα αποτελεί η χαμηλή ταχύτητα εκτέλεσης των εντολών σε σύγκριση με εκείνες που παράγονται από μεταγλωττιστή, μειονέκτημα όπου στην προκειμένη εφαρμογή δεν αποτελεί πρόβλημα, καθώς οι μικρές καθυστερήσεις που μπορεί να υπάρξουν θεωρούνται αμελητέες [39].

Στο περιβάλλον του Raspberry (RPi) υπάρχει δυνατότητα εκτέλεσης εντολών της Python είτε μέσω του διερμηνευτή (pi@raspberrypi: ~ \$ python) είτε γράφοντας scripts σε κάποιο κειμενογράφο (editor) ή σε κάποιο περιβάλλον ανάπτυξης (idle).

Η παρουσίαση και ανάλυση του κώδικα που χρησιμοποιείται στην ψηφιακή διάταξη παρουσιάζεται στο *Παράρτημα Ε*. Εκεί, η ανάλυση πραγματοποιείται με την ομαδοποίηση και κατακερματισμό του κώδικα σε μικρότερα κομμάτια για καλύτερη σαφήνιά του [40], [41].



Εικόνα 64 : Raspbian & Python για embedded εφαρμογές με χρήση Raspberry Pi [38]

5.3 Βασικές Ρυθμίσεις του Raspberry Pi και Εγκατάσταση Βιβλιοθηκών

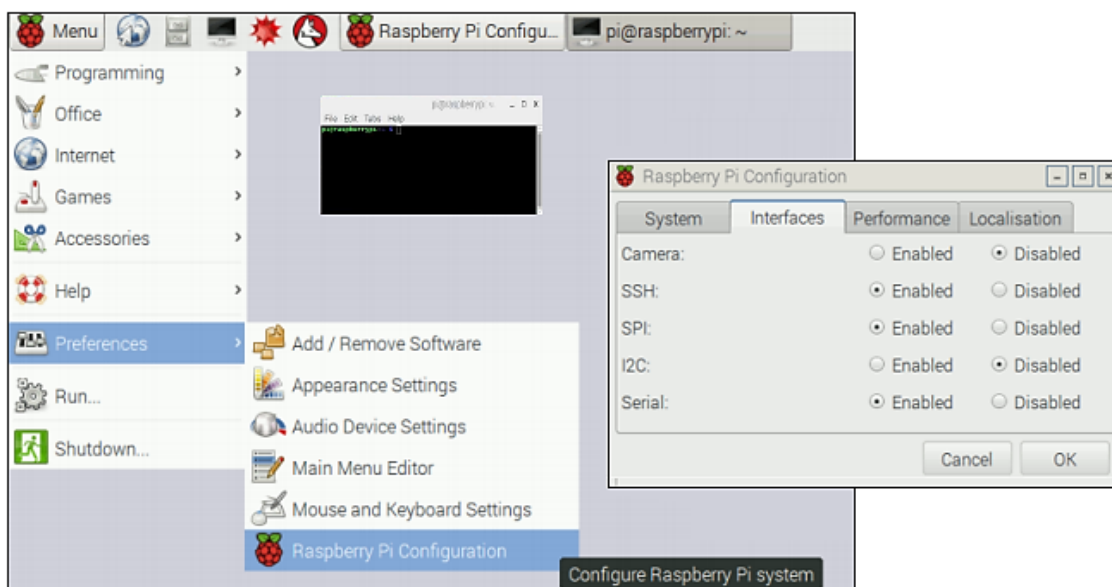
Για την εύρυθμη λειτουργία της ψηφιακής διάταξης απαιτείται αρχικά μία βασική παραμετροποίηση του υπολογιστή Raspberry Pi 3B.

Έτσι είναι απαραίτητο ο ορισμός στατικής ip διεύθυνσης και ενεργοποίησης του “Secure Shell” (SSH), ενός κρυπτογραφημένου δικτυακού πρωτόκολλου για την απομακρυσμένη επικοινωνία του Raspberry Pi. Επιπλέον με τον τρόπο αυτό δεν απαιτείται η χρήση οθόνης και πληκτρολογίου για τον χειρισμό του.

Για την άμεση επικοινωνία του RPi 3B με τον αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπέα (ADC) και για την διασύνδεση των χρησιμοποιούμενων ψηφιακών αισθητήρων, απαιτείται η ενεργοποίηση των σειριακών πρωτοκόλλων επικοινωνίας που διαθέτει όπως I2C, UART και SPI.

Εκτός από τη συγγραφή του πηγαίου κώδικα, απαραίτητη είναι η εγκατάσταση χρήσιμων βιβλιοθηκών για την διαχείριση του Raspberry Pi και την οδήγηση (drivers) εξαρτημάτων και συσκευών που συνδέονται με αυτόν. Διατίθενται έτοιμες βιβλιοθήκες σε γλώσσα Python με εφαρμογές και οδηγούς τόσο για το Raspberry Pi όσο και για άλλα αναπτυξιακά εργαλεία. Οι βιβλιοθήκες αυτές βρίσκονται στην ηλεκτρονική διεύθυνση https://github.com/abelectronicsuk/ABElectronics_Python_Libraries. Από τις βιβλιοθήκες αυτές ξεχωρίζουν: η *RPI.GPIO* όπου επιτρέπει την εύκολη διαμόρφωση και την εγγραφή/ανάγνωση των ακροδεκτών του Raspberry Pi, η *Wiring.Pi* η οποία παρέχει πρόσβαση στους ακροδέκτες του τσιπ BCM2837, καθώς και η βιβλιοθήκη *ADCDifferential.Pi* για την αναγνώριση και διαχείριση του μετατροπέας ADC [41].

Όλα τα παραπάνω, μαζί με την συγγραφή του πηγαίου κώδικα και την εισαγωγή των πινάκων βαθμονόμησης των αισθητηρίων, συντελούν στην βέλτιστη λειτουργία του συστήματος και παρουσιάζονται στο *Παράρτημα Ε*.

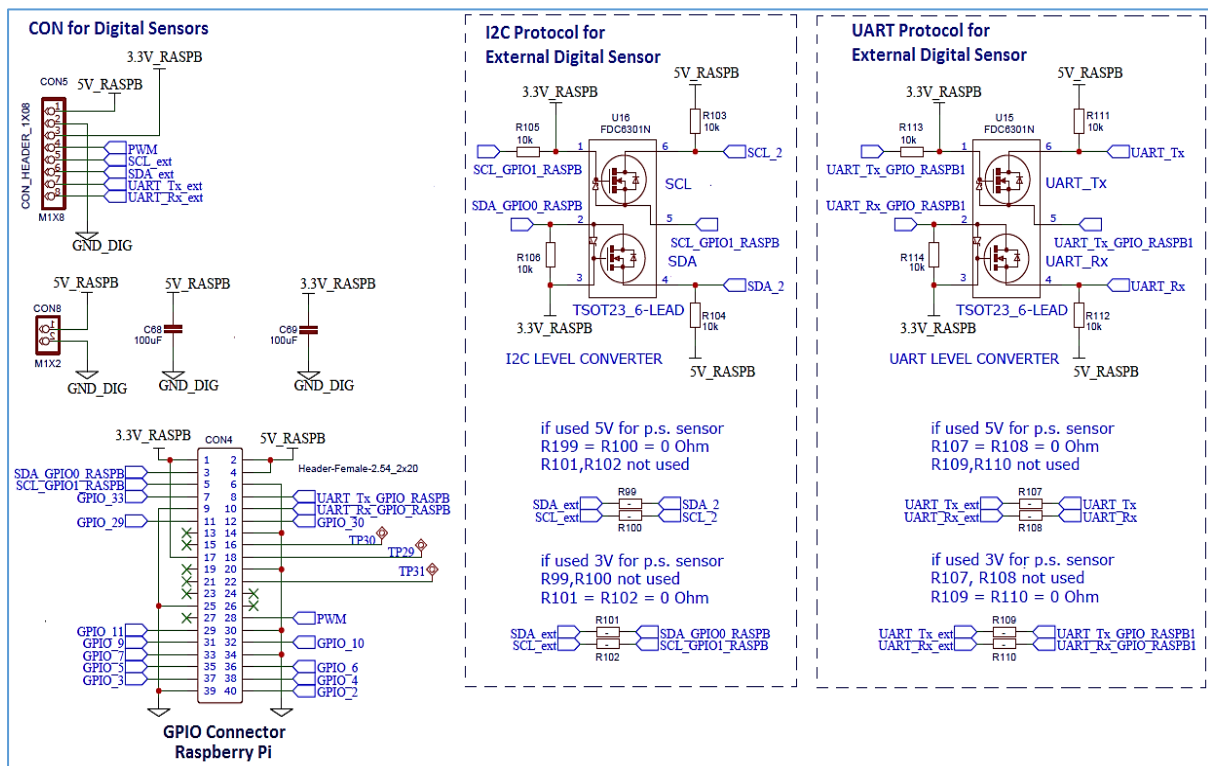


Εικόνα 65 : Περιβάλλον ρυθμίσεων του Raspberry Pi μέσω Raspbian

5.4 Κυκλώματα Οδήγησης Αισθητήριων Ψηφιακής Εξόδου

Λαμβάνοντας υπόψη ότι ένα μεγάλο πλήθος αισθητήριων που κυκλοφορούν στην αγορά είναι ψηφιακής εξόδου, το τυπωμένο κύκλωμα επέκτασης (pcb shield) έχει την δυνατότητα συλλογής δεδομένων από αισθητήρες αυτής της κατηγορίας, εκτός των οκτώ (8) αναλογικής εξόδου.

Πέρα του ενός ήδη εγκατεστημένου ψηφιακού αισθητήρα για την μέτρηση της θερμοκρασίας και υγρασίας πάνω στο ίδιο το τυπωμένο κύκλωμα, είναι εφικτό η ταυτόχρονη οδήγηση τριών (3) επιπλέον αισθητήριων ψηφιακής εξόδου, οι οποίοι δύναται να τροφοδοτούνται από το Raspberry Pi και να επικοινωνούν με αυτό χρησιμοποιώντας σειριακά πρωτόκολλα επικοινωνίας. Στην *Εικόνα66* φαίνεται το ηλεκτρονικό σχέδιο διασύνδεσης αισθητήρων ψηφιακής εξόδου που διαθέτει το τυπωμένο κύκλωμα επέκτασης.



Εικόνα 66 : Σχηματικό Διάγραμμα Διασύνδεσης Αισθητήρων Ψηφιακής Εξόδου με το Raspberry

Η διασύνδεση και η επικοινωνία των αισθητήρων ψηφιακής εξόδου με το Raspberry Pi επιτυγχάνεται με τον συνδετήρα CON5 επιλέγοντας ένα από τα τρία σειριακά πρωτόκολλα επικοινωνίας : PWM, UART ή I2C. Επίσης μέσω των συνδετήρων CON5 και CON8 είναι δυνατό η απ' ευθείας τροφοδότηση των αισθητήρων αυτών με τάσεις +5V ή +3.3V που παρέχει το ίδιο το Raspberry Pi. Όλοι οι ακροδέκτες τροφοδοσίας συνδέονται με ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές αποσύζευξης αλουμινίου (C68, C69) : 100uF ±20% / 16V SMD.

Το κάθε ολοκληρωμένο FDC6301N (*U15, U16*) αποτελεί το λογικό κύκλωμα προσαρμογής της τάσης εξόδου, παρέχοντας την δυνατότητα ρυθμιζόμενης θύρας διασύνδεσης μέσω UART και I2C αντιστοίχως από τα +5V στα +3.3V, γνωρίζοντας ότι η μέγιστη τάση λειτουργίας του κάθε ακροδέκτη γενικής χρήσης GPIO του Raspberry είναι τα +3.3V. Με τις smd αντιστάσεις *R99* έως *R102* και *R107* έως *R110*, γεωμετρίας r0603 σε ρόλο βραχυκυκλωτήρων (jumpers), δύναται όπου απαιτείται η διάθεση ή όχι των παραπάνω ολοκληρωμένων, ανάλογα με τη τάση λειτουργίας του εκάστοτε αισθητήρα. Οι αντιστάσεις *R99* έως *R102* καθορίζουν τη χρήση ή μη του I2C level converter, ενώ οι αντιστάσεις *R107* έως *R110* ορίζουν τη συμμετοχή ή όχι του UART level converter. Σε κάθε περίπτωση έχει προβλεφθεί η χρήση κατάλληλων αντιστάσεων pull-up (*R105-R106* και *R113-R114*) για την οδήγηση των σημάτων στους ακροδέκτες γενικής χρήσης του Raspberry Pi. Για παράδειγμα, στη περίπτωση σειριακής διασύνδεσης ενός αισθητήρα μέσω I2C πρωτοκόλλου, το οποίο τροφοδοτείται με τάση +3.3V, δεν απαιτείται η χρήση του λογικού κυκλώματος προσαρμογής (*U16*). Με τις αντιστάσεις $R101=R102= 0 \text{ Ohm}$ και θέτοντας εκτός τις αντιστάσεις *R99* και *R100*, ο I2C level converter παρακάμπτεται και το σήμα εξόδου του αισθητηρίου οδηγείται μέσω pull-up αντιστάσεων απ' ευθείας στο Raspberry Pi. Αναλυτικά ο τρόπος λειτουργίας των παραπάνω αντιστάσεων φαίνεται στο πίνακα που ακολουθεί.

Level Converter	Used	NOT Used
	<i>In case of 5V power supply</i>	<i>In case of 3.3V power supply</i>
I2C (U16)	R99 = R100 = 0 Ohm R101 , R102 Not used	R99 , R100 Not Used R101 = R102 = 0 Ohm
UART (U15)	R107 = R108 = 0 Ohm R109 , R110 Not used	R107 , R108 Not Used R109 = R110 = 0 Ohm

Πίνακας 11 : Διάθεση Κυκλωμάτων Προσαρμογής για πρωτόκολλα επικοινωνίας I2C και UART

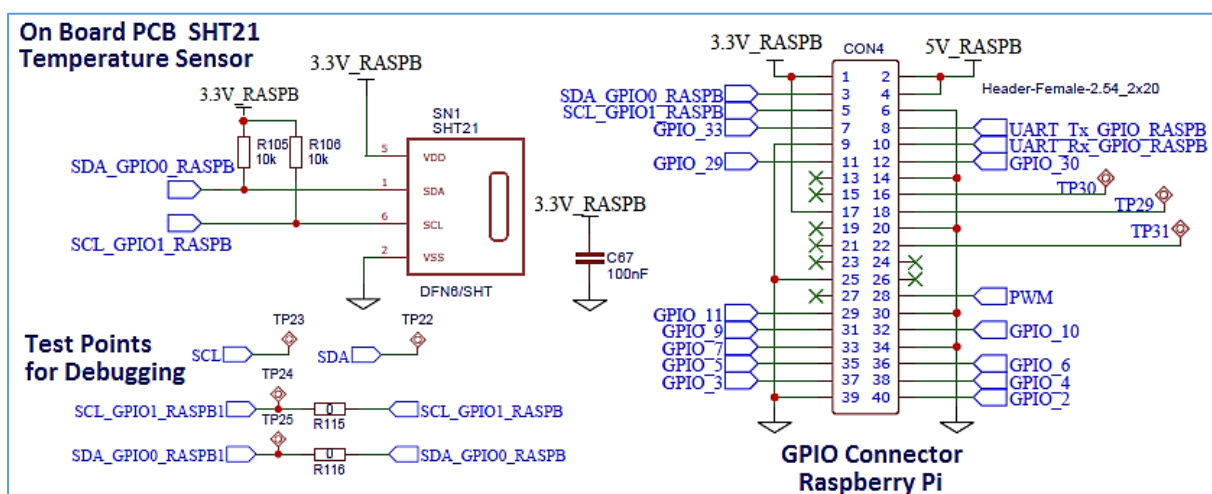
Η περίπτωση διασύνδεσης ψηφιακού αισθητήρα “one-wire” θεωρείται απλή. Εκτός από τους ακροδέκτες τροφοδοσίας, διαθέτει έναν μόνο ακροδέκτη σήματος, ο οποίος οδηγείται απ' ευθείας ή μέσω pull-up αντίστασης, σε κάποιον ακροδέκτη γενικής Χρήσης GPIO του Raspberry Pi. Προσοχή θα πρέπει να δοθεί στα επίπεδα τάσης και ρεύματος του κάθε ακροδέκτη γενικής χρήσης GPIO, όπως επισημάνθηκε στην Ενότητα 5.1.2 .

5.5 Έλεγχος Θερμοκρασίας του τυπωμένου κυκλώματος

Ο έλεγχος και η παρακολούθηση τόσο της θερμοκρασίας όσο και της υγρασίας του τυπωμένου κυκλώματος επιτυγχάνεται μέσω του αισθητήρα SHT21 της εταιρίας Sensirion. Πρόκειται για αισθητήριο ψηφιακής εξόδου, υψηλής ακρίβειας, ενσωματωμένο σε ολοκληρωμένο κύκλωμα επιφανειακής στήριξης (smd on board) το οποίο τοποθετείται πάνω στο τυπωμένο κύκλωμα και συγκεκριμένα στο πάνω μέρος του, προς βελτιστοποίηση της ακρίβειας των μετρήσεων που λαμβάνει.

Ο αισθητήρας SHT21 έχει δυνατότητα μέτρησης της θερμοκρασίας με εύρος από -40°C έως $+125^{\circ}\text{C}$ με σχετικό σφάλμα ± 0.3 και της σχετικής υγρασίας από 0 έως 100% RH με αντίστοιχο σφάλμα $\pm 2\%$. Η τάση τροφοδοσίας του κυμαίνεται από 2.1V έως 3.6V με προτεινόμενη εκείνη των $+3\text{V}$ [43]. Χάρη στις μικροσκοπικές του διαστάσεις και τη δομή της αρχιτεκτονικής του, παρουσιάζει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας ($3.2\mu\text{W}$ standby) καθιστώντας το κατάλληλο για σχεδόν οποιαδήποτε εφαρμογή. Διαθέτει ενσωματωμένο ψηφιακό μετατροπέα ADC με προγραμματιζόμενο ρυθμό δεδομένων μετάδοσης έως 60 SPS (14bit), απόλυτα συμβατό με τις περισσότερες αναπτυξιακές πλακέτες, όπως το Raspberry και Arduino, η επικοινωνία των οποίων επιτυγχάνεται μέσω πρωτοκόλλου I2C. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εν λόγω αισθητήρα παρουσιάζονται στην *Εικόνα68*.

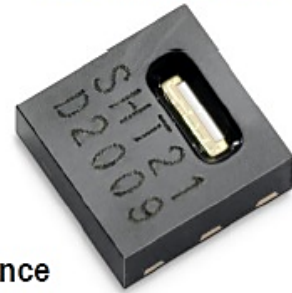
Παρακάτω στην *Εικόνα67*, φαίνεται το κυκλωματικό διάγραμμα που χρησιμοποιείται για την διασύνδεση του αισθητήρα SHT21 με το Raspberry Pi μέσω του συνδετήρα ακροδεκτών γενικής χρήσης (GPIO). Ο αισθητήρας διαθέτει τέσσερις (4) ακροδέκτες: δύο ακροδέκτες τροφοδοσίας για την παροχή των $+3.3\text{V}$, τάση που προέρχεται από το Raspberry Pi και άλλους δύο (2) ακροδέκτες “δεδομένων” (SDA) και “χρονισμού” (SCL) υπεύθυνοι για την επικοινωνία του αισθητήρα μέσω πρωτοκόλλου I2C (απαιτούνται αντιστάσεις pull-up). Για την επικοινωνία του με το Raspberry Pi, η 7-bit διεύθυνση του αισθητηρίου είναι η “1000000” [43]. Ο πυκνωτής C67 χρησιμοποιείται ως πυκνωτής αποσύζευξης και τοποθετείται κοντά στο αισθητήριο, ενώ υπάρχουν και σημεία ελέγχου (test points) για τον έλεγχο καλής λειτουργίας.



Εικόνα 67 : Σχηματικό Διάγραμμα Αισθητήρα Θερμοκρασίας SHT21

Datasheet SHT21

Humidity and Temperature Sensor IC



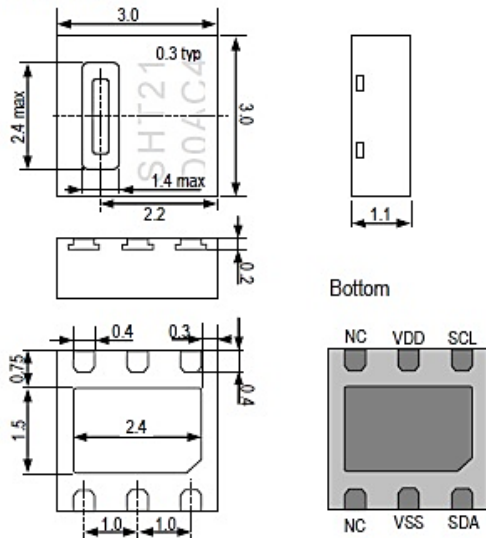
- Fully calibrated
- Digital output, I²C interface
- Low power consumption
- Excellent long-term stability
- DFN type package – reflow solderable

Product Summary

The SHT21 humidity and temperature sensor of Sensirion has become an industry standard in terms of form factor and intelligence: Embedded in a reflow solderable Dual Flat No leads (DFN) package of 3 x 3mm foot print and 1.1mm height it provides calibrated, linearized sensor signals in digital, I²C format.

The SHT2x sensors contain a capacitive type humidity sensor, a band gap temperature sensor and specialized analog and digital integrated circuit – all on a single CMOSens[®] chip. This yields in an unmatched sensor performance in terms of accuracy and stability as well as minimal power consumption.

Dimensions



Interface Specifications

Pin	Name	Comment
1	SDA	Serial Data, bidirectional
2	VSS	Ground
5	VDD	Supply Voltage
6	SCL	Serial Clock, bidirectional
3,4	NC	Not Connected

Sensor Performance

Relative Humidity

Parameter	Condition	Value	Units
Resolution ¹	12 bit	0.04	%RH
	8 bit	0.7	%RH
Accuracy tolerance ²	typ	±2	%RH
	max	see Figure 2	%RH
Repeatability		±0.1	%RH
Hysteresis		±1	%RH
Nonlinearity		<0.1	%RH
Response time ³	τ 63%	8	s
Operating Range	extended ⁴	0 to 100	%RH
Long Term Drift ⁵	Typ.	< 0.25	%RH/yr

Temperature

Parameter	Condition	Value	Units
Resolution ¹	14 bit	0.01	°C
	12 bit	0.04	°C
Accuracy tolerance ²	typ	±0.3	°C
	max	see Figure 3	
Repeatability		±0.1	°C
Operating Range	extended ⁴	-40 to 125	°C
Response Time ⁷	τ 63%	5 to 30	s
Long Term Drift ⁸	Typ.	< 0.02	°C/yr

Electrical Specification

Parameter	Condition	min	typ	max	Units
Supply Voltage, VDD		2.1	3.0	3.6	V
Supply Current, I _{DD} ⁶	sleep mode		0.15	0.4	μA
	measuring	200	300	330	μA
Power Dissipation ⁶	sleep mode		0.5	1.2	μW
	measuring	0.6	0.9	1.0	mW
	average 8bit		3.2		μW
Heater	VDD = 3.0 V	5.5mW, ΔT = + 0.5-1.5°C			
Communication	digital 2-wire interface, I ² C protocol				

Sensor Chip

SHT21 features a generation 4C CMOSens[®] chip. Besides the capacitive relative humidity sensor and the band gap temperature sensor, the chip contains an amplifier, A/D converter, OTP memory and a digital processing unit.

Εικόνα 68 : Τεχνικά Χαρακτηριστικά Ψηφιακού Αισθητήρα Θερμοκρασίας SHT-21 [43]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Στο παρόν Κεφάλαιο καταγράφεται η συνολική παρουσίαση του συστήματος καθώς και η διαδικασία υλοποίησης του εργαστηριακού τμήματος της διπλωματικής εργασίας. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στην υλοποίηση και έλεγχο καλής λειτουργίας δύο (2) κυρίως υποσυστημάτων: ενός υποσυστήματος ανίχνευσης δεδομένων αποτελούμενο από τους αισθητήρες και το τυπωμένο κύκλωμα επέκτασης (pcb shield) και ενός υποσυστήματος συλλογής και ελέγχου δεδομένων αποτελούμενο από τη ψηφιακή διάταξη και συγκεκριμένα από το Raspberry Pi 3B.

6.1 Υλοποίηση – Συναρμολόγηση Αναλογικής Διάταξης (pcb shield)

Λαμβάνοντας υπόψη την απαίτηση το τυπωμένο κύκλωμα επέκτασης να είναι τουλάχιστον τεσσάρων (4) επιπέδων (layers) προς αποφυγή φαινομένων θορύβου και παρεμβολών (Ενότητα 2.9), την ανάγκη χρήσης επιμεταλλωμένων οπών και με την εργαστηριακή υποδομή του πανεπιστημίου να περιορίζεται στη δυνατότητα κατασκευής έως δύο στρωμάτων, η υλοποίηση του τυπωμένου κυκλώματος πραγματοποιήθηκε από ιδιωτικό φορέα. Στο *Παράρτημα Γ* παρουσιάζονται τα κατασκευαστικά αρχεία (Gerber files), αρχεία που προκύπτουν από το πρόγραμμα σχεδίασης και απαραίτητα για την υλοποίηση του pcb shield.

Αμέσως μετά την κατασκευή και παραλαβή του τυπωμένου κυκλώματος επέκτασης, ακολουθεί η συναρμολόγησή του (assembly) με την τοποθέτηση και συγκόλληση των εξαρτημάτων με βάση τη λίστα υλικών (bill of materials – bom).

Στο τυπωμένο κύκλωμα διακρίνονται δύο μέρη: το αναλογικό και ψηφιακό μέρος, με το αναλογικό να καλύπτει τα δύο τρίτα (2/3) της συνολικής επιφάνειας της κάρτας και να περιλαμβάνει τους συνδετήρες διασύνδεσης αισθητηρίων και τροφοδοσίας, καθώς και τα κυκλώματα οδήγησης-προσαρμογής και των οκτώ (8) καναλιών, το δε ψηφιακό μέρος να περιορίζεται στο άνω μέρος της κάρτας αποτελούμενο από το μετατροπέα ADC, τους συνδετήρες διασύνδεσης των αισθητήρων ψηφιακής εξόδου και τον συνδετήρα μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η επικοινωνία με την ψηφιακή διάταξη (Raspberry Pi).

Μηχανολογικές θέσεις του τυπωμένου κυκλώματος αποτελούν οι τέσσερις (4) μη επιμεταλλωμένες οπές διαμέτρου 4.5mm που βρίσκονται στις γωνίες του pcb, απαραίτητες για τη στήριξη του μέσα στο κουτί, καθώς και άλλες τέσσερις (4) επίσης μη επιμεταλλωμένες οπές μικρότερης διαμέτρου (2.75mm) για την στερέωση της ψηφιακής διάταξης (raspberrypi) πάνω στο τυπωμένο κύκλωμα επέκτασης.

Στην *Εικόνα* που ακολουθεί διακρίνεται το τυπωμένο κύκλωμα (pcb shield) με τους ακόλουθους συνδετήρες διασύνδεσης:

- Ακροδέκτες τροφοδοσίας Κυκλωματικής Διάταξης

Η κύρια τροφοδοσία του συστήματος παρέχεται μέσω εξωτερικής τροφοδοτικής διάταξης συνεχούς τάσης +5V από τον συνδετήρα “CON6”, ενώ με χρήση του ολοκληρωμένου “U5”, dc-to-dc μετατροπέα της εταιρίας XP Power, παρέχονται τα +24V (3Wmax), τάση απαραίτητη για τα κυκλώματα οδήγησης των αισθητηρίων ρεύματος. Ο υπολογιστής τσέπης Raspberry Pi 3B τροφοδοτείται από ξεχωριστή τροφοδοτική διάταξη +5V/2.5A και μέσω του συνδετήρα “CON4” παρέχει τάση +3.3V όπου απαιτείται για την οδήγηση εξαρτημάτων του ψηφιακού Μετατροπέα ADC.

Επιπλέον μέσω των Συνδετήρων “CON9”, “CON7” και “CON8” δύναται η τροφοδότηση αισθητηρίων με χαμηλές απαιτήσεις ρεύματος, με τάσεις +5V, +24V και +3V3 αντιστοίχως. Σε κάθε συνδετήρα τροφοδοσίας έχει τοποθετηθεί ηλεκτρολυτικός πυκνωτής αποσύζευξης (“decoupling”) αλουμινίου 100uF ±20% / 35V SMD, για την εξασφάλιση “καθαρής” dc τάσης.

- Ακροδέκτες Διασύνδεσης Αισθητηρίων

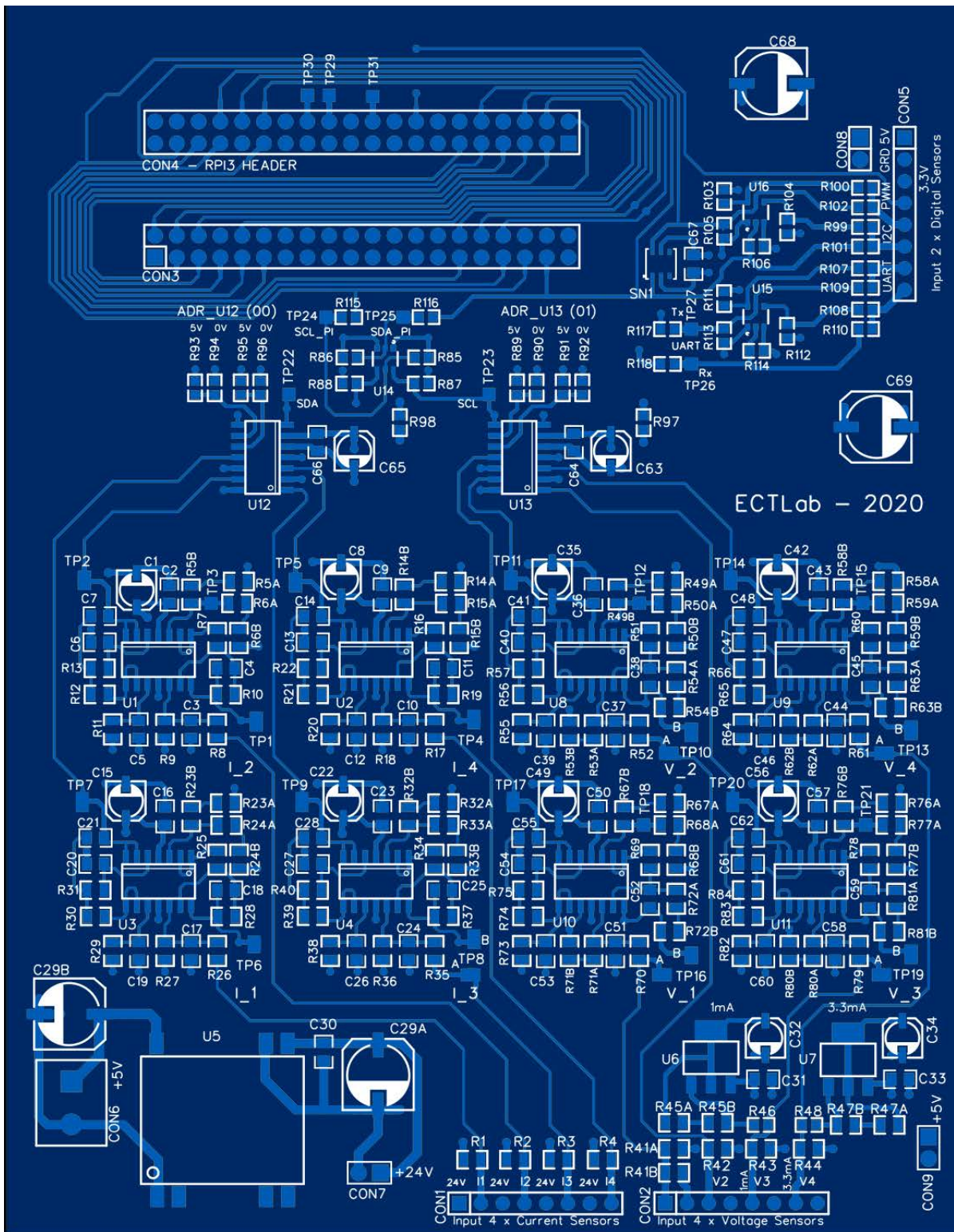
Η διασύνδεση των αισθητηρίων με το τυπωμένο κύκλωμα επέκτασης, γίνεται κάνοντας χρήση τριών (3) συνδετήρων, 1x8pins έκαστος. Οι οκτώ (8) συνολικά αναλογικοί αισθητήρες ρεύματος και τάσης επικοινωνούν μέσω των συνδετήρων “CON1” και “CON2” αντιστοίχως, τα σήματα των οποίων οδηγούνται στον αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπέα ADC μέσω του κάθε καναλιού οδήγησης του αισθητήρα. Διαμέσου του συνδετήρα “CON5” επιτυγχάνεται η διασύνδεση των τριών (3) ψηφιακών αισθητήρων οι οποίοι οδηγούνται απ’ ευθείας στη ψηφιακή διάταξη ανάλογα με το πρωτόκολλο διασύνδεσης που χρησιμοποιούν (UART, I2C PWM).

- Ακροδέκτες Διασύνδεσης Ψηφιακής Διάταξης

Το τυπωμένο κύκλωμα επέκτασης αποτελεί την “άνω κάρτα” (upper card) του συστήματος, το οποίο επικοινωνεί με την ψηφιακή διάταξη μέσω του συνδετήρα “CON4” 2x20pins. Για την δυνατότητα άμεσης διάθεσης όλων των ακροδεκτών γενικής χρήσης GPIO του προγραμματιζόμενου μικροελεγκτή του Raspberry Pi, έχει προβλεφθεί και χρησιμοποιείται ένας δεύτερος συνδετήρας “CON3” 2x20pins, στη πράξη καθρέπτης του συνδετήρα “CON4”.

- Ακροδέκτες ελέγχου (test points)

Στην έξοδο κάθε βαθμίδας έχουν τοποθετηθεί συνδετήρες ελέγχου (test points) σε διάφορα σημεία, που βοηθούν στην ανάπτυξη και αποσφαλμάτωση του κυκλώματος.



Εικόνα 69 : Το Τυπωμένο Κύκλωμα Επέκτασης (PCB Shield)

6.2 Έλεγχος Αναλογικής Διάταξης (pcb shield) – Εργαστηριακές Μετρήσεις

Μετά την συναρμολόγηση του τυπωμένου κυκλώματος, ακολουθεί μία σειρά ελέγχων για την πιστοποίηση καλής λειτουργίας του. Για την συγκόλληση των εξαρτημάτων και για τον έλεγχο της κυκλωματικής διάταξης γίνεται χρήση του εξοπλισμού και των οργάνων που διαθέτει το εργαστήριο ECT Lab του πανεπιστημίου.

Αρχικά, γίνεται ένας οπτικός έλεγχος με το στερεοσκόπιο, τόσο για την ορθή φορά τοποθέτησης και ποιοτική συγκόλληση των εξαρτημάτων όσο και για την μηχανική αντοχή των συνδετήρων διασύνδεσης. Ακολουθεί η μέτρηση της αντίστασης στην είσοδο της τροφοδοσίας και εν συνεχεία η τροφοδότηση του τυπωμένου κυκλώματος με +5V, για τον έλεγχο της αναμενόμενης κατανάλωσης στην είσοδο του κυκλώματος, καθώς και της ορθής τροφοδότησης των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (IC). Επιπλέον γίνεται επιβεβαίωση παροχής των πλέον τάσεων που απαιτούνται στο τυπωμένο κύκλωμα (+24V, +5V και +3.3V).

Στη συνέχεια, αναπτύσσεται ένα σύστημα δοκιμών και μεθοδευμένων μετρήσεων για τον έλεγχο καλής λειτουργίας ξεχωριστά του κάθε καναλιού οδήγησης των αναλογικών αισθητηρίων και πριν το τελικό στάδιο σύνδεσής τους, με σκοπό την τελική ρύθμιση του πρωτότυπου. Για την εύκολη και ασφαλή υλοποίηση των μετρήσεων καθοριστικό ρόλο παίζει η πρόβλεψη τοποθέτησης κατάλληλων συνδετήρων ελέγχου (test points) στις εξόδους όλων των βαθμίδων, κατά το στάδιο της σχεδίασης του τυπωμένου κυκλώματος.

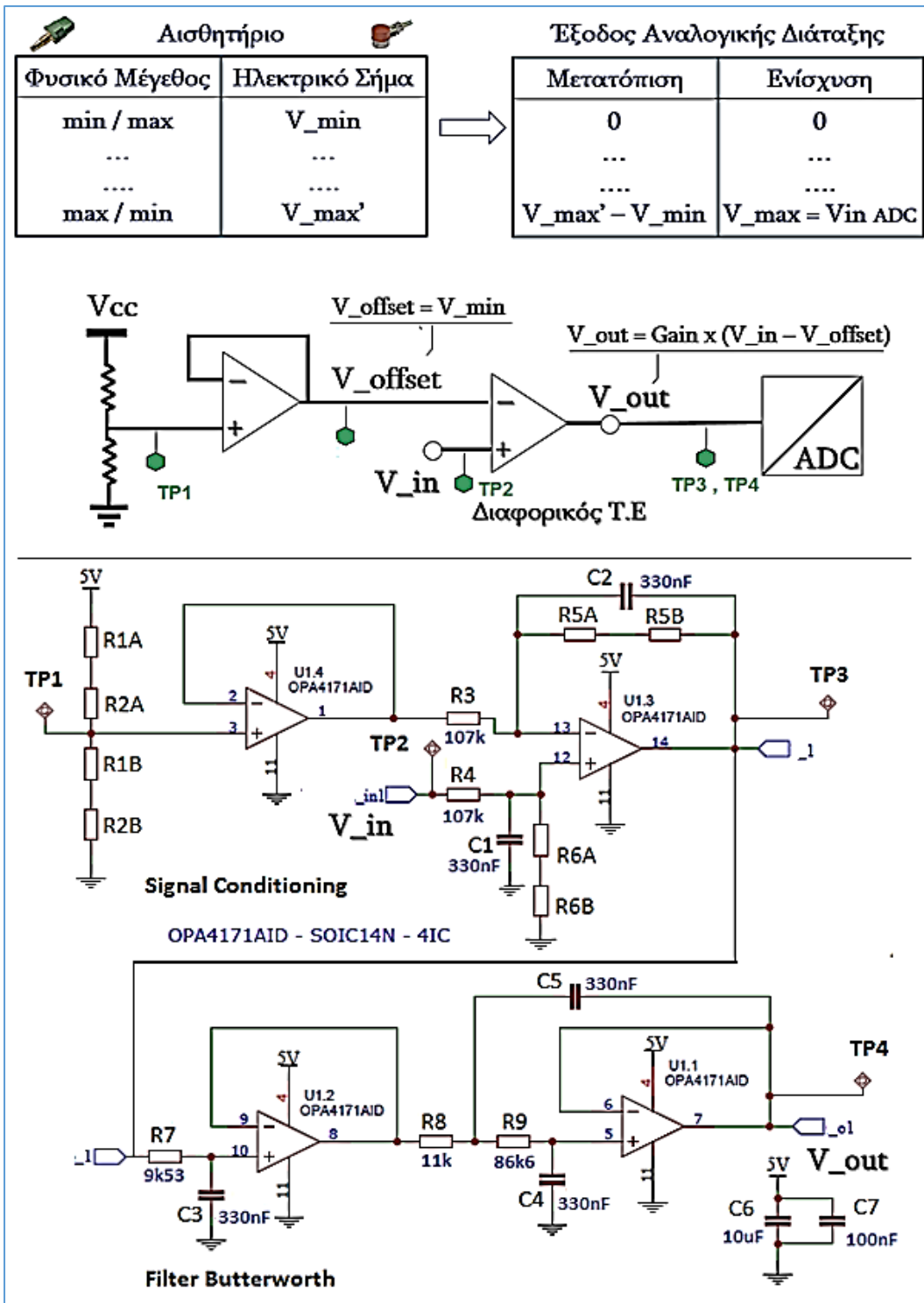
Αρχικά σε κάθε κανάλι, γίνεται μέτρηση και επαλήθευση της τάσης V_{offset} που παράγεται από τον διαιρέτη τάσης. Ακολουθεί η μέτρηση της τάσης εξόδου για κάθε κανάλι, με μηδενική τάση στην είσοδο (+) της ενισχυτικής βαθμίδας. Στη περίπτωση αυτή η αναμενόμενη τάση εξόδου θα πρέπει να είναι μηδενική, παρόλο της τάσης V_{offset} στην είσοδο (-) της ενισχυτικής βαθμίδας, καθώς στον διαφορικό ενισχυτή δεν υφίσταται αρνητική παροχή τροφοδοσίας ($V_{cc}=0V / V_{cc}=5V$), οπότε η έξοδος του θα ακολουθεί το κάτω όριο V_{cc-} .

Ακολούθως, μέσω κατάλληλων μεταβαλλόμενων αντιστάσεων και διαιρέτη τάσεων, στο ρόλο των αισθητηρίων, παρέχεται μεταβαλλόμενη τάση V_{in} στην είσοδο (+) του κάθε διαφορικού ενισχυτή και επιβεβαίωση της παραγόμενης τάσης εξόδου V_{out} . Η αναμενόμενη τάση στην έξοδο κάθε καναλιού θα πρέπει να υπακούει στη σχέση: $V_{out} = (V_{in} - V_{offset}) \times Gain$, με μέγιστη τιμή $V_{out_max} = 2.048V$, την μέγιστη επιτρεπόμενη τάση που δέχεται στην είσοδό του ο μετατροπέας ADC. Σημειώνεται ότι η τάση V_{offset} αντιστοιχεί στην ελάχιστη τάση που παράγεται στην έξοδο του κάθε χρησιμοποιούμενου αισθητήρα και η οποία θα πρέπει να αφαιρεθεί, ενώ η τάση V_{in} υποκαθιστά τις μεταβολές του αισθητηρίου σε όλο το εύρος του μετρούμενου φυσικού μεγέθους.

Στον παρακάτω Πίνακα καταγράφονται οι μετρήσεις όλων των λειτουργικών ελέγχων και για τα οκτώ (8) κανάλια, ενώ στην *Εικόνα 70* φαίνεται το μπλοκ διάγραμμα με τα σημεία μετρήσεων (test points) της κυκλωματικής διάταξης του κάθε καναλιού.

	Κανάλι Εισόδου Οδήγησης αναλογικών Αισθητήρων							
	Ρεύματος				Τάσεως			
	#Ch1	#Ch2	#Ch3	#Ch4	#Ch5	#Ch6	#Ch7	#Ch8
	I_1	I_2	I_3	I_4	V_1	V_2	V_3	V_4
Gain (G)	1.28	1.28	1.28	1.28	1.344	0.683	1.418	1.039
V_{offset} (TP1) [V]		TP3			TP18	TP12	TP21	TP15
Αναμενόμενο:	0.40	0.40	0.40	0.40	0.0205	0.65	0.725	0.56
Μετρούμενο:	0.404	0.403	0.404	0.404	0.021	0.653	0.727	0.563
V_{int} (TP2) [V]			TP8A		TP16A	TP10A	TP19A	TP13A
	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_{out'}$ (TP3) [V]	TP6	TP1	TP8B	TP4	TP16B	TP10B	TP19B	TP13B
Αναμενόμενο*:	0	0	0	0	0	0	0	0
Μετρούμενο:	0	0	0	0	0.007	0	0.0033	0.002
V_{out} (TP4) [V]	TP7	TP2	TP9	TP5	TP17	TP11	TP20	TP14
Μετρούμενο:	0	0	0	0	0.007	0	0.0033	0.002
V_{int} (TP2) [V]			TP8A		TP16A	TP10A	TP19A	TP13A
	0.96	0.96	0.96	0.96	1.53	0.838	1.0	1.174
$V_{out'}$ (TP3) [V]	TP6	TP1	TP8B	TP4	TP16B	TP10B	TP19B	TP13B
Αναμενόμενο*:	0.711	0.712	0.711	0.711	2.028	0.126	0.387	0.634
Μετρούμενο:	0.71	0.705	0.71	0.71	2.03	0.126	0.38	0.632
V_{out} (TP4) [V]	TP7	TP2	TP9	TP5	TP17	TP11	TP20	TP14
Μετρούμενο:	0.71	0.705	0.71	0.71	2.03	0.126	0.38	0.632
V_{int} (TP2) [V]			TP8A		TP16A	TP10A	TP19A	TP13A
	2.0	2.0	2.0	2.0	1.54	3.65	2.17	2.53
$V_{out'}$ (TP3) [V]	TP6	TP1	TP8B	TP4	TP16B	TP10B	TP19B	TP13B
Αναμενόμενο*:	2.048	2.048	2.048	2.048	2.048	2.049	2.049	2.046
Μετρούμενο:	2.03	2.035	2.03	2.03	2.06	2.03	2.04	2.05
V_{out} (TP4) [V]	TP7	TP2	TP9	TP5	TP17	TP11	TP20	TP14
Μετρούμενο:	2.03	2.035	2.03	2.03	2.06	2.03	2.04	2.05
V_{int} (TP2) [V]			TP8A		TP16A	TP10A	TP19A	TP13A
	0.6	0.6	0.6	0.6	1.08	1.0	1.45	1.5
V_{out} (TP4) [V]	TP7	TP2	TP9	TP5	TP17	TP11	TP20	TP14
Αναμενόμενο*:	0.256	0.256	0.256	0.256	1.423	0.246	1.049	0.987
Μετρούμενο:	0.26	0.265	0.26	0.26	1.42	0.24	1.05	0.98
V_{int} (TP2) [V]			TP8A		TP16A	TP10A	TP19A	TP13A
	1.0	1.0	1.0	1.0	0.7	2.0	1.66	1.63
V_{out} (TP4) [V]	TP7	TP2	TP9	TP5	TP17	TP11	TP20	TP14
Αναμενόμενο*:	0.768	0.768	0.768	0.768	0.913	0.922	1.322	1.117
Μετρούμενο:	0.762	0.754	0.763	0.763	0.915	0.919	1.31	1.1
Αντίσταση Εισόδου Τροφοδοτικής Διάταξης : $R_{in} = 3.53k$								
Τάση Τροφοδοσίας : $V_{in} = 5Volt$				Τάσεις Ακροδεκτών : $V_{+5V} = 5Volt$, $V_{+24V} = 23.98Volt$				
Ρεύμα Κατανάλωσης : $I_{in} = 43.5mA$ (σε κατάσταση ηρεμίας) +47mA (ενεργοποίηση 1 ^{ου} Καναλιού ρεύματος) $I_{in} = 420mA$ (ενεργοποίηση και των 4 Καναλιών ρεύματος)								
* $V_{out} = (V_{in} - V_{offset}) \times Gain$								

Πίνακας 12: Καταγραφή Μετρήσεων Λειτουργικών Ελέγχων της Κυκλωματικής Διάταξης



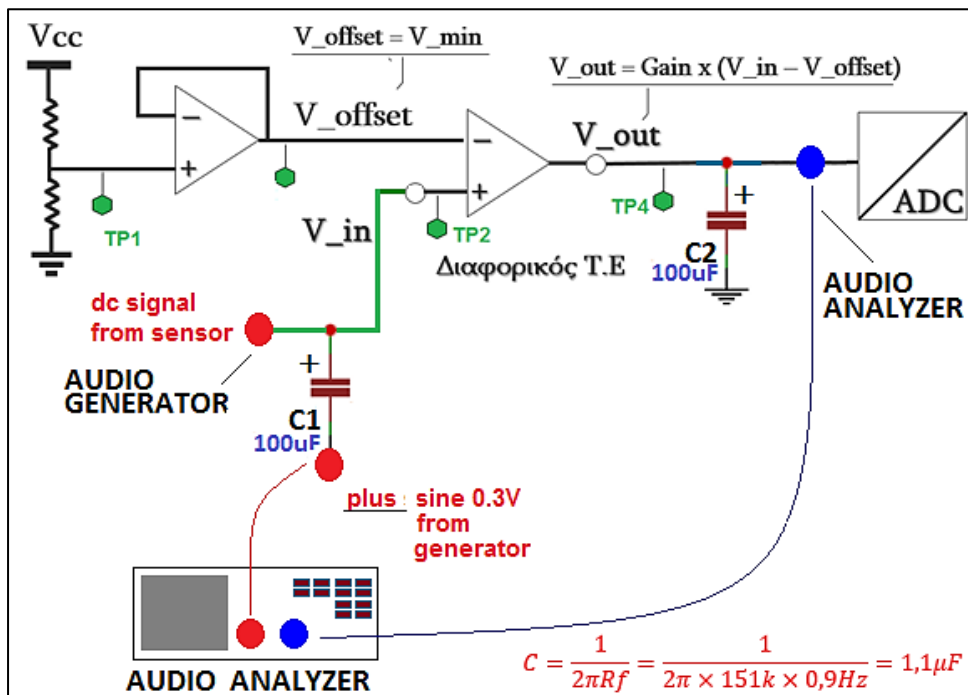
Εικόνα 70: Κύκλωμα Οδήγησης Αισθητήρων Αναλογικής Εξόδου με τα σημεία Ελέγχου TP

Στον Πίνακα 13 παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού των μεταβαλλόμενων αντιστάσεων και διαιρέτη τάσεων που χρησιμοποιήθηκαν στη θέση των αισθητηρίων, προκειμένου να ολοκληρωθεί ο ηλεκτρικός έλεγχος της αναλογικής διάταξης.

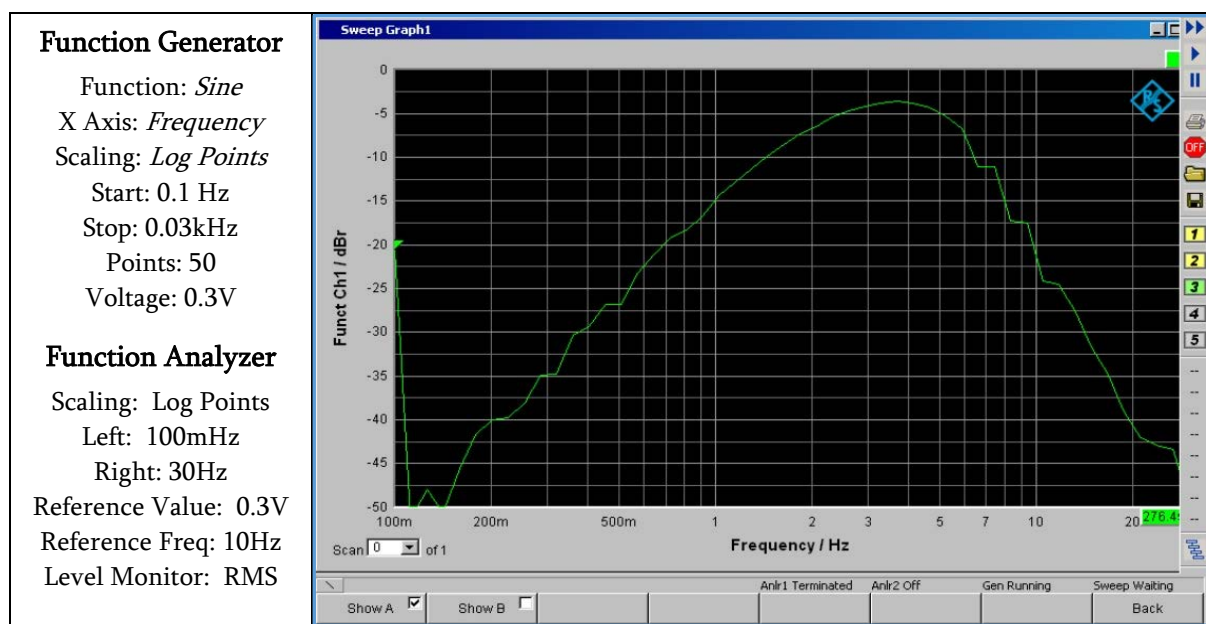
Αναλογική Διάταξη Οδήγησης Αισθητήρων		Ισοδύναμα Κυκλώματα Αισθητηρίων
#1-4 Ch Current Sensors 	$I=4\text{mA} \rightarrow V_s=0.4\text{V} \rightarrow R_{sen}=5.9\text{k}$ $I=20\text{mA} \rightarrow V_s=2.0\text{V} \rightarrow R_{sen}=1.1\text{k}$	
	Voffset = 0.4V Gain = 1.28	$V_{o_min}=0\text{V}$ $V_{o_max}=2.048\text{V}$ 4-20mA Transducer
#1Ch Voltage Sensors 	$\theta=-40\text{oC} \rightarrow V_s=1.544\text{V} \rightarrow R_{sen}=33.49\text{k}$ $\theta=+150\text{oC} \rightarrow V_s=20.45\text{mV} \rightarrow R_{sen}=19.31\Omega$	
	Voffset = 20.45mV Gain = 1.344	$V_{o_min}=0\text{V}$ $V_{o_max}=2.048\text{V}$ NTC-1000 Honeywell
#2Ch Voltage Sensors 	$d=10\text{cm} \rightarrow V_s=3.65\text{V}$ $d=150\text{cm} \rightarrow V_s=0.65\text{V}$	
	Voffset = 0.65V Gain = 0.683	$V_{o_min}=0\text{V}$ $V_{o_max}=2.048\text{V}$ GP2Y0A60SZ0F Sharp
#3Ch Voltage Sensors 	$\theta=-40\text{oC} \rightarrow V_s=725.4\text{mV} \rightarrow R_{sen}=169.7\Omega$ $\theta=+850\text{oC} \rightarrow V_s=2.17\text{V} \rightarrow R_{sen}=766.78\Omega$	
	Voffset = 725.4mV Gain = 1.418	$V_{o_min}=0\text{V}$ $V_{o_max}=2.048\text{V}$ RTD Sensata PT-200
#4Ch Voltage Sensors 	$\theta=-40\text{oC} \rightarrow V_s=560\text{mV} \rightarrow R_{sen}=169.7\Omega$ $\theta=+850\text{oC} \rightarrow V_s=2.048\text{V} \rightarrow R_{sen}=766.78\Omega$	
	Voffset = 560mV Gain = 1.039	$V_{o_min}=0\text{V}$ $V_{o_max}=2.048\text{V}$ RTD Sensata PT-200

Πίνακας 13 : Τρόπος Υπολογισμού Χρήσης Ισοδύναμων Κυκλωμάτων αντί Αισθητηρίων

Τέλος στην έξοδο κάθε καναλιού, με χρήση του Audio Analyzer UPV-DC 250kHz της εταιρίας Rohde & Schwarz που διαθέτει το εργαστήριο, γίνεται έλεγχος της αποτελεσματικής απόκρισης του βαθυπερατού φίλτρου (3^{ης} τάξης Butterworth) του κάθε καναλιού, με συχνότητα Αποκοπής $f_c = 5\text{Hz}$. Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται το διάγραμμα διασύνδεσης του τυπωμένου κυκλώματος με τον αναλυτή ακουστικών συχνοτήτων, οι βασικές ρυθμίσεις του οργάνου καθώς και τα αποτελέσματα του αναλυτή στην έξοδό του.



Εικόνα 71 : Διάγραμμα Διασύνδεσης Αναλογικής Διάταξης με Αναλυτή Χαμηλών Συχνοτήτων



Εικόνα 72 : Βασικές Ρυθμίσεις Αναλυτή Ακουστικών Συχνοτήτων και Αποτελέσματα Εξόδου

Για την μέτρηση της απόκρισης συχνότητας του φίλτρου και της αρμονικής παραμόρφωσης, ο αναλυτής χαμηλών συχνοτήτων ρυθμίζεται να παράγει στην είσοδο κάθε αναλογικής βαθμίδας ένα ημιτονοειδές σήμα σταθερού πλάτους $0.3V$ και μεταβαλλόμενης συχνότητας από $0.1Hz-30Hz$. Στην *Εικόνα71* παρουσιάζεται το διάγραμμα διασύνδεσης της αναλογικής διάταξης με τον αναλυτή χαμηλών συχνοτήτων. Παρατηρείται ότι η διασύνδεση του οργάνου τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο της αναλογικής διάταξης, επιτυγχάνεται μέσω δύο ηλεκτρολυτικών πυκνωτών $100\mu F$. Ο κάθε πυκνωτής λειτουργεί ως “dc block” εμποδίζοντας το dc σήμα του αισθητηρίου να διέλθει μέσα από τον αναλυτή, προκαλώντας έτσι φθορά στο ίδιο το όργανο.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης (επιλεγμένη ανάλυση πενήντα λογαριθμισμένων σημείων) απεικονίζονται στην *Εικόνα72*. Παρατηρείται ότι η συχνότητα αποκοπής του φίλτρου είναι στα $4.7Hz$. Η μορφή της απόκρισης στις πολύ χαμηλές συχνότητες (κομμένη στις χαμηλές συχνότητες) καθώς και η αδυναμία του σήματος να φθάσει τα $0dB$ είναι απόλυτα δικαιολογημένη καθώς στον εν λόγω αναλυτή φάσματος το εύρος σάρωσής του ξεκινά από τα $20Hz$ βάση προδιαγραφών της κατασκευάστριας εταιρίας, όπως επιβεβαιώνεται και από την *Εικόνα73*.



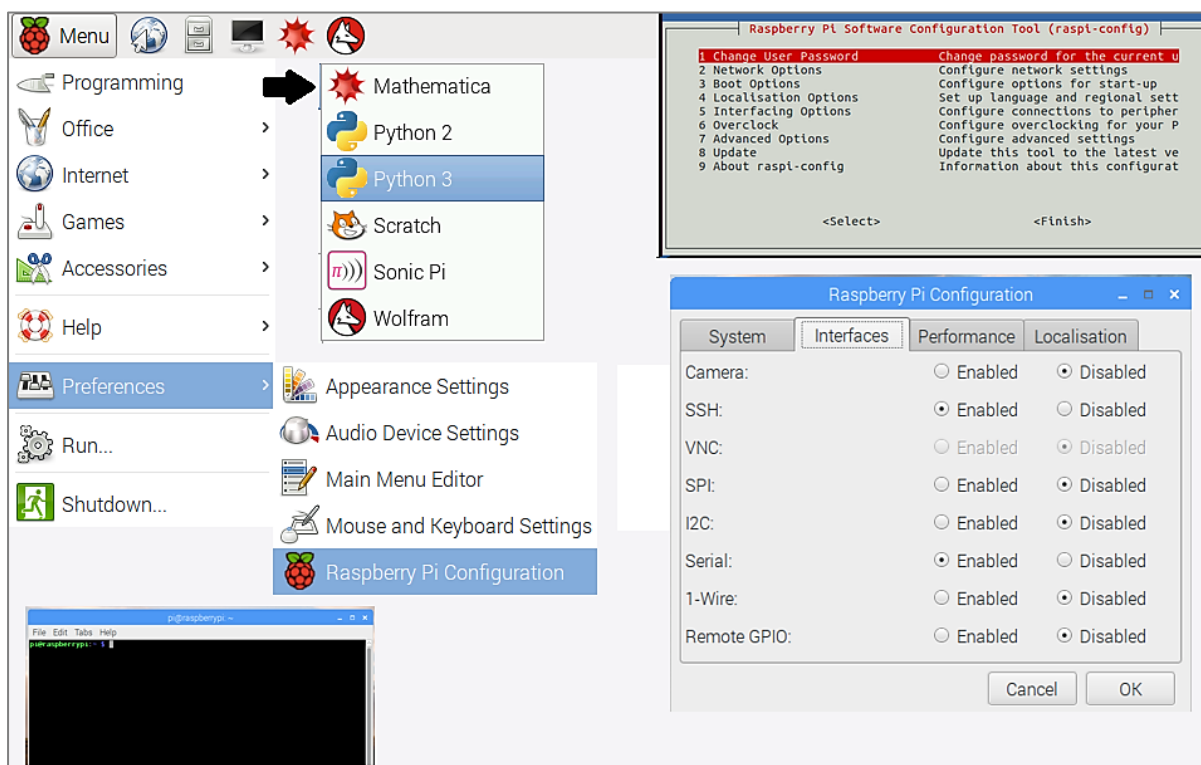
Εικόνα 73 : Απόκριση Audio Analyzer UPV-DC...250kHz σε συχνότητες 0-20Hz

Στο *Παράρτημα Α*, παρουσιάζονται φωτογραφίες κατά την διάρκεια των λειτουργικών ελέγχων και μετρήσεων του τυπωμένου κυκλώματος στο εργαστήριο ECT Lab.

6.3 Υλοποίηση Ψηφιακής Διάταξης

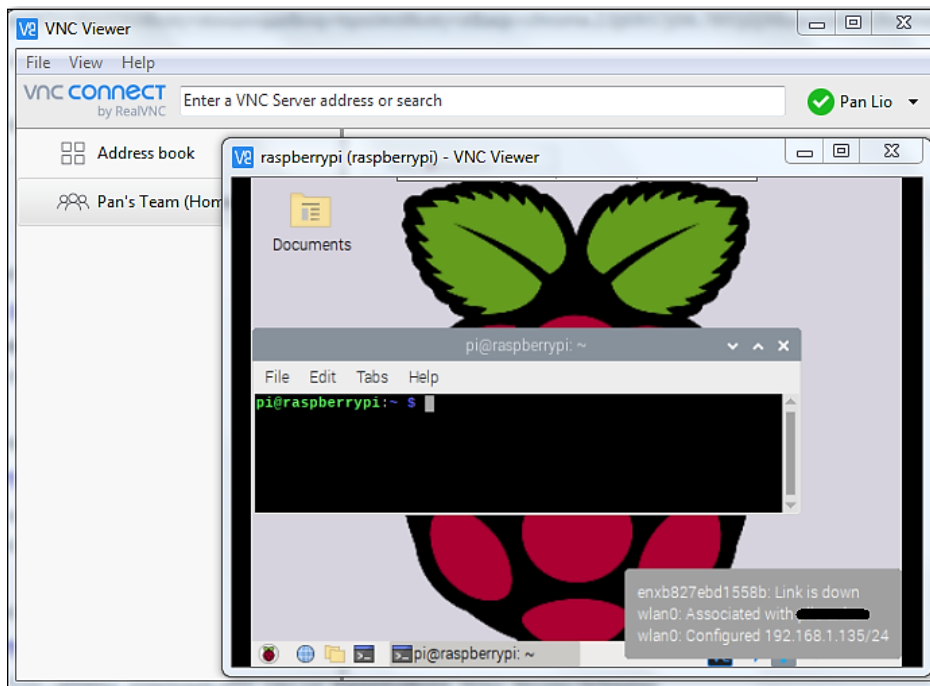
Η υλοποίηση της ψηφιακής διάταξης απαρτίζεται από δύο βασικά μέρη : αρχικά την προετοιμασία και παραμετροποίηση του υπολογιστή Raspberry Pi και εν συνεχεία τον κατάλληλο προγραμματισμό του. Συγκεκριμένα η υλοποίηση της ψηφιακής διάταξης περιλαμβάνει :

- την Εγκατάσταση του λειτουργικού συστήματος Raspbian και των χρησιμοποιούμενων εφαρμογών,
- τις βασικές ρυθμίσεις “πρώτης εκκίνησης” του Raspberry Pi που αφορούν κυρίως τη διαμόρφωση του γραφικού περιβάλλον και την ανάλυση οθόνης,
- την απόδοση στατικής IP διεύθυνσης και ενεργοποίησης του δικτυακού πρωτοκόλλου “Secure Shell” (SSH), για την δυνατότητα ενσύρματης ή ασύρματης δικτύωσης και απομακρυσμένης πρόσβασης του Raspberry Pi,
- την ενεργοποίηση πρωτοκόλλων διασύνδεσης και επικοινωνίας του με άλλες συσκευές (I2C, UART, SPI),
- τον προγραμματισμό και την εγκατάσταση κατάλληλων βιβλιοθηκών-πακέτων για την οδήγηση και διαχείριση του διασυνδεδεμένου υλικού της αναλογικής διάταξης με το Raspberry Pi, όπως του αναλογικού σε ψηφιακού μετατροπέα ADC και αισθητηρίων ψηφιακής εξόδου.



Εικόνα 74 : Περιβάλλον διαχείρισης ρυθμίσεων Raspberry Pi

Η επικοινωνία με το Raspberry Pi γίνεται μέσω πρωτοκόλλου Secure Shell (SSH). Απαιτήση είναι η δυνατότητα σύνδεσης του Raspberry σε τοπικό δίκτυο WLAN. Με την χρήση ενός τερματικού SSH όπως το vnc viewer (virtual network computing) ή το PuTTY και με όνομα χρήστη/κωδικό pi/raspberry επιτυγχάνεται ασύρματη πρόσβαση (Εικόνα75). Βασική προϋπόθεση της σύνδεσης είναι να είναι γνωστή η διεύθυνση δικτύου (ip address) του Raspberry Pi. Αυτό μπορεί να οριστεί στατικά από τον router του δικτύου ώστε να υπάρχει πάντα αντιστοίχιση διεύθυνσης πρόσβασης (MAC Address) και διεύθυνσης δικτύου.



Εικόνα 75 : Ασύρματη Πρόσβαση στο Raspberry Pi με VNC Viewer

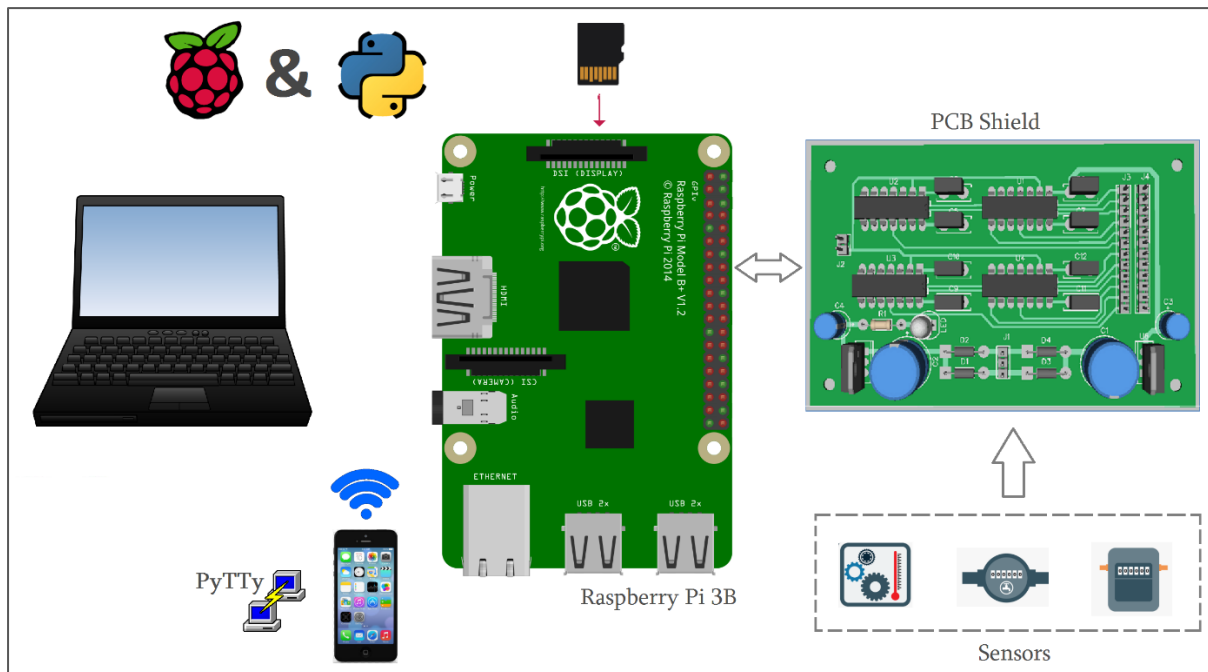
Ο πηγαίος κώδικας που απαιτείται για embedded προγραμματισμό είναι γραμμένος σε γλώσσα Python μέσω του ολοκληρωμένου γραφικού περιβάλλον ανάπτυξης (IDE) που διαθέτει το Raspberry Pi.

Με την υλοποίηση του κατάλληλου λογισμικού, η ψηφιακή διάταξη είναι σε θέση να επικοινωνεί με το τυπωμένο κύκλωμα επέκτασης (pcb shield), αναγνωρίζοντας τον αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπέα ADC και με δυνατότητα πλήρης παραμετροποίησής του. Δύναται να αντλεί τα δεδομένα που προέρχονται από τα κανάλια οδήγησης των αναλογικών αισθητηρίων και να τα αποθηκεύει σε τοπική βάση δεδομένων μαζί με την χρονική στιγμή λήψης τους. Η βάση δεδομένων χρησιμοποιεί αποθήκευση σε σύστημα αρχείων.

Το λογισμικό του συστήματος αποτελείται από 4 αρχεία πηγαίου κώδικα. Στα αρχεία αυτά γίνεται χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Python3. Η παρουσίαση και ανάλυση του κώδικα που χρησιμοποιείται στην ψηφιακή διάταξη παρουσιάζεται στο

Παράρτημα Ε. Εκεί, η ανάλυση πραγματοποιείται με την ομαδοποίηση και κατακερματισμό του κώδικα σε μικρότερα κομμάτια για μεγαλύτερη σαφήνιά του.

Στην *Εικόνα 76* φαίνεται η διασύνδεση του τυπωμένου κυκλώματος επέκτασης με το Raspberry Pi και ο τρόπος επικοινωνίας τους. Με τη ρύθμιση ενός κινητού τηλεφώνου (smartphone) ως φορητού σημείου πρόσβασης (mobile hotspot), δημιουργείται ασύρματο δίκτυο στο οποίο συνδέονται το raspberry pi και ένα laptop. Μέσω του laptop επιτυγχάνεται ο προγραμματισμός και η εκτέλεση εντολών στο raspberry pi με τη χρήση της εφαρμογής απομακρυσμένης σύνδεσης, Putty.



Εικόνα 76: Ασύρματη Δικτύωση και Προγραμματισμός Raspberry Pi μέσω PuTTY

6.4 Έλεγχος Ορθής Λειτουργίας Αναλογικού σε Ψηφιακού Μετατροπέα

Πριν το κρίσιμο στάδιο της βαθμονόμησης και σύνδεσης των αισθητηρίων, προηγείται ο έλεγχος καλής λειτουργίας του αναλογικού σε ψηφιακού μετατροπέα MCP3424 και η επιβεβαίωση των προδιαγραφών του. Πρόκειται για ένα αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπέα σχεδιασμένο να συνεργάζεται πλήρως με το Raspberry Pi, με διαθέσιμη υποστηριζόμενη βιβλιοθήκη και έτοιμο πηγαίο κώδικα για τον προγραμματισμό του.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι ρυθμίσεις, βάση των οποίων γίνεται η παραμετροποίηση και προγραμματισμός του μετατροπέα ADC, του οποίου ο πηγαίος κώδικας παρουσιάζεται στο *Παράρτημα Ε* [30].

Max Voltage Supply	Vcc = 5Volt	
Max Analog Input Voltage	$\Delta V = \pm 2.048$ Volt	
Number of Bits Conversion	n = 14 Bits	
Number of possible States	N = $2^n = 16384$	
Minimum Code = -8192	Maximum Code = 8191	
LSB Resolution	$Q = \Delta V / N = 125\mu\text{Volt}$	
PGA Gain	G = 1	
Conversion Mode	Continuous	
I2C Device Address ADC #1	1101 0 0 0	
I2C Device Address ADC #2	1101 0 1 0	

Πίνακας 14: Πίνακας τιμών παραμετροποίησης Αναλογικού σε Ψηφιακού Μετατροπέα ADC

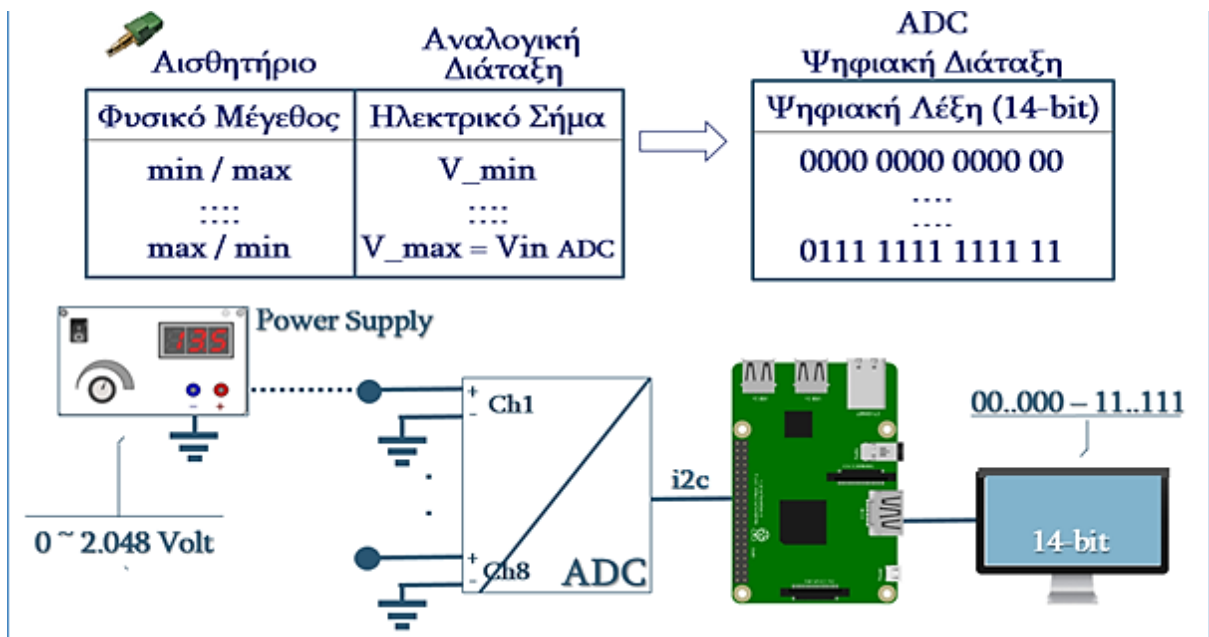
Ο έλεγχος καλής λειτουργίας του μετατροπέα ADC επιτυγχάνεται με την εισαγωγή κατάλληλης ηλεκτρικής τάσης στην είσοδο κάθε καναλιού και την επιβεβαίωση της ψηφιακής λέξης 14-bit που εμφανίζεται κάθε φορά στην έξοδό του. Η ορθότητα των αποτελεσμάτων βασίζεται λαμβάνοντας υπόψη την τάση που αντιστοιχεί στο λιγότερο σημαντικό bit (LSB Resolution) με βάση την επιλεγμένη διακριτότητα του μετατροπέα, που στη προκειμένη περίπτωση είναι 14-bit.

Τα διάφορα επίπεδα τάσης που εφαρμόζονται στο κάθε κανάλι εισόδου χωριστά του ADC, μέσω τροφοδοτικής διάταξης, προσομοιώνουν το αναλογικό αισθητήριο.

Στον Πίνακα που ακολουθεί καταγράφεται ο δειγματοληπτικός έλεγχος των μετρήσεων που εφαρμόστηκαν ξεχωριστά για κάθε μία είσοδο του μετατροπέα ADC, ενώ στην Εικόνα 77 παρουσιάζεται σε μπλοκ διάγραμμα η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε.

# Channel ADC	Analog Input Voltage	ADC Value
	LSB = 125 μ V	0000 0000 0000 01
1 ... 8	100mV	0000 1100 1000 00
	500 mV	0011 1110 1000 00
	1000 mV	0111 1101 0000 00
	1200 mV	0100 1110 0000 00
	1500 mV	0111 1011 1000 00
	2048 mV	0111 1111 1111 11

Πίνακας 15: Πίνακας Ελέγχου Ορθής λειτουργίας Μετατροπέα ADC



Εικόνα 77: Μεθοδολογία Ελέγχου Ορθής Λειτουργίας ADC

Η παραπάνω διαδικασία είναι απαραίτητη όχι μόνο για τον έλεγχο καλής λειτουργίας του ADC, αλλά είναι αλληλένδετη και με το μετέπειτα στάδιο βαθμονόμησης/γραμμικοποίησης των αισθητήρων. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένας πίνακας (lookup table) αντιστοίχισης της ψηφιακής εξόδου του ADC, με την ηλεκτρική τάση που εφαρμόζεται σε κάθε είσοδο του η οποία αντιστοιχεί σε μία τιμή του μετρούμενου φυσικού μεγέθους. Διαδικασία η οποία παρουσιάζεται στην Ενότητα 6.5, στο στάδιο της βαθμονόμησης των αισθητήρων.

Στις Εικόνες που ακολουθούν αποτυπώνονται οι μετρήσεις του αισθητηρίου θερμοκρασίας, το οποίο βρίσκεται πάνω στο τυπωμένο κύκλωμα (pcb), μαζί με τις οκτώ (8) εξόδους του μετατροπέα ADC, όπως ακριβώς παρουσιάζονται στην οθόνη του Raspberry Pi με ταυτόχρονη καταγραφή σε αρχείο μορφής *txt*. Η κάθε έξοδος του μετατροπέα ADC απεικονίζει την 14-bit ψηφιακή λέξη σε δεκαδική μορφή μαζί με την αντίστοιχη τάση που εφαρμόζεται στην είσοδο του κάθε καναλιού.

```

pi@raspberrypi: ~/dev/test
KeyboardInterrupt
pi@raspberrypi:~/dev/test $ nano ./Results.txt
pi@raspberrypi:~/dev/test $ dir
Adafruit_Python_GPIO  pycache          sht21          test_adc_backup.py  test_ht_backup.py
adc                   Results.txt      sht21_backup.py test_adc.py         test_ht.py
ADC_results.txt      Sensor_results.txt sht21.py      test_gps.py        test_obd.py
pi@raspberrypi:~/dev/test $
pi@raspberrypi:~/dev/test $
pi@raspberrypi:~/dev/test $

```

Εικόνα 78: Δημιουργία txt αρχείου καταγραφής Μετρήσεων Αισθητήρων

κατασκευαστής του αισθητηρίου. Το αποτέλεσμα είναι η αυτόματη δημιουργία της χαρακτηριστικής καμπύλης και η γνωστοποίηση της εξίσωσης που την αντιπροσωπεύει.

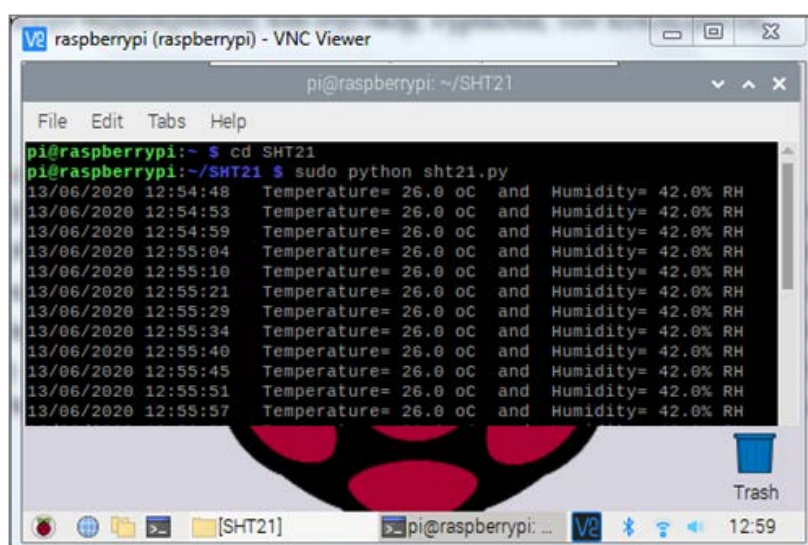
Είναι αντιληπτό ότι ακόμη και κατά την βαθμονόμηση των αισθητηρίων, το σφάλμα δεν μπορεί να εκλείψει. Η αβεβαιότητα στην βαθμονόμηση όπως αλλιώς ονομάζεται, είναι αποτέλεσμα διαφόρων παραμέτρων, οι κυριότεροι των οποίων είναι :

- η κατασκευαστική δομή του κάθε αισθητηρίου,
- οι αλλαγές στην σταθερότητα και ομοιομορφία του αισθητηρίου,
- η αβεβαιότητα στις ενδείξεις του αισθητηρίου αναφοράς (σφάλμα ανάγνωσης).

Απόρροια των παραπάνω είναι ο κάθε αισθητήρας να φέρει χαρακτηριστική καμπύλη απόκρισης, η οποία από κατασκευαστικής πλευράς, παρουσιάζει μικρο-διαφορές από αισθητήριο σε αισθητήριο. Αποτέλεσμα; αν και δεδομένη η θεωρητική χαρακτηριστική καμπύλη του αισθητηρίου, η μέτρηση του φυσικού του μεγέθους να μην αντιστοιχεί στην ακριβή του τιμή και η εμφάνιση μικρής απόκλισης.

Στη περίπτωση αυτή κρίνεται αναγκαίο ο έλεγχος και ανά-βαθμονόμηση του κάθε αισθητηρίου. Η ανά-βαθμονόμηση επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ενός επιπλέον αισθητηρίου (όπου είναι δυνατόν), ως αισθητηρίου αναφοράς, όπου έχοντας διαμορφώσει τις κατάλληλες συνθήκες, με την εφαρμογή διάφορων τιμών του μετρούμενου φυσικού μεγέθους στον αισθητήρα, καταγράφονται οι αντίστοιχες τιμές του ηλεκτρικού σήματος στην εξόδου του. Για μεγαλύτερη αξιοπιστία επιλέγονται αρκετά σημεία βαθμονόμησης στο εύρος λειτουργίας του αισθητηρίου. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει η διόρθωση-δημιουργία της χαρακτηριστικής εξίσωσης που αντιπροσωπεύει τον κάθε χρησιμοποιούμενο αισθητήρα.

Παρακάτω, παρουσιάζεται η εικόνα εμφάνισης στο Raspberry Pi των αποτελεσμάτων του ψηφιακού αισθητήρα SHT-21, ο οποίος βρίσκεται πάνω στο τυπωμένο κύκλωμα επέκτασης για την μέτρηση θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας του κυκλώματος.



```
pi@raspberrypi (raspberrypi) - VNC Viewer
pi@raspberrypi: ~/SHT21
File Edit Tabs Help
pi@raspberrypi:~ $ cd SHT21
pi@raspberrypi:~/SHT21 $ sudo python sht21.py
13/06/2020 12:54:48 Temperature= 26.0 oC and Humidity= 42.0% RH
13/06/2020 12:54:53 Temperature= 26.0 oC and Humidity= 42.0% RH
13/06/2020 12:54:59 Temperature= 26.0 oC and Humidity= 42.0% RH
13/06/2020 12:55:04 Temperature= 26.0 oC and Humidity= 42.0% RH
13/06/2020 12:55:10 Temperature= 26.0 oC and Humidity= 42.0% RH
13/06/2020 12:55:21 Temperature= 26.0 oC and Humidity= 42.0% RH
13/06/2020 12:55:29 Temperature= 26.0 oC and Humidity= 42.0% RH
13/06/2020 12:55:34 Temperature= 26.0 oC and Humidity= 42.0% RH
13/06/2020 12:55:40 Temperature= 26.0 oC and Humidity= 42.0% RH
13/06/2020 12:55:45 Temperature= 26.0 oC and Humidity= 42.0% RH
13/06/2020 12:55:51 Temperature= 26.0 oC and Humidity= 42.0% RH
13/06/2020 12:55:57 Temperature= 26.0 oC and Humidity= 42.0% RH
```

Εικόνα 80 : Αποτελέσματα Εμφάνισης Μετρήσεων του Αισθητήρα Ψηφιακής Εξόδου SHT21

6.6 Κουτί τοποθέτησης Τυπωμένου Κυκλώματος Επέκτασης

Μετά την ολοκλήρωση των λειτουργικών ελέγχων σειρά έχει η υλοποίηση του κουτιού μέσα στο οποίο θα τοποθετηθεί το όλο σύστημα. Πρόκειται για πολυεστερικό κουτί από ανθεκτικό πλαστικό ABS, με δείκτη στεγανότητας IP65, παρέχοντας προστασία από τη σκόνη και την υγρασία και αντοχή στην υψηλή υπεριώδη ακτινοβολία του ήλιου με θερμοκρασία λειτουργίας από -20°C έως $+80^{\circ}\text{C}$. Οι συνολικές διαστάσεις του είναι: μήκος 171mm, πλάτος 121mm, ύψος 55mm. Στο εσωτερικό κάτω μέρος του υπάρχει κατάλληλη βάση με 4 χαλύβδινα σπειρώματα για την τοποθέτηση και στερέωση του τυπωμένου κυκλώματος επέκτασης (pcb). Για τις απαραίτητες εγκοπές του κουτιού έγινε χρήση CNC φρεζομηχανής τριών αξόνων.



Εικόνα 81 : Κουτί τοποθέτησης Τυπωμένου Κυκλώματος Επέκτασης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η ανάπτυξη των σύγχρονων συστημάτων συλλογής και μετάδοσης δεδομένων καθώς επίσης και των συστημάτων επιτήρησης εγκαταστάσεων και μηχανών, έχει στρέψει τις τελευταίες δεκαετίες το ενδιαφέρον της επιστήμης και της τεχνολογίας στην ανάπτυξη αισθητήρων με βελτιωμένα χαρακτηριστικά. Οι αισθητήρες άλλωστε, εκτός από τις δυνατότητες μέτρησης των μη ηλεκτρικών μεγεθών τις οποίες παρέχουν, αποτελούν τα απαραίτητα εκείνα εξαρτήματα-μέσα, τα οποία προσδίδουν τη δυνατότητα αυτοματισμού και ελέγχου σε ένα σύστημα: την καθοδήγηση συστημάτων από ηλεκτρονικά μέσα χωρίς την απαίτηση ανθρώπινης παρέμβασης. Η ανάγκη συλλογής, απεικόνισης, καταγραφής και επεξεργασίας δεδομένων είναι ολοένα και πιο επιτακτική και κατά κόρον γίνεται σήμερα μέσω υπολογιστικών συστημάτων.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η σχεδίαση και υλοποίηση ενός τυπωμένου κυκλώματος επέκτασης (pcb shield) για τον υπολογιστή τσέπης Raspberry Pi 3B. Πρόκειται για εφαρμογή σχεδιασμού και υλοποίησης ευέλικτου συστήματος καταγραφής αισθητήρων ποικίλων εφαρμογών και συγκεκριμένα ενός αναλογικού οκτα-κάναλου συστήματος μαζί με τα κυκλώματα προσαρμογής και οδήγησης αναλογικών αισθητηρίων, την ψηφιοποίηση και την αποστολή των σημάτων τους στην ψηφιακή διάταξη, καθώς και θύρες διασύνδεσης τριών (3) πλέον ψηφιακών αισθητήρων.

Καινοτόμο στοιχείο της συγκεκριμένης εφαρμογής αποτελεί η δυνατότητα διασύνδεσης και οδήγησης οποιουδήποτε αισθητήρα αναλογικής εξόδου, με ελάχιστες τροποποιήσεις στο αναλογικό τυπωμένο κύκλωμα - αλλαγές που αφορούν σε τιμές παθητικών στοιχείων - και με την εισαγωγή κάθε φορά του κατάλληλου πίνακα βαθμονόμησης (lookup table) στη ψηφιακή διάταξη.

Βασική προϋπόθεση για την ομαλή λειτουργία του συστήματος, είναι για τον κάθε διασυνδεδεμένο αισθητήρα να έχει εξασφαλιστεί η εξωτερική παροχή τροφοδοσίας, να είναι γνωστός ο πίνακας βαθμονόμησης του και να διαθέτει μία από τις παρακάτω μορφές εξόδων :

1. αναλογική έξοδος μεταβαλλόμενου ρεύματος 4-20mA (2wire)
2. αναλογική έξοδος μεταβαλλόμενης τάσεως 0-5V
3. ψηφιακή έξοδος με υποστηριζόμενα πρωτόκολλα διασύνδεσης I2C/UART/PWM.

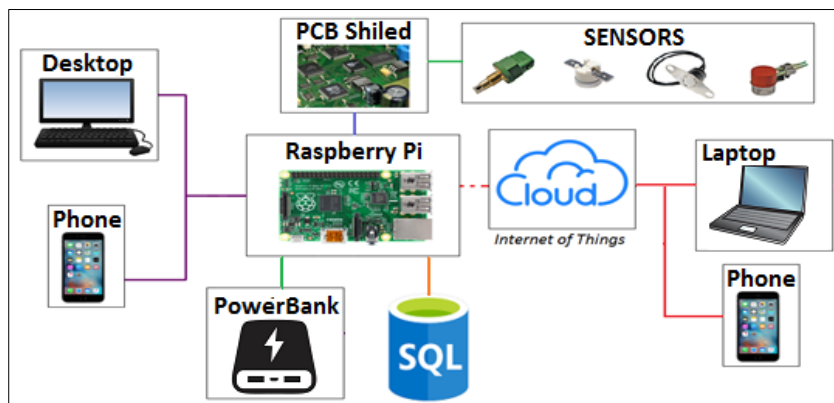
Πλεονεκτήματα του συστήματος είναι το χαμηλό κόστος υλοποίησής του, η εύκολη επεκτασιμότητα και προσαρμογή του ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Η υπολογιστική ισχύς του Raspberry είναι αρκετά μεγάλη αν αναλογιστεί κανείς το κόστος και το μέγεθός του. Είναι εφικτό ο προγραμματισμός του Raspberry και σε άλλες γλώσσες προγραμματισμού όπως η C και η JAVA, που προσφέρουν

γρηγορότερη απόκριση, σε σχέση με την Python πάνω στην οποία βασίστηκε ο προγραμματισμός της ψηφιακής διάταξης.

Κατά την υλοποίηση του συστήματος προέκυψαν ζητήματα όπου θεωρήθηκε αδήριτη ανάγκη η επίλυσή τους. Ζητήματα που αφορούσαν τόσο την σωστή σχεδίαση του ίδιου του τυπωμένου κυκλώματος προς αποφυγή EMI παρεμβολών όσο και του προγραμματισμού του αναλογικού/ψηφιακού μετατροπέα για την ορθή απεικόνιση των τιμών που προέρχονταν και από τα οκτώ (8) συνολικά κανάλια της αναλογικής διάταξης.

7.1 Μελλοντικές Βελτιώσεις - Επεκτάσεις

Η ήδη υπάρχουσα εφαρμογή με περαιτέρω παραμετροποίηση και προσθήκη κατάλληλου υλικού (hardware) μπορεί να έχει ποικίλες εφαρμογές τόσο στην καθημερινότητα του ανθρώπου όσο και στη βιομηχανία, αποτελώντας την κεντρική μονάδα διαχείρισης ποικίλων αισθητηρίων. Με κατάλληλη επέκταση του κώδικα προγραμματισμού (software) στον υπολογιστή Raspberry Pi 3B και την σχεδίαση τοπικής βάσης δεδομένων SQL, δίνεται η δυνατότητα καταγραφής, αποθήκευσης και διαχείρισης όλων των δεδομένων που προέρχονται από τα αισθητήρια μαζί με την χρονική στιγμή λήψης τους. Επιπλέον μέσω των απαιτούμενων πρωτοκόλλων ασύρματης (wi-fi, bluetooth) και ενσύρματης δικτύωσης (ethernet) που προσφέρονται από τη ψηφιακή διάταξη, είναι εφικτή η αποστολή των μετρήσεων αυτών σε δικτυακή πλατφόρμα, δίνοντας πρόσβαση σε αυτές από οποιαδήποτε δικτυακή συσκευή (Εικόνα82).

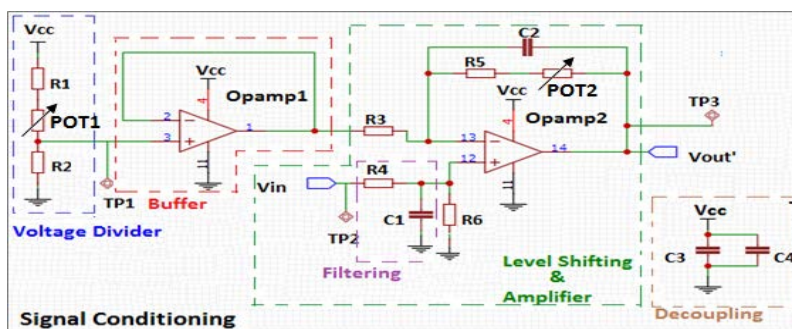


Εικόνα 82 : PCB Shield & Raspberry Pi - Internet of Things

Στην περίπτωση αποτυχία σύνδεσης (connection failure) του συστήματος μέσω των παραπάνω τρόπων δικτύωσης, θα ήταν χρήσιμο η αυτόματη εναλλαγή επικοινωνίας, εκμεταλλευόμενοι το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Για την απρόσκοπτη επικοινωνία του συστήματος, θα μπορούσε να γίνει προσθήκη και παραμετροποίηση ενός usb dongle με κάρτα sim (3G/4G) στη ψηφιακή διάταξη.

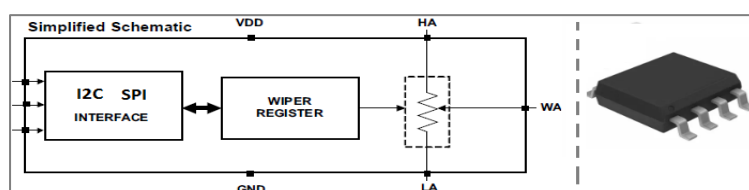
Επιπλέον, λόγω της χαμηλής ενεργειακής απαίτησης που έχει το Raspberry Pi, θα ήταν επωφελή η δυνατότητα αδιάλειπτης τροφοδοσίας του συστήματος μέσω εξωτερικής μπαταρίας (powerbank), η δε φόρτισή της θα μπορούσε να γίνει με φωτοβολταϊκά πάνελ.

Μία σημαντική βελτίωση του τυπωμένου κυκλώματος επέκτασης (pcb shield) για την διασύνδεση και του τρόπου οδήγησης των αισθητηρίων, θα μπορούσε να είναι η προσθήκη δύο (2) ποτενσιόμετρων στο κύκλωμα ρύθμισης σήματος (Signal Conditioning) ανά κανάλι αισθητήρα, έτσι ώστε η προσαρμογή των βαθμίδων “Level Shifting” και “Pre-Amplifier” να πραγματοποιείται μέσω της ρύθμισης των παραπάνω ποτενσιόμετρων, χωρίς να απαιτείται κάθε φορά η κόλληση-αποκόλληση smd αντιστάσεων και χρήση εργαστηριακού πάγκου. Στην *Εικόνα83* φαίνεται η ανασχεδίαση του κυκλώματος οδήγησης αισθητήρα για κάθε κανάλι με την προσθήκη δύο ποτενσιόμετρων *POT1* και *POT2* με σκοπό τη ρύθμιση της τάσης μετατόπισης (v_{offset}) και του κέρδους (gain) αντιστοίχως.



Εικόνα 83 : Κύκλωμα Ρύθμισης Σήματος Αισθητήρων με χρήση Ποτενσιόμετρων

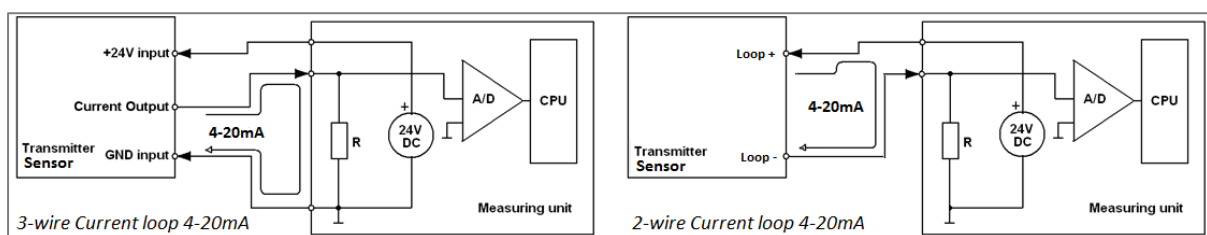
Για υψηλή ακρίβεια των ρυθμίσεων αυτών, μπορεί να γίνει χρήση ψηφιακών ποτενσιόμετρων, εξασφαλίζοντας αξιοπιστία και μηδενικές ανοχές, μειώνοντας συγχρόνως τις παραμέτρους βάρους και μεγέθους. Τα ψηφιακά ποτενσιόμετρα παρουσιάζουν πολύ χαμηλή κατανάλωση ισχύος και για το λόγο αυτό η παροχή τροφοδοσίας τους θα μπορούσε να γίνει απ' ευθείας από τη πηγή τροφοδοσίας +5V του όλου συστήματος. Το μπλοκ διάγραμμα ενός τυπικά ψηφιακού ποτενσιόμετρου φαίνεται στην *Εικόνα84*. Στη περίπτωση χρήσης του θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η περιορισμένη μέγιστη τιμή αντίστασης εξόδου που παρέχει (max 200k) με μέγιστο βήμα τα 1024, καθώς και την αύξηση του βαθμού δυσκολίας που τυχόν θα υπάρξει κατά την σχεδίαση του τυπωμένου κυκλώματος για την δρομολόγηση των ψηφιακών σημάτων διεπαφών ελέγχων (SPI, I2C) μέσα από βαθμίδες καθαρά αναλογικές.



Εικόνα 84 : Μπλοκ Διάγραμμα Ψηφιακού Ποτενσιόμετρου [18]

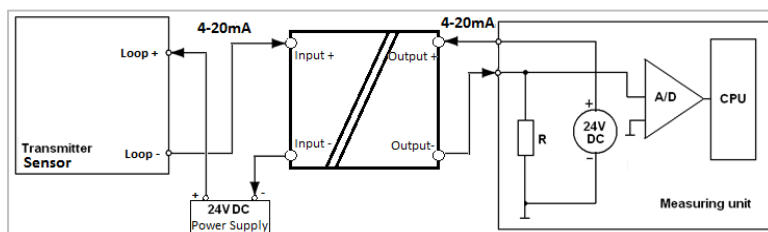
Εκ πρώτης όψεως το εγχείρημα αυτό φαντάζει δύσκολο, καθώς με την προσθήκη ποτενσιόμετρων, περιορίζεται ο αριθμός των αισθητηρίων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, καθώς το κάθε αισθητήριο έχει διαφορετική απόκριση εξόδου. Μία λύση θα ήταν η ομαδοποίηση των αισθητηρίων με βάση το εύρος μεταβολής στην εξόδου τους.

Μία άλλη βελτίωση θα μπορούσε να είναι η δυνατότητα διασύνδεσης αισθητηρίων ρεύματος βρόγχου 4-20mA τριών (3) αγωγών (Εικόνα85). Οι αισθητήρες ρεύματος τριών (3) αγωγών είναι ίδιας λογικής με εκείνη που αναπτύχθηκε στην Ενότητα 1.3.2 με τη διαφορά ότι ο πομπός οδήγησης (transmitter) ενώ κάνει χρήση απλούστερων ηλεκτρονικών βαθμίδων, για την οδήγησή τους απαιτούνται τρεις (3) αγωγοί. Το επιπρόσθετο κόστος καλωδίωσης, όμως μπορεί να είναι υψηλό εάν η απόσταση μεταξύ της μονάδας μέτρησης/προσαρμογής και του πομπού είναι μεγάλη.



Εικόνα 85 : Οδήγηση Αισθητήρων Ρεύματος βρόγχου 4-20mA (δύο και τριών αγωγών) [9]

Σε περιπτώσεις μεγάλων αποστάσεων μεταξύ πομπού και μονάδας μέτρησης, συνιστάται συχνά η χρήση γαλβανικής συσκευής απομόνωσης (Εικόνα86).

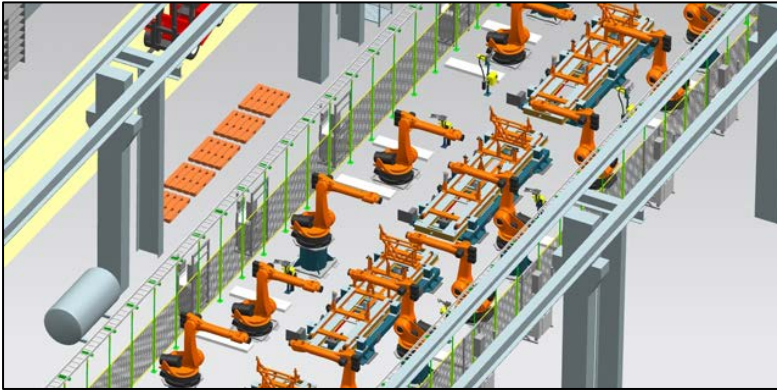


Εικόνα 86 : Οδήγηση Αισθητήρων Ρεύματος βρόγχου 4-20mA (δύο και τριών αγωγών) [10]

7.2 Πεδίο Εύρεσης Εφαρμογών

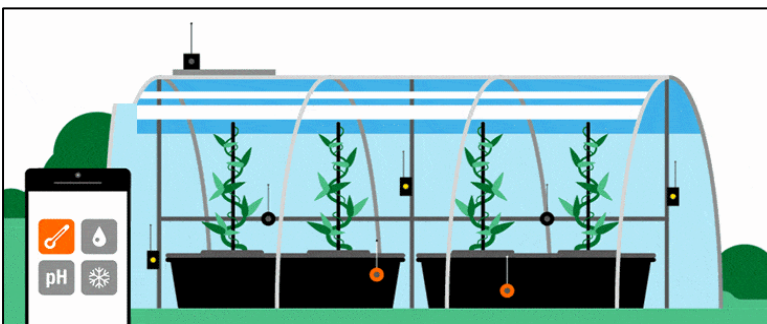
Το υπάρχον σύστημα θα μπορούσε να είχε εφαρμογή στο πεδίο της βιομηχανίας. Ένα από τα σημαντικότερα και πολυπλοκότερα ζητήματα που καλείται να αντιμετωπίσει κάθε βιομηχανία είναι η καθημερινή διαχείριση των μηχανών που διαθέτει για την μαζική παραγωγική διαδικασία. Η διαχείριση αφορά ένα μεγάλο εύρος ενεργειών όπως τον προγραμματισμό της συντήρησής τους, την κατανάλωση αναλωσίμων, καθώς και στην

πρόβλεψη – επιδιόρθωση βλαβών οι οποίες έχουν πολύ σημαντικό επιπρόσθετο κόστος λόγω των καθυστερήσεων που μπορεί να επιφέρουν στην παραγωγική γραμμή. Το εγχείρημα αυτό είναι εξαιρετικά πολύπλοκο, δεδομένου της χρήσης διαφόρων τύπων μηχανών διαφορετικής απόδοσης και ηλικίας. Με σαφώς βελτίωση του υφιστάμενου συστήματος, υπάρχει δυνατότητα παρακολούθησης λειτουργίας της κάθε μηχανής, παρέχοντας σημαντική πληροφόρηση όσον αφορά το χρόνο συντήρησης, τις ανάγκες κάθε μηχανής σε αναλώσιμα και υλικά, ακόμη και στον προγραμματισμό αντικατάστασης “γερασμένων” μηχανών (Εικόνα87).



Εικόνα 87 : Ελεγχόμενη Γραμμή Παραγωγής Εργοστασίου [44]

Μία δεύτερη εφαρμογή που θα μπορούσε να είχε το υφιστάμενο σύστημα, είναι στο τομέα της γεωργικής καλλιέργειας και ειδικότερα στην δημιουργία ενός αυτόνομου “έξυπνου” θερμοκηπίου, αποτελώντας την “καρδιά” της κεντρικής μονάδας ελέγχου μιας σειράς διεργασιών. Με την ενσωμάτωση κατάλληλων αισθητήρων θα ήταν δυνατόν η ανίχνευση και καταγραφή των περιβαλλοντικών παραμέτρων ενός θερμοκηπίου, εξασφαλίζοντας τις κατάλληλες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας του χώρου. Με την προσθήκη αισθητηρίων υγρασίας θα καταγραφόταν το ποσοστό της υγρασίας του εδάφους η οποία θα μπορούσε να ρυθμίζεται αυτόματα μέσω συστημάτων άρδευσης, ενώ θα υπήρχε και η δυνατότητα μέτρησης της ενεργής οξύτητας του εδάφους (pH), πληροφορία σημαντική για την καλλιέργεια λουλουδιών, λαχανικών και φρούτων. Η χρήση αισθητηρίων φωτός και ανέμου θα μπορούσαν να ελέγχουν τα συστήματα σκίασης και προστασίας του θερμοκηπίου (Εικόνα88).

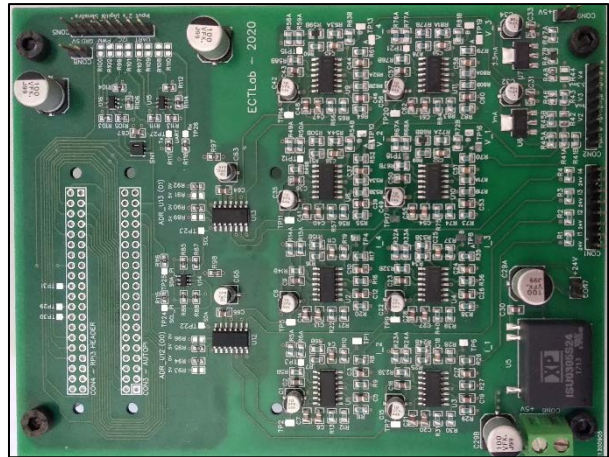


Εικόνα 88 : “Έξυπνο” IoT Θερμοκήπιο [45]

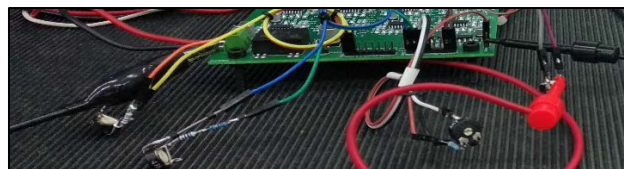
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α :
ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΩΝ
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΤΟΥ
ΤΥΠΩΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ECT LAB



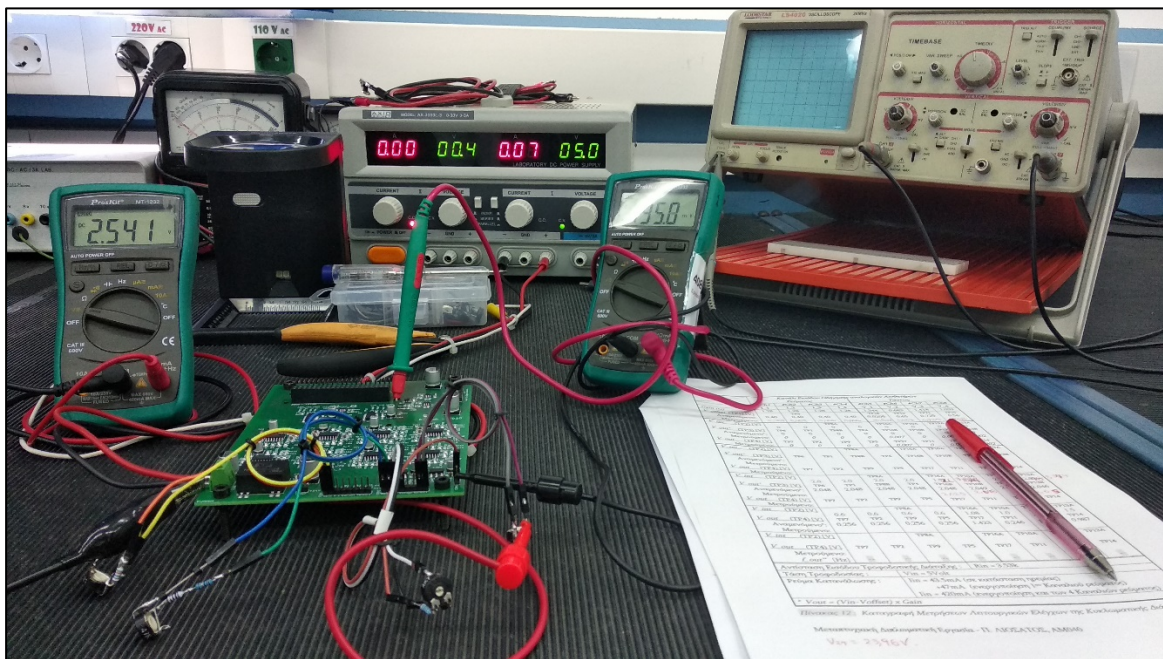
Οπτικός Έλεγχος PCB



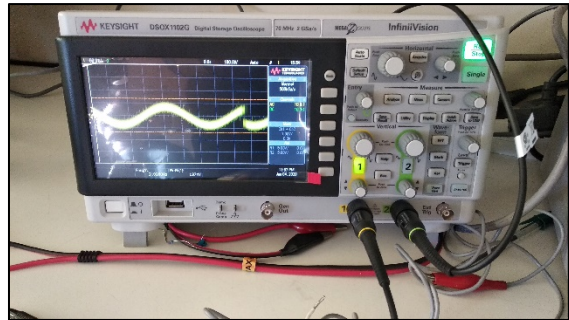
Το Τυπωμένο Κύκλωμα



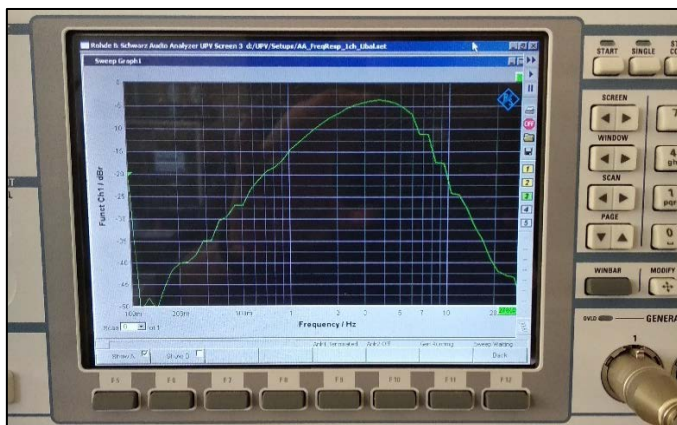
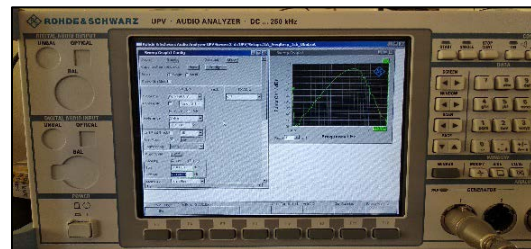
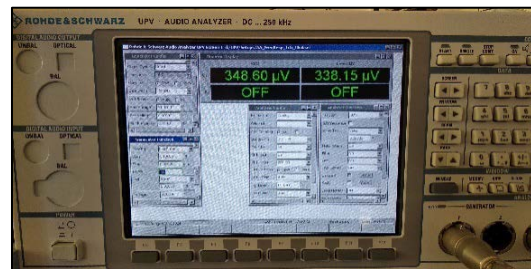
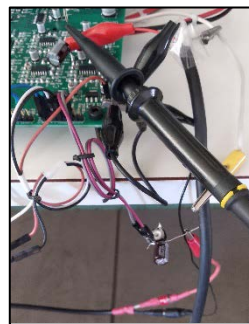
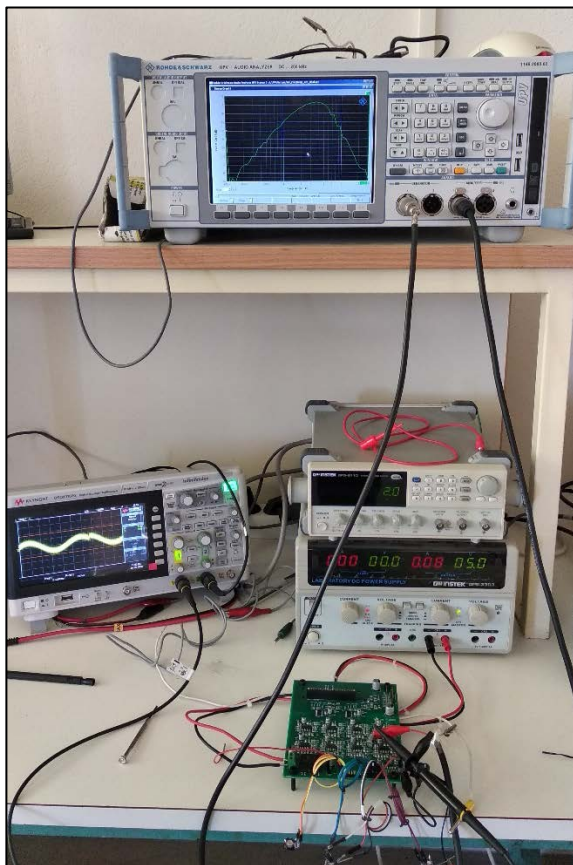
Υποκατάστατα Κυκλώματα Αισθητηρίων



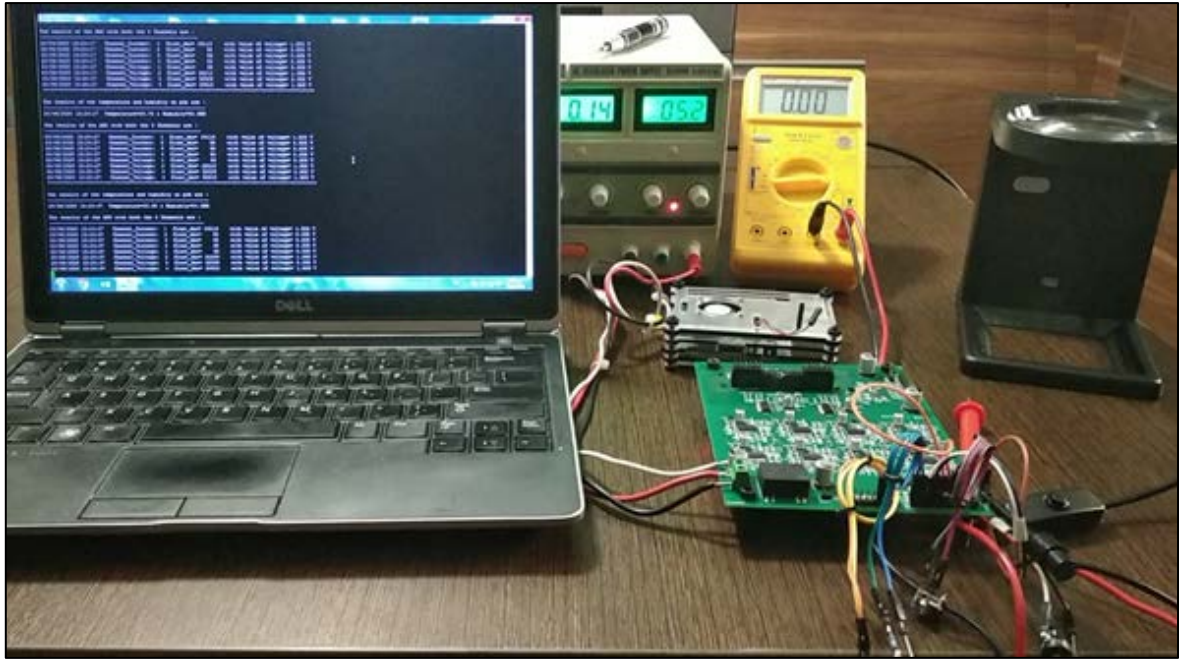
Λειτουργικοί Έλεγχοι και Διεξαγωγή Μετρήσεων Αναλογικής Διάταξης



Λειτουργικοί Έλεγχοι και Διεξαγωγή Μετρήσεων Αναλογικής Διάταξης



Έλεγχοι Απόκρισης Χαμηλοπερατού Φίλτρου Butterworth



Συνολική Παρουσίαση Συστήματος (Διασύνδεση Pi με PCB Shield)

```

pi@raspberrypi:~$ login as: pi
pi@192.168.43.10's password:
Linux raspberrypi 4.19.97-v7+ #1293 SMP Wed Jan 22 17:10:55 GMT 2020 armv7l

The programs included with the Debian GNU/Linux system are free software;
the exact distribution terms for each program are described in the
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.

Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent
permitted by applicable law.
Last login: Sat Jun 20 12:17:09 2020

SSH is enabled and the default password for the 'pi' user has not been changed.
This is a security risk - please login as the 'pi' user and type 'passwd' to set
a new password.

pi@raspberrypi:~$ i2cdetect -y 1
0: 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 a b c d e f
10: -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- --
20: -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- --
30: -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- --
40: 40 -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- --
50: -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- --
60: -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- --
70: -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- --
pi@raspberrypi:~$
  
```

Αναγνώριση Συσκευών - διασύνδεση I2C

```

pi@raspberrypi:~/dev/test$ nano ./Results.txt
GNU nano 2.2.2

-----
THE RESULTS OF THE PI PCB SHIELD ARE :
-----

The results of the temperature and humidity on pcb are :
20/06/2020 15:58:47 Temperature=32.8C & Humidity=38.1RH

The results of the ADC with both the 8 Channels are :
20/06/2020 15:58:47 Channel_Current : 1 float_dec = 83 with value of voltage = 0.005 V
20/06/2020 15:58:47 Channel_Current : 2 float_dec = 91 with value of voltage = 0.006 V
20/06/2020 15:58:47 Channel_Current : 3 float_dec = 78 with value of voltage = 0.005 V
20/06/2020 15:58:47 Channel_Current : 4 float_dec = 29353 with value of voltage = 1.835 V
20/06/2020 15:58:47 Channel_Voltage : 1 float_dec = 104 with value of voltage = 0.007 V
20/06/2020 15:58:47 Channel_Voltage : 2 float_dec = 22137 with value of voltage = 1.384 V
20/06/2020 15:58:47 Channel_Voltage : 3 float_dec = 31417 with value of voltage = 1.964 V
20/06/2020 15:58:47 Channel_Voltage : 4 float_dec = 30196 with value of voltage = 1.887 V
-----

The results of the temperature and humidity on pcb are :
20/06/2020 15:58:57 Temperature=32.8C & Humidity=38.0RH

The results of the ADC with both the 8 Channels are :
20/06/2020 15:58:57 Channel_Current : 1 float_dec = 83 with value of voltage = 0.005 V
20/06/2020 15:58:57 Channel_Current : 2 float_dec = 91 with value of voltage = 0.006 V
20/06/2020 15:58:57 Channel_Current : 3 float_dec = 77 with value of voltage = 0.005 V
20/06/2020 15:58:57 Channel_Current : 4 float_dec = 29352 with value of voltage = 1.835 V
20/06/2020 15:58:57 Channel_Voltage : 1 float_dec = 104 with value of voltage = 0.007 V
-----
  
```

Καταγραφή Αποτελεσμάτων σε αρχείο txt

```

pi@raspberrypi:~/dev/test$ python3 ./test_adc_backup.py

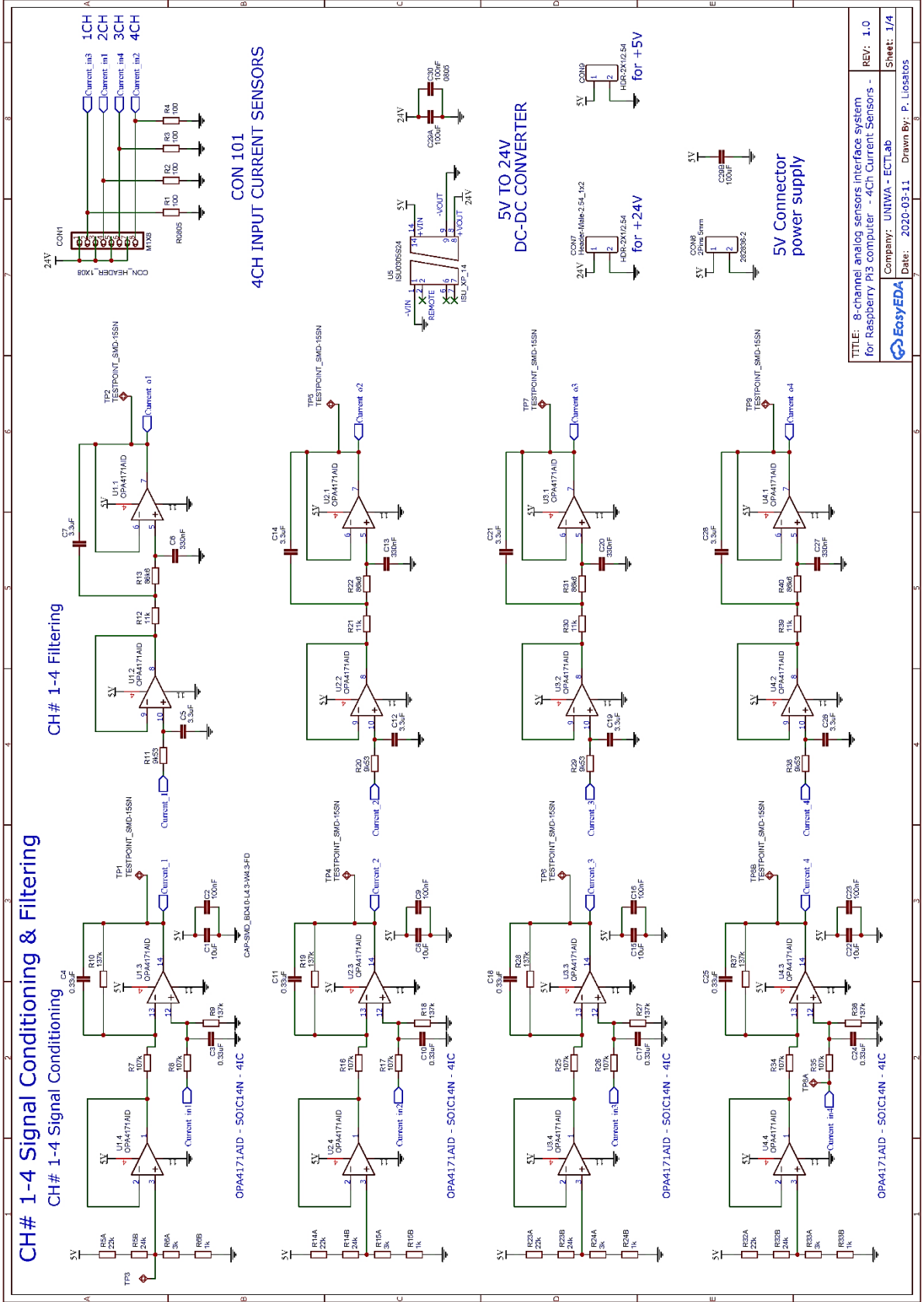
-----
THE RESULTS OF THE PI PCB SHIELD ARE :
-----

The results of the temperature and humidity on pcb are :
20/06/2020 15:58:47 Temperature=32.8C & Humidity=38.1RH

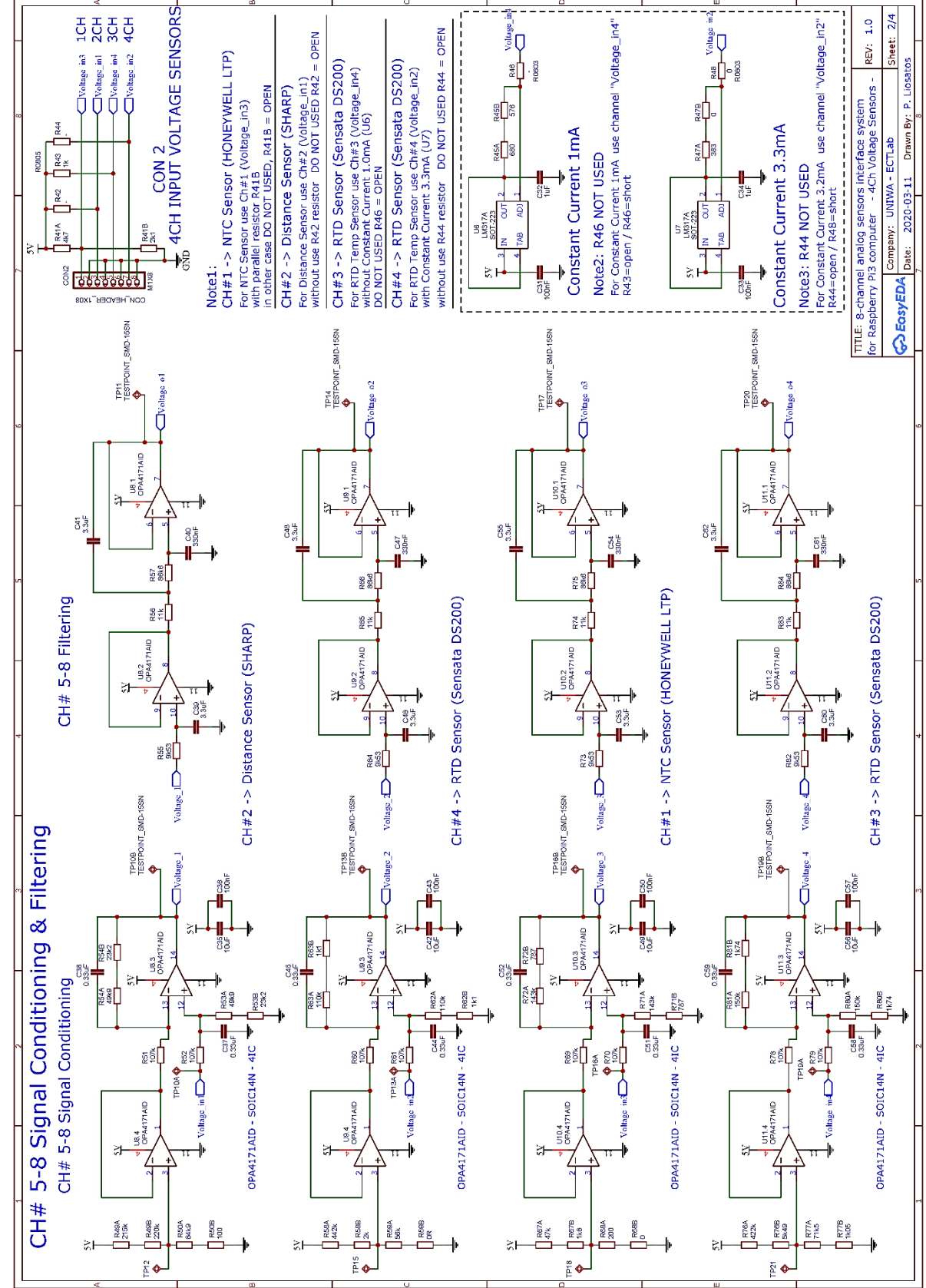
The results of the ADC with both the 8 Channels are :
20/06/2020 15:58:47 Channel_Current: 1 float_dec= 83 with value of voltage= 0.005 V
20/06/2020 15:58:47 Channel_Current: 2 float_dec= 91 with value of voltage= 0.006 V
20/06/2020 15:58:47 Channel_Current: 3 float_dec= 78 with value of voltage= 0.005 V
20/06/2020 15:58:47 Channel_Current: 4 float_dec= 29353 with value of voltage= 1.835 V
20/06/2020 15:58:47 Channel_Voltage: 1 float_dec= 104 with value of voltage= 0.007 V
20/06/2020 15:58:47 Channel_Voltage: 2 float_dec= 22137 with value of voltage= 1.384 V
20/06/2020 15:58:47 Channel_Voltage: 3 float_dec= 31417 with value of voltage= 1.964 V
20/06/2020 15:58:47 Channel_Voltage: 4 float_dec= 30196 with value of voltage= 1.887 V
-----
  
```

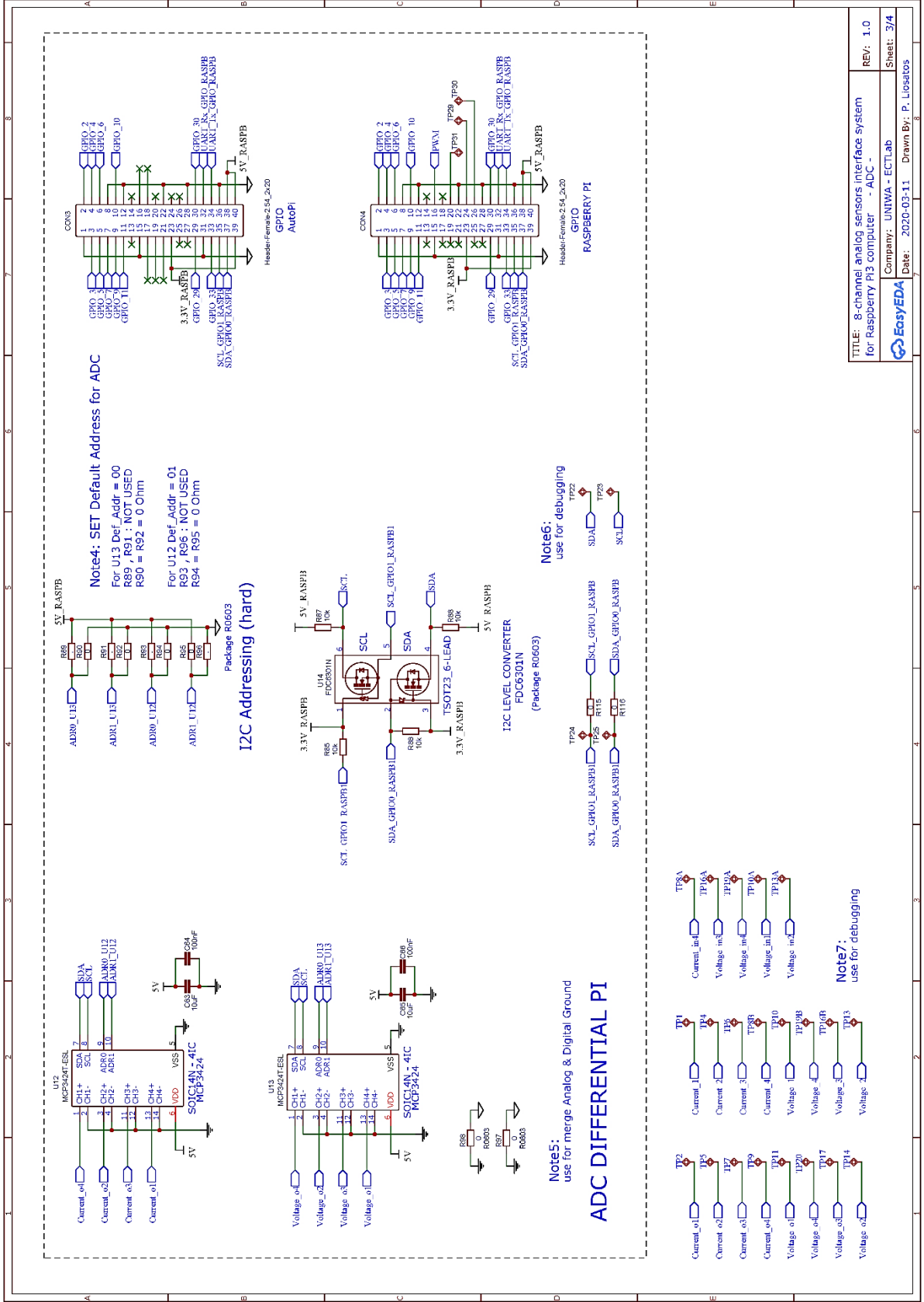
Εμφάνιση Αποτελεσμάτων στην Οθόνη

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β :
ΣΧΗΜΑΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

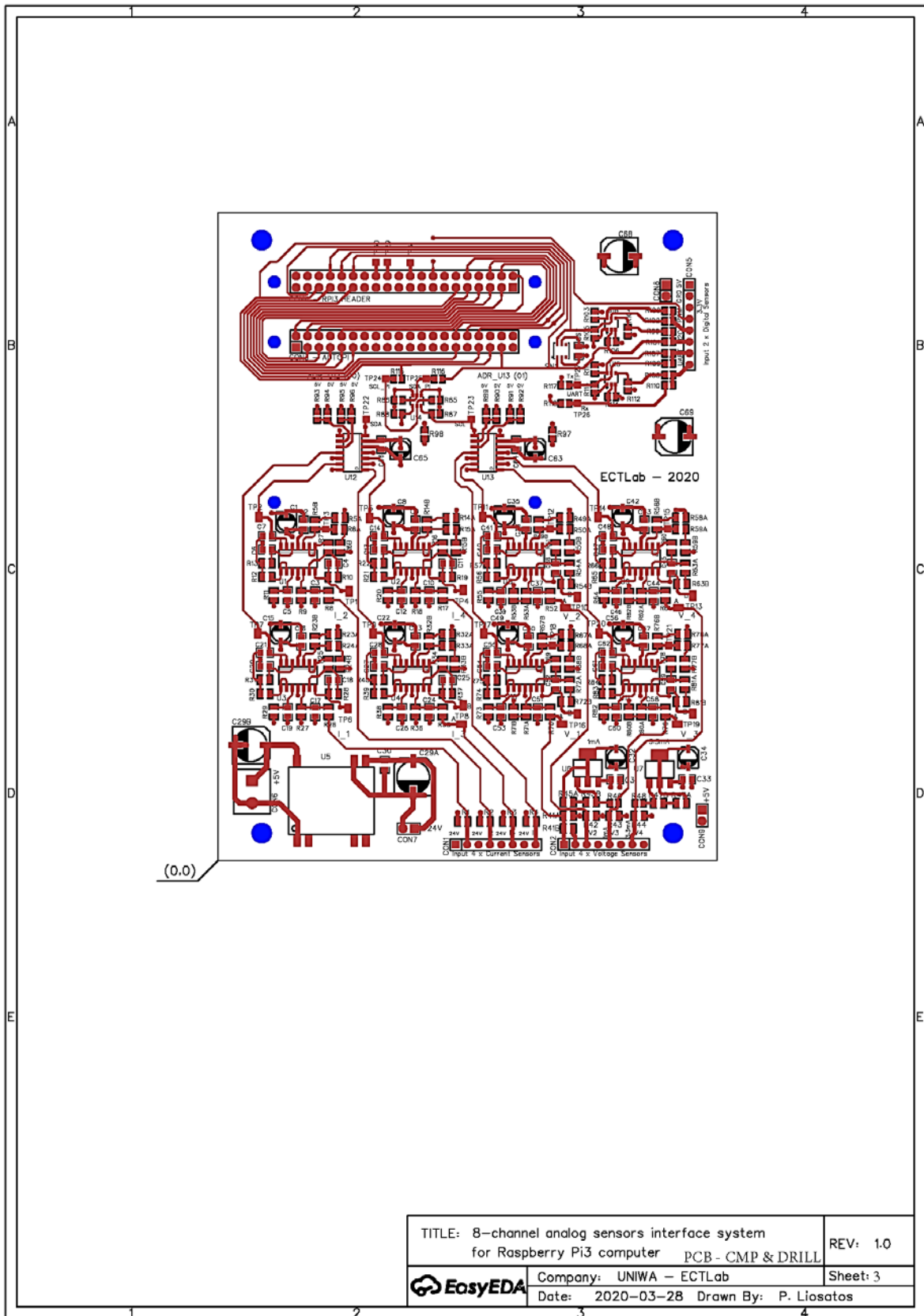


TITLE: 8-channel analog sensors interface system
 for Raspberry Pi3 computer - 4ch Current Sensors -
 Company: UNWA - ECTLab
 Date: 2020-03-11 Drawn By: P. Liosatos
 REV: 1.0
 Sheet: 1/4

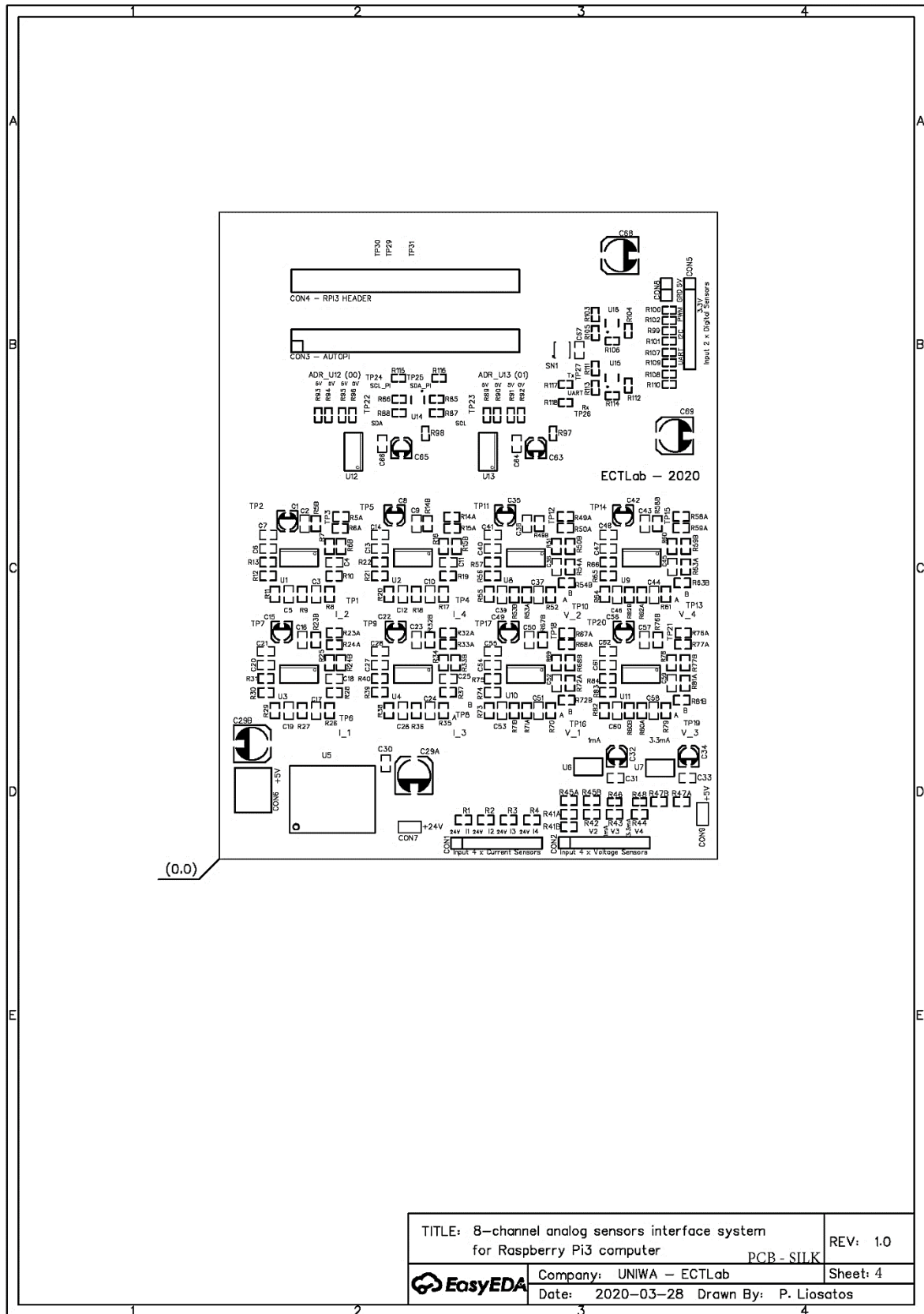


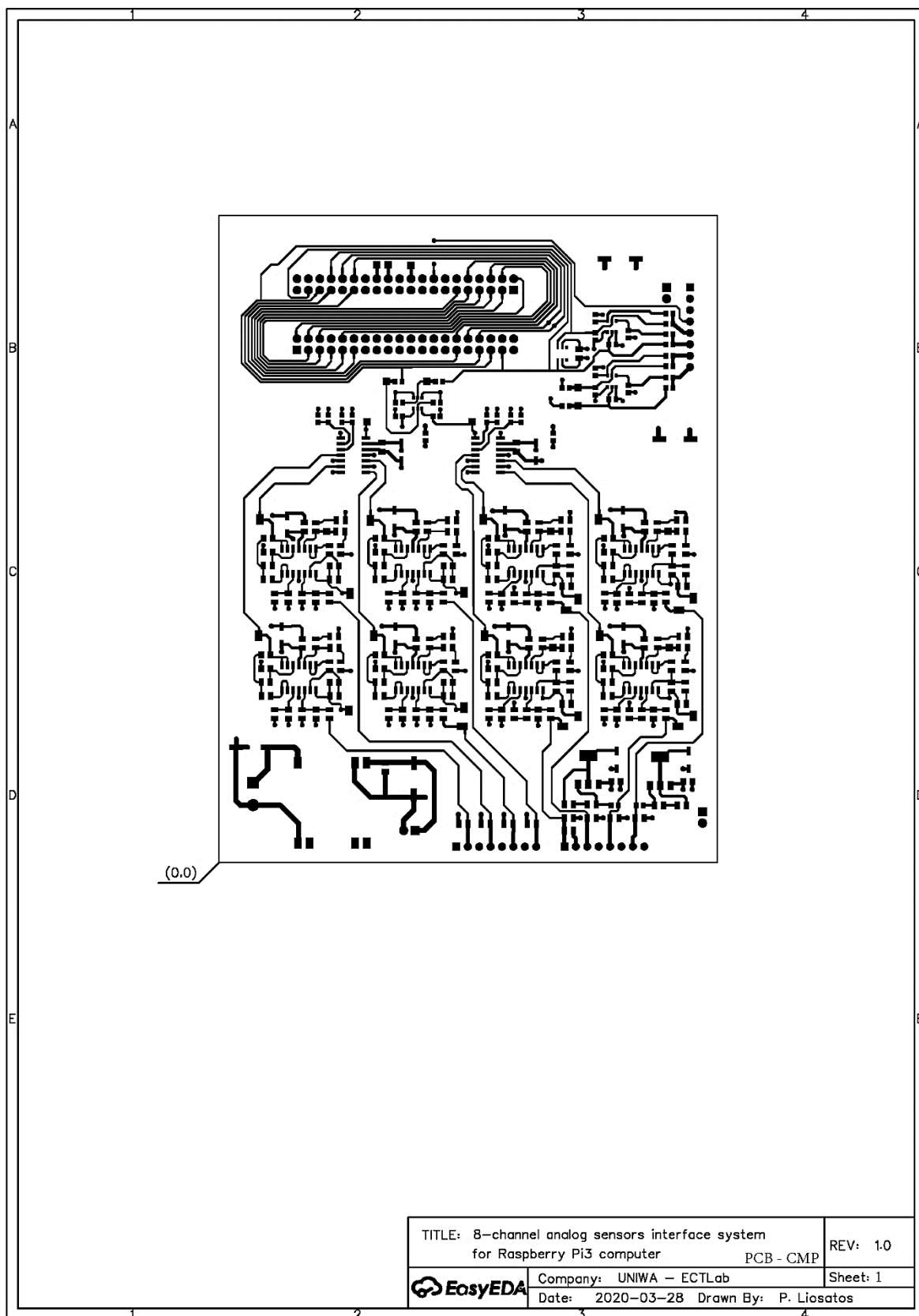


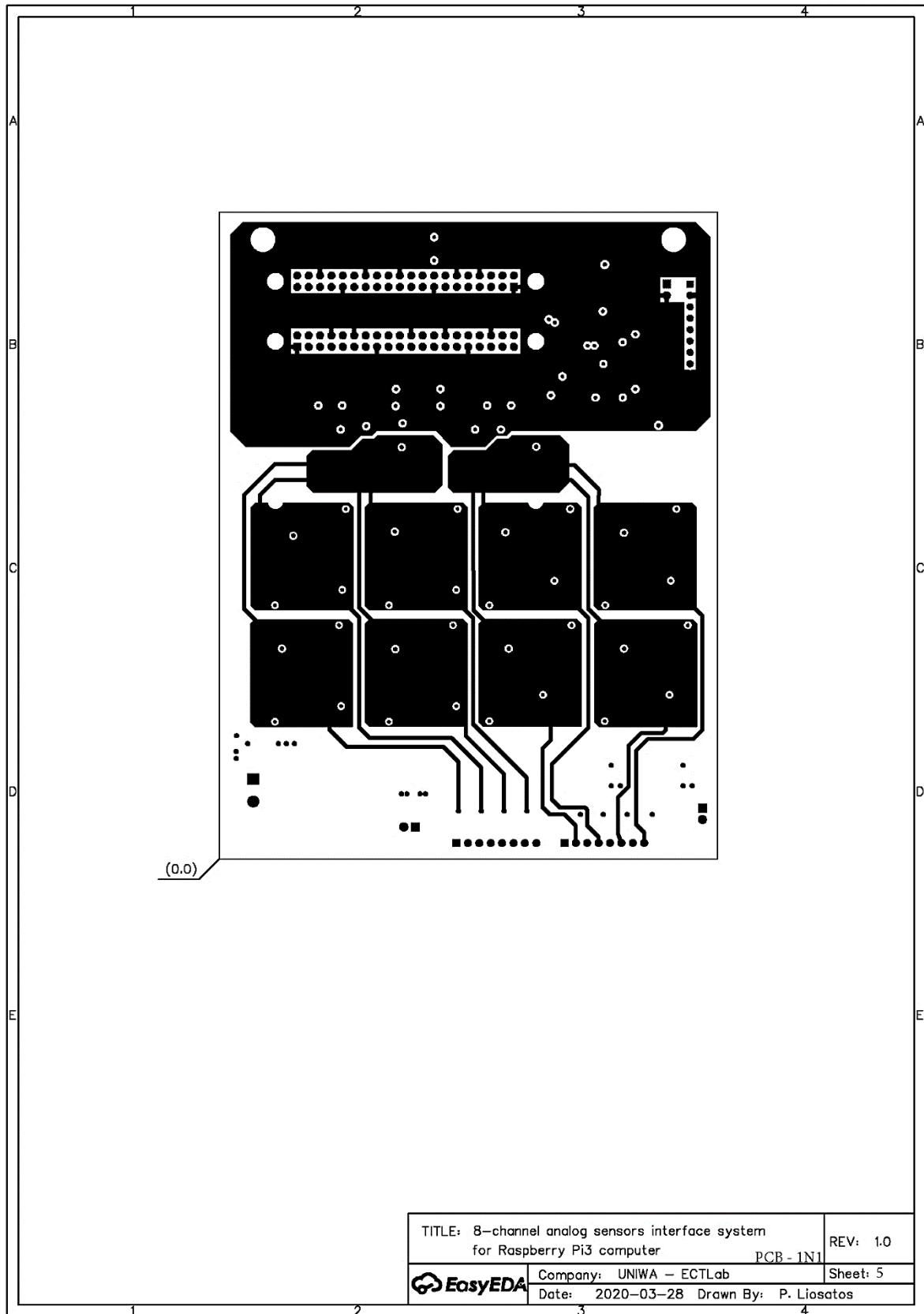
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ :
ΑΡΧΕΙΑ OUTPUT – Gerber Files

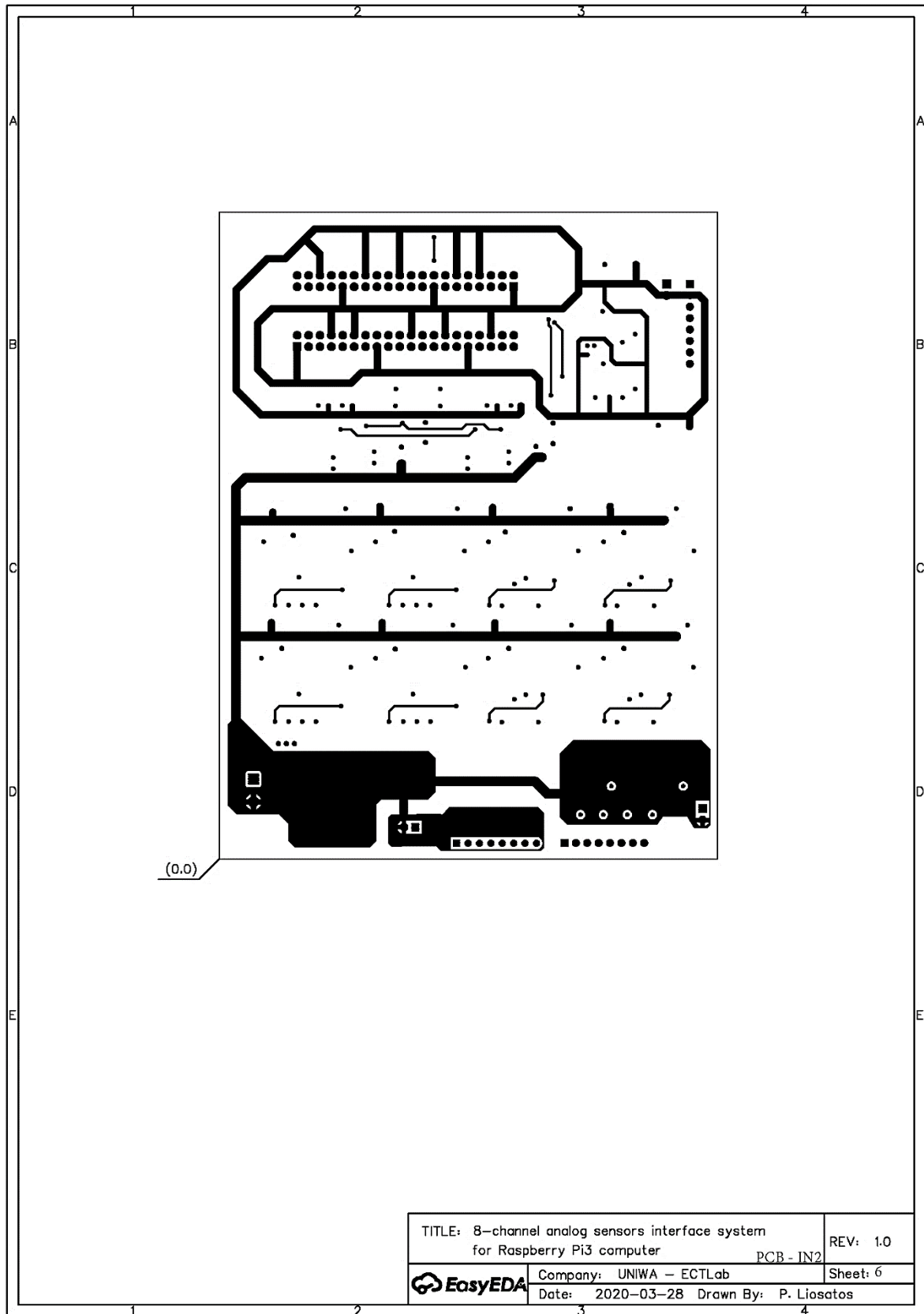


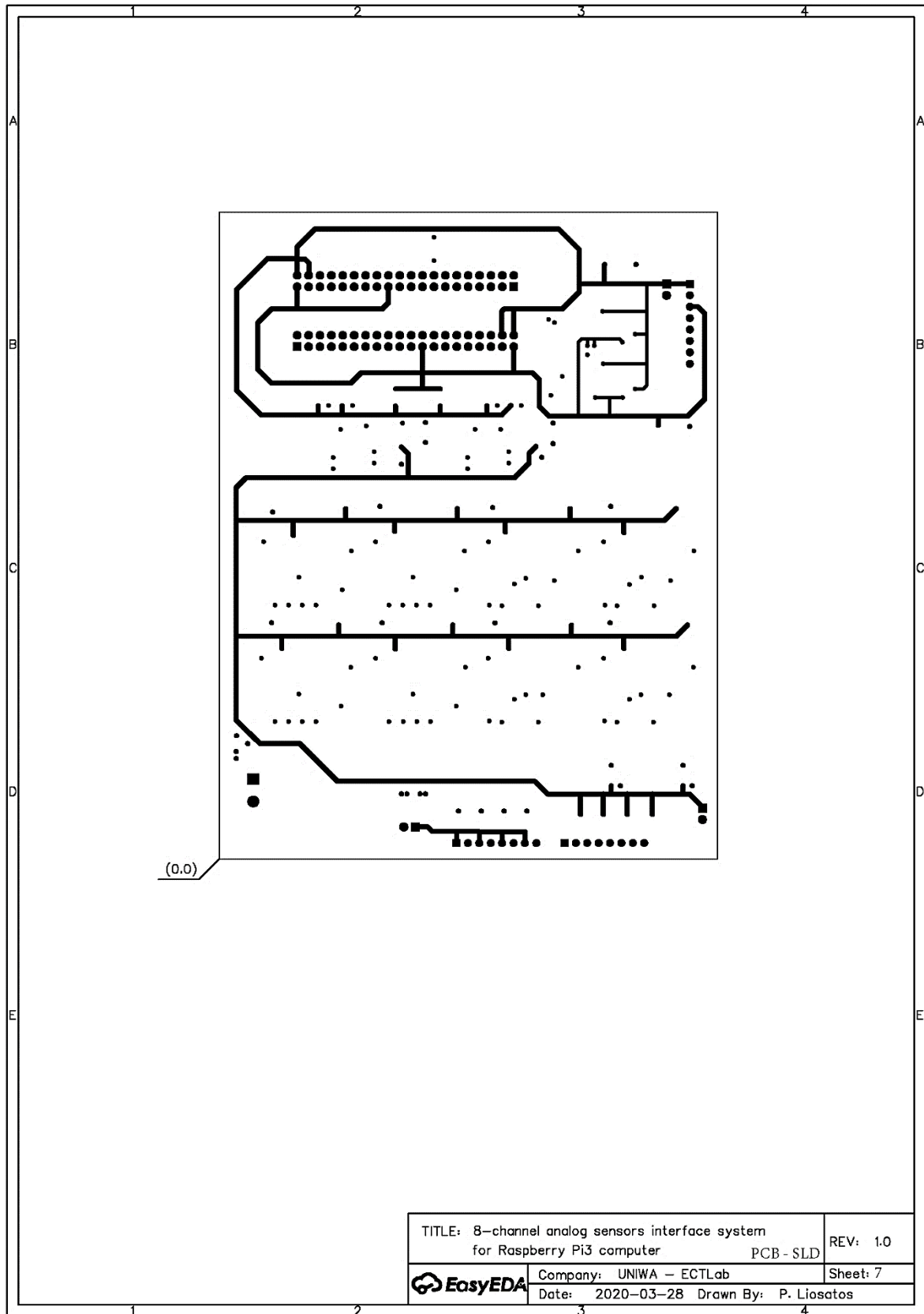
TITLE: 8-channel analog sensors interface system for Raspberry Pi3 computer PCB - CMP & DRILL		REV: 1.0
	Company: UNIWA - ECTLab	Sheet: 3
	Date: 2020-03-28 Drawn By: P. Liosatos	









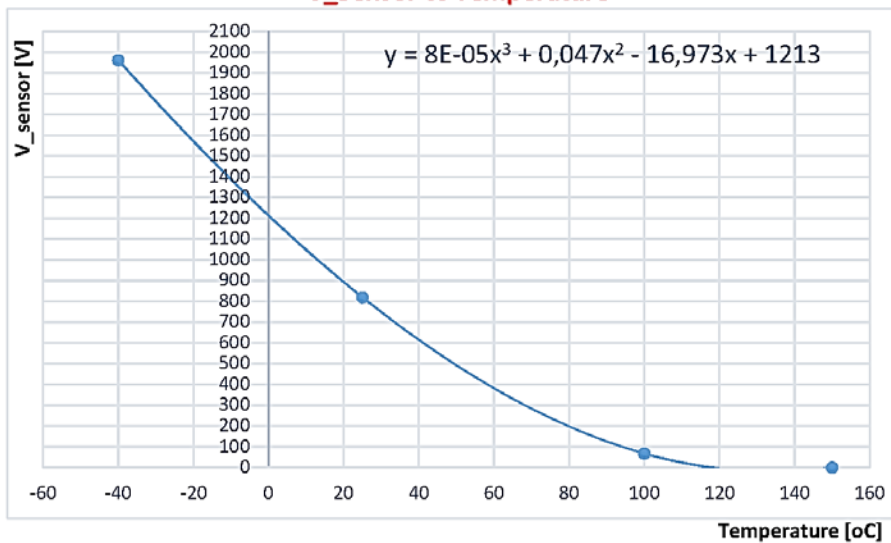


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ :
ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΩΝ

Βαθμονόμηση NTC Θερμίστορ (NTC-1000 Honeywell)

ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	Vcc= 5	[Volt]		
	Rp= 4700	[Ohm]		
	R= 2100	[Ohm]		
	G= 1,344			
Temperature [oC]	Rsensor [Ω]	Rsenspr//R	Is [mA]	Vs [mVolt]
	typ			
-40	33487,40	1976,08	0,749	1961,833
25	1000,00	677,42	0,930	819,304
100	69,24	67,03	1,049	67,244
150	19,31	19,13	1,060	0,000

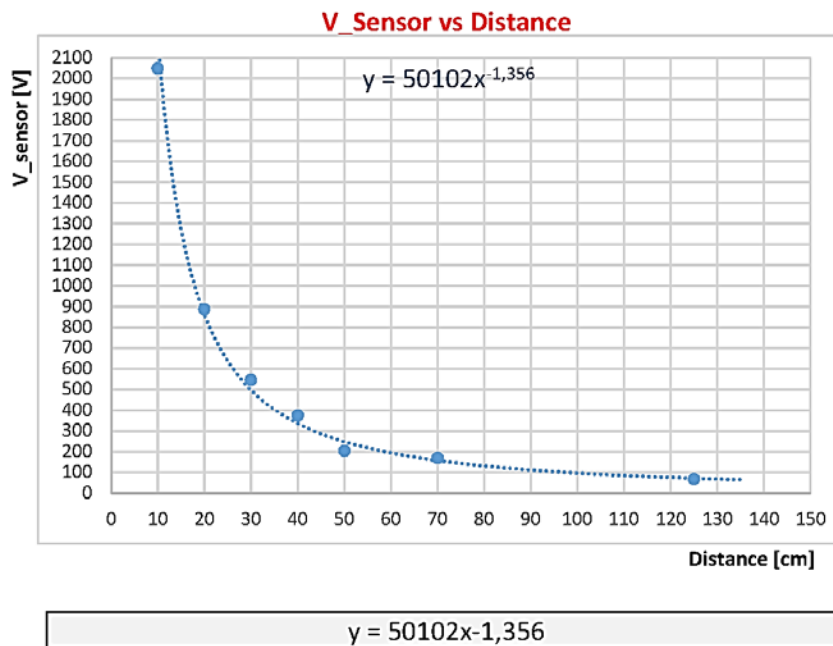
V_Sensor vs Temperature



$$y = 8E-05x^3 + 0,047x^2 - 16,973x + 1213$$

Βαθμονόμηση Distance Sensor Sharp

ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	Vcc= 5 [Volt]	
	G= 0,683	
Distance [cm]	Vsensor [V]	Vs [mVolt]
typ Vcc=5V		
10	3,65	2049,00
20	1,95	887,90
30	1,45	546,40
40	1,20	375,65
50	0,95	204,90
70	0,90	170,75
125	0,75	68,30
150	0,65	0,01

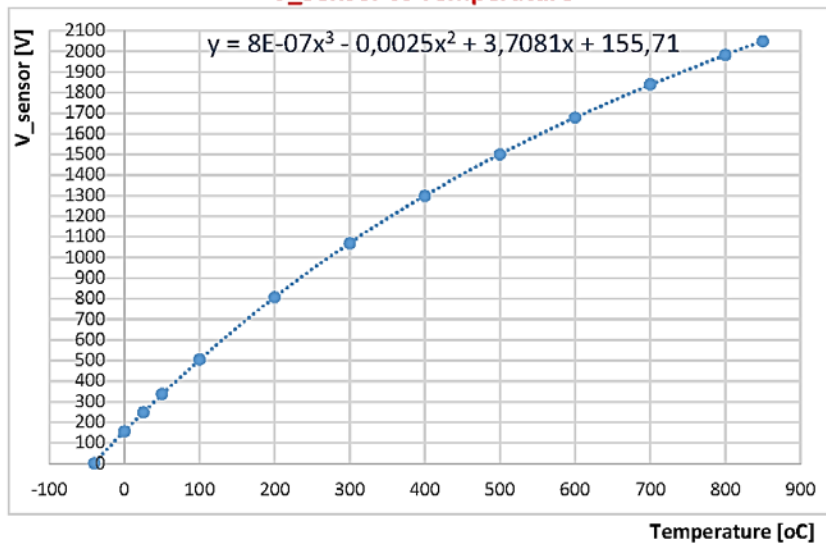


Βαθμονόμηση RTD Sensata PT-200

(μέσω pull-up Αντίστασης)

ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	Vcc=	5	[Volt]
	Rpull-up=	1000	[Ohm]
G= 1,418			
Temperature [oC]	Vsensor [V]	Vs [mVolt]	
typ Vcc=5V			
-40	0,725	0,00	
0	0,835	155,98	
25	0,900	248,15	
50	0,963	337,48	
100	1,081	504,81	
200	1,293	805,42	
300	1,478	1067,75	
400	1,640	1297,47	
500	1,783	1500,24	
600	1,909	1678,91	
700	2,022	1839,15	
800	2,123	1982,36	
850	2,170	2049,01	

V_Sensor vs Temperature



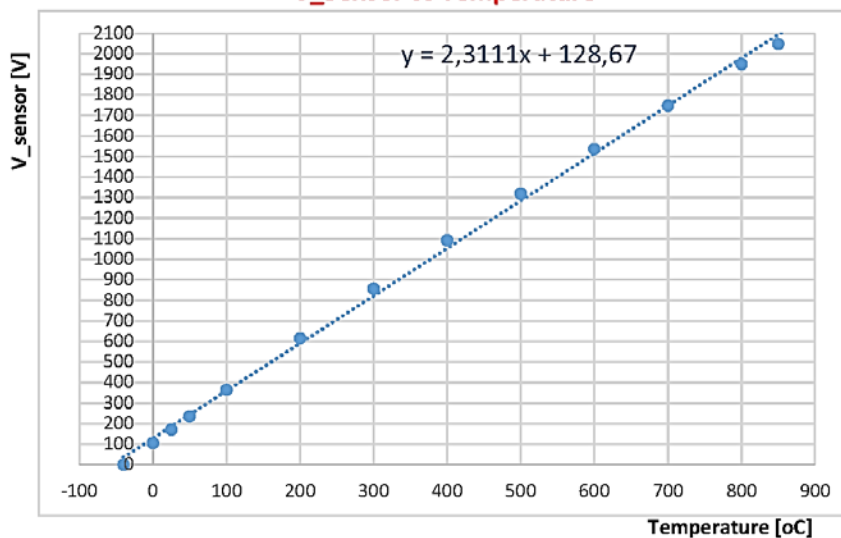
$$y = 8E-07x^3 - 0,0025x^2 + 3,7081x + 155,71$$

Βαθμονόμηση RTD Sensata PT-200

(μέσω Constant Current)

ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	V _{CC} = 5	[Volt]		
	G= 1,039			
	I= 3,3	[mA]		
Temperature [oC]	Rsensor [Ω]	I _{sensor} [mA]	V _s [mVolt]	V _{sensor} [mV]
typ V _{CC} =5V				
-40	169,700	3,300	560,01	0,000
0	200,500	3,300	661,65	105,604
25	219,600	3,300	724,68	171,092
50	238,500	3,300	787,05	235,895
100	275,900	3,300	910,47	364,128
200	349,000	3,300	1151,70	614,766
300	419,700	3,300	1385,01	857,175
400	488,100	3,300	1610,73	1091,698
500	554,100	3,300	1828,53	1317,992
600	617,800	3,300	2038,74	1536,400
700	679,200	3,300	2241,36	1746,923
800	738,200	3,300	2436,06	1949,216
850	766,800	3,300	2530,44	2047,277

V_Sensor vs Temperature



$$y = 2,3111x + 128,67$$

Βαθμονόμηση Pressure Heavy Duty - Honeywell - PX2

BOHΘHTIKA ΣΤΟΙΧΕΙΑ	Vcc= 24	[Volt]
		I= 4mA - 16mA
	Rs= 100	[Ohm]
	G= 1,28	

Pressure [psi]	I [mA]	Vs [mVolt]	Vs [mVolt]
15	4,00	400,00	0,000
30	4,37	437,11	47,505
50	4,87	486,60	110,844
100	6,10	610,31	269,194
150	7,34	734,02	427,543
200	8,58	857,73	585,892
250	9,81	981,44	744,241
300	11,05	1105,15	902,590
500	16,00	1600,00	1536,000

Λόγω γραμμικότητας στην έξοδο του αισθητήρα : $P = a \times I + b$

$$15 = a \times 4 + b$$

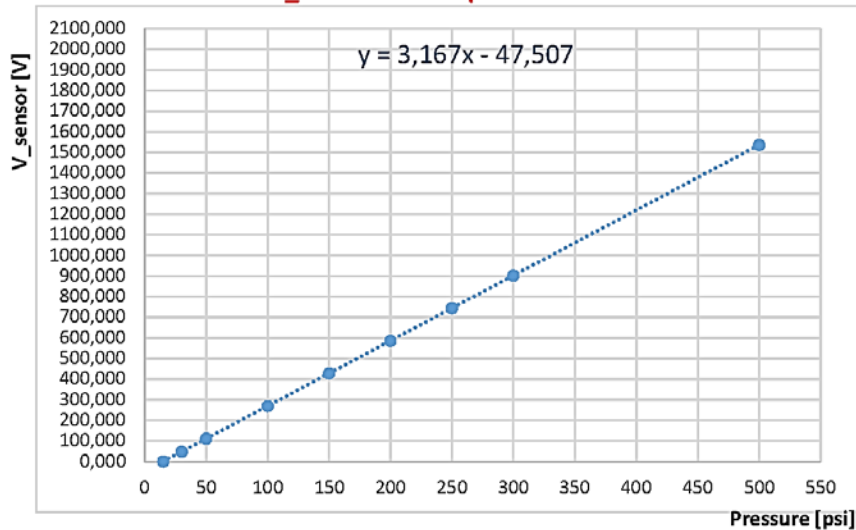
$$500 = a \times 16 + b$$

$$a = 40,417$$

$$b = -146,668$$

$$P = 40,417 \times I - 146,668$$

V_Sensor vs Temperature



$$y = 3,167x - 47,507$$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε :
ΠΗΓΑΙΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ

ΑΡΧΙΚΗ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΚΑΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ :

```
~ $ sudo apt-get update # ανανέωση και αναβάθμιση εφαρμογών rasbian
~ $ sudo apt-get upgrade
~ $ sudo apt-get install xrdp
~ $ sudo import RPi.GPIO as GPIO # εγκατάσταση βιβλιοθήκης GPIO connector για RPi3
~ $ sudo GPIO.setmode(GPIO.BOARD) # χρήση φυσικού συστήματος αρίθμησης GPIO
~ $ sudo apt-get install i2c-tools # εγκατάσταση εργαλείων i2
~ $ sudo raspi-config # εμφάνιση παραθύρου interfacing options του Raspberry Pi
~ $ sudo apt-get install python-smbus # εγκατάσταση βιβλιοθήκης smbus, υλοποιεί ένα
~ $ sudo reboot
~ $ sudo i2cdetect -y 1 # έλεγχος καλής λειτουργίας του i2c με ανίχνευση συσκευών σύνδεσης
~ $ sudo python setup.py install
```

ΠΗΓΑΙΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΝΑΛΟΓΙΚΟ ΣΕ ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ :

```
#!/usr/bin/env python

"""
Requires smbus2 or python smbus to be installed
"""

from __future__ import absolute_import, division, print_function, \ unicode_literals
try:
    from smbus2 import SMBus
except ImportError:
    try:
        from smbus import SMBus
    except ImportError:
        raise ImportError("python-smbus or smbus2 not found")

import re
import platform
import time

class ADCDifferentialPi:

    """
    Control the MCP3424 ADC on the ADC Differential Pi and Delta-Sigma Pi
    """

    # internal variables
    __adc1_address = 0x68
    __adc2_address = 0x6A

    __adc1_conf = 0x9C
    __adc2_conf = 0x9C

    __adc1_channel = 0x01
    __adc2_channel = 0x01

    __bitrate = 18 # current bitrate
    __conversionmode = 1 # conversion Mode
    __pga = float(0.5) # current pga setting
```

```

__lsb = float(0.0000078125) # default lsb value for 18 bit
__signbit = 0 # stores the sign bit for the sampled value
# create byte array and fill with initial values to define size
__adcreading = bytearray([0, 0, 0, 0])
__bus = None

# local methods
@staticmethod
def __get_smbus():

"""
internal method for getting an instance of the i2c bus
"""

i2c__bus = 1 # detect the device that is being used
device = platform.uname()[1]

if device == "orangeppone": # running on orange pi one
i2c__bus = 0

elif device == "orangepiplus": # running on orange pi plus
i2c__bus = 0

elif device == "orangepipcplus": # running on orange pi pc plus
i2c__bus = 0

elif device == "linaro-alip": # running on Asus Tinker Board
i2c__bus = 1

elif device == "raspberrypi": # running on raspberry pi
# detect i2C port number and assign to i2c__bus
for line in open('/proc/cpuinfo').readlines():
model = re.match('(.*)\\s*:\\s*(.*)', line)
if model:
(name, value) = (model.group(1), model.group(2))
if name == "Revision":
if value[-4:] in ('0002', '0003'):
i2c__bus = 0
else:
i2c__bus = 1
break
try:
return SMBus(i2c__bus)
except IOError:
raise IOError('Could not open the i2c bus')

def __updatebyte(self, byte, mask, value):
byte &= mask
byte |= value
return byte

def __setchannel(self, channel):
# internal method for updating the config to the selected channel
if channel < 5:
if channel != self.__adc1_channel:
self.__adc1_channel = channel

```

```

        if channel == 1: # bit 5 = 1, bit 6 = 0
            self.__adc1_conf = self.__updatebyte(self.__adc1_conf, 0x9F, 0x00)
        elif channel == 2: # bit 5 = 1, bit 6 = 0
            self.__adc1_conf = self.__updatebyte(self.__adc1_conf, 0x9F, 0x20)
        elif channel == 3: # bit 5 = 0, bit 6 = 1
            self.__adc1_conf = self.__updatebyte(self.__adc1_conf, 0x9F, 0x40)
        elif channel == 4: # bit 5 = 1, bit 6 = 1
            self.__adc1_conf = self.__updatebyte(self.__adc1_conf, 0x9F, 0x60)
    else:
        if channel != self.__adc2_channel:
            self.__adc2_channel = channel
        if channel == 5: # bit 5 = 1, bit 6 = 0
            self.__adc2_conf = self.__updatebyte(self.__adc2_conf, 0x9F, 0x00)
        elif channel == 6: # bit 5 = 1, bit 6 = 0
            self.__adc2_conf = self.__updatebyte(self.__adc2_conf, 0x9F, 0x20)
        elif channel == 7: # bit 5 = 0, bit 6 = 1
            self.__adc2_conf = self.__updatebyte(self.__adc2_conf, 0x9F, 0x40)
        elif channel == 8: # bit 5 = 1, bit 6 = 1
            self.__adc2_conf = self.__updatebyte(self.__adc2_conf, 0x9F, 0x60)
    return

# init object with i2caddress, default is 0x68, 0x69 for ADCoPi board
def __init__(self, address=0x68, address2=0x6A, rate=18):

    self.__bus = self.__get_smbus()
    self.__adc1_address = address
    self.__adc2_address = address2
    self.set_bit_rate(rate)

    def read_voltage(self, channel):

        """
        returns the voltage from the selected adc channel - channels 1 to 8
        """

        raw = self.read_raw(channel)

        if self.__signbit:
            voltage = (raw * (self.__lsb / self.__pga)) - (2.048 / (self.__pga * 2))
        else:
            voltage = (raw * (self.__lsb / self.__pga))
        return float(voltage)

    def read_raw(self, channel):

        """
        reads the raw value from the selected adc channel - channels 1 to 8
        """

        high = 0
        low = 0
        mid = 0
        cmdbyte = 0

        # get the config and i2c address for the selected channel

```

```

self.__setchannel(channel)
if channel > 0 and channel < 5:
    config = self.__adc1_conf
    address = self.__adc1_address
elif channel < 9:
    config = self.__adc2_conf
    address = self.__adc2_address
else:
    raise ValueError('read_raw: channel out of range')

# if the conversion mode is set to one-shot update the ready bit to 1
if self.__conversionmode == 0:
    config = config | (1 << 7)
    self.__bus.write_byte(address, config)
    config = config & ~(1 << 7) # reset the ready bit to 0

# determine a reasonable amount of time to wait for a conversion
if self.__bitrate == 18:
    seconds_per_sample = 0.26666
elif self.__bitrate == 16:
    seconds_per_sample = 0.06666
elif self.__bitrate == 14:
    seconds_per_sample = 0.01666
elif self.__bitrate == 12:
    seconds_per_sample = 0.00416
timeout_time = time.time() + (100 * seconds_per_sample)

# keep reading the adc data until the conversion result is ready
while True:
    __adcreading = self.__bus.read_i2c_block_data(address, config, 4)
    if self.__bitrate == 18:
        high = __adcreading[0]
        mid = __adcreading[1]
        low = __adcreading[2]
        cmdbyte = __adcreading[3]
    else:
        high = __adcreading[0]
        mid = __adcreading[1]
        cmdbyte = __adcreading[2]
    # check if bit 7 of the command byte is 0.
    if(cmdbyte & (1 << 7)) == 0:
        break
    elif time.time() > timeout_time:
        msg = 'read_raw: channel %i conversion timed out' % channel
        raise TimeoutError(msg)
    else:
        time.sleep(0.00001) # sleep for 10 microseconds

self.__signbit = False
raw = 0

# extract the returned bytes and combine in the correct order
if self.__bitrate == 18:
    raw = ((high & 0x03) << 16) | (mid << 8) | low
    self.__signbit = bool(raw & (1 << 17))
    raw = raw & ~(1 << 17) # reset sign bit to 0

```

```

elif self.__bitrate == 16:
    raw = (high << 8) | mid
    self.__signbit = bool(raw & (1 << 15))
    raw = raw & ~(1 << 15) # reset sign bit to 0

elif self.__bitrate == 14:
    raw = ((high & 0b00111111) << 8) | mid
    self.__signbit = bool(raw & (1 << 13))
    raw = raw & ~(1 << 13) # reset sign bit to 0

elif self.__bitrate == 12:
    raw = ((high & 0x0f) << 8) | mid
    self.__signbit = bool(raw & (1 << 11))
    raw = raw & ~(1 << 11) # reset sign bit to 0

return raw
def set_pga(self, gain):

"""
PGA gain selection    1 = 1x    2 = 2x    4 = 4x    8 = 8x
"""

if gain == 1:
    # bit 0 = 0, bit 1 = 0
    self.__adc1_conf = self.__updatebyte(self.__adc1_conf, 0xFC, 0x00)
    self.__adc2_conf = self.__updatebyte(self.__adc2_conf, 0xFC, 0x00)
    self.__pga = 0.5
elif gain == 2:
    # bit 0 = 1, bit 1 = 0
    self.__adc1_conf = self.__updatebyte(self.__adc1_conf, 0xFC, 0x01)
    self.__adc2_conf = self.__updatebyte(self.__adc2_conf, 0xFC, 0x01)
    self.__pga = 1.0
elif gain == 4:
    # bit 0 = 0, bit 1 = 1
    self.__adc1_conf = self.__updatebyte(self.__adc1_conf, 0xFC, 0x02)
    self.__adc2_conf = self.__updatebyte(self.__adc2_conf, 0xFC, 0x02)
    self.__pga = 2.0
elif gain == 8:
    # bit 0 = 1, bit 1 = 1
    self.__adc1_conf = self.__updatebyte(self.__adc1_conf, 0xFC, 0x03)
    self.__adc2_conf = self.__updatebyte(self.__adc2_conf, 0xFC, 0x03)
    self.__pga = 4.0
else:
    raise ValueError('set_pga: gain out of range')

self.__bus.write_byte(self.__adc1_address, self.__adc1_conf)
self.__bus.write_byte(self.__adc2_address, self.__adc2_conf)
return
def set_bit_rate(self, rate):

"""
sample rate and resolution
12 = 12 bit (240SPS max)    14 = 14 bit (60SPS max)
16 = 16 bit (15SPS max)    18 = 18 bit (3.75SPS max)
"""

```



```

if rate == 12:
    # bit 2 = 0, bit 3 = 0
    self.__adc1_conf = self.__updatebyte(self.__adc1_conf, 0xF3, 0x00)
    self.__adc2_conf = self.__updatebyte(self.__adc2_conf, 0xF3, 0x00)
    self.__bitrate = 12
    self.__lsb = 0.0005
elif rate == 14:
    # bit 2 = 1, bit 3 = 0
    self.__adc1_conf = self.__updatebyte(self.__adc1_conf, 0xF3, 0x04)
    self.__adc2_conf = self.__updatebyte(self.__adc2_conf, 0xF3, 0x04)
    self.__bitrate = 14
    self.__lsb = 0.000125
elif rate == 16:
    # bit 2 = 0, bit 3 = 1
    self.__adc1_conf = self.__updatebyte(self.__adc1_conf, 0xF3, 0x08)
    self.__adc2_conf = self.__updatebyte(self.__adc2_conf, 0xF3, 0x08)
    self.__bitrate = 16
    self.__lsb = 0.00003125
elif rate == 18:
    # bit 2 = 1, bit 3 = 1
    self.__adc1_conf = self.__updatebyte(self.__adc1_conf, 0xF3, 0x0C)
    self.__adc2_conf = self.__updatebyte(self.__adc2_conf, 0xF3, 0x0C)
    self.__bitrate = 18
    self.__lsb = 0.0000078125
else:
    raise ValueError('set_bit_rate: rate out of range')

self.__bus.write_byte(self.__adc1_address, self.__adc1_conf)
self.__bus.write_byte(self.__adc2_address, self.__adc2_conf)
return

```

```
def set_conversion_mode(self, mode):
```

```
"""
```

```
conversion mode for adc    0 = One shot conversion mode    1 = Continuous conversion mode
```

```
"""
```

```

if mode == 0:
    # bit 4 = 0
    self.__adc1_conf = self.__updatebyte(self.__adc1_conf, 0xEF, 0x00)
    self.__adc2_conf = self.__updatebyte(self.__adc1_conf, 0xEF, 0x00)
    self.__conversionmode = 0
elif mode == 1:
    # bit 4 = 1
    self.__adc1_conf = self.__updatebyte(self.__adc1_conf, 0xEF, 0x10)
    self.__adc2_conf = self.__updatebyte(self.__adc1_conf, 0xEF, 0x10)
    self.__conversionmode = 1
else:
    raise ValueError('set_conversion_mode: mode out of range')
return

```

ΠΗΓΑΙΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΨΗΦΙΑΚΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ SHT21 :

```
#!/usr/bin/python
import fcntl
import time
import unittest

class SHT21:
    """Class to read temperature and humidity from SHT21, much of class was derived from:
http://www.sensirion.com/fileadmin/user\_upload/customers/sensirion/Dokumente/Humidity/Sensirion\_Humidity\_SHT21\_Datasheet\_V3.pdf and Martin Steppuhn's code from http://www.emsystech.de/raspi\_sht21"""

    # control constants
    _SOFTRESET = b'\xfe'
    _I2C_ADDRESS = 0x40
    _TRIGGER_TEMPERATURE_NO_HOLD = b'\xF3'
    _TRIGGER_HUMIDITY_NO_HOLD = b'\xF5'
    _STATUS_BITS_MASK = 0xFFFC

    # From: /linux/i2c-dev.h
    I2C_SLAVE = 0x0703
    I2C_SLAVE_FORCE = 0x0706

    _TEMPERATURE_WAIT_TIME = 0.086 # (datasheet: typ=66, max=85)
    _HUMIDITY_WAIT_TIME = 0.030 # (datasheet: typ=22, max=29)

    def __init__(self, device_number=0):

        """Opens the i2c device (assuming that the kernel modules have been loaded). Note that this has
        only been tested on first revision raspberry pi where the device_number = 0, but it should work
        where device_number=1"""

        self.i2c = open('/dev/i2c-%s' % device_number, 'rb+', 0) fcntl.ioctl(self.i2c,
            self.I2C_SLAVE, 0x40)
        # fcntl.ioctl(self.i2c, self.I2C_SLAVE_FORCE, 0x40)
        self.i2c.write(self._SOFTRESET)
        time.sleep(0.050)

    def read_temperature(self):

        """Reads the temperature from the sensor. Not that this call blocks for ~86ms to allow the sensor
        to return the data"""

        self.i2c.write(self._TRIGGER_TEMPERATURE_NO_HOLD)
        time.sleep(self._TEMPERATURE_WAIT_TIME)
        data = self.i2c.read(3)
        # print(self._TRIGGER_TEMPERATURE_NO_HOLD)
        # print(data)
        if self._calculate_checksum(data, 2) == ord( bytes([data[2]] ) ):
            return self._get_temperature_from_buffer(data)
```

```

def read_humidity(self):

"""Reads the humidity from the sensor. Not that this call blocks for ~30ms to allow the sensor to
return the data"""

self.i2c.write(self._TRIGGER_HUMIDITY_NO_HOLD)
time.sleep(self._HUMIDITY_WAIT_TIME)
data = self.i2c.read(3)
if self._calculate_checksum(data, 2) == ord( bytes([ data[2] ] ) ):
    return self._get_humidity_from_buffer(data)

def close(self):
    """Closes the i2c connection"""
    self.i2c.close()

def __enter__(self):
    """used to enable python's with statement support"""
    return self

def __exit__(self, type, value, traceback):
    """with support"""
    self.close()

@staticmethod
def _calculate_checksum(data, number_of_bytes):

    """5.7 CRC Checksum using the polynomial given in the datasheet"""
    POLYNOMIAL = 0x131
    # //P(x)=x^8+x^5+x^4+1 = 100110001
    crc = 0
    # calculates 8-Bit checksum with given polynomial
    for byteCtr in range(number_of_bytes):
        # crc ^= (ord(data[byteCtr]))
        crc ^= (ord( bytes([data[byteCtr]] ) ))
        for bit in range(8, 0, -1):
            if crc & 0x80:
                crc = (crc << 1) ^ POLYNOMIAL
            else:
                crc = (crc << 1)
    return crc

@staticmethod
def _get_temperature_from_buffer(data):

    """This function reads the first two bytes of data and returns the temperature in C by using
the following function: T = -46.85 + (175.72 * (ST/2^16)) where ST is the value from the sensor"""

    unadjusted = (ord( bytes([data[0]] ) ) << 8) + ord( bytes([data[1]] ) )
    unadjusted &= SHT21._STATUS_BITS_MASK # zero the status bits
    unadjusted *= 175.72
    unadjusted /= 1 << 16 # divide by 2^16
    unadjusted -= 46.85
    return unadjusted

```

```

@staticmethod
def _get_humidity_from_buffer(data):

    """This function reads the first two bytes of data and returns the relative humidity in
    percent by using the following function: RH = -6 + (125 * (SRH / 2 ^16)) where SRH is the value
    read from the sensor"""

    unadjusted = (ord( bytes([data[0]] ) << 8) + ord( bytes([data[1]] )
    unadjusted &= SHT21._STATUS_BITS_MASK # zero the status bits
    unadjusted *= 125.0
    unadjusted /= 1 << 16 # divide by 2^16
    unadjusted -= 6
    return unadjusted

class SHT21Test(unittest.TestCase):

    """simple sanity test. Run from the command line with python -m unittest sht21 to check they are
    still good"""

    def test_temperature(self):
        """Unit test to check the checksum method"""
        calc_temp = SHT21._get_temperature_from_buffer([chr(99), chr(172)])
        self.failUnless(abs(calc_temp - 21.5653979492) < 0.1)

    def test_humidity(self):
        """Unit test to check the humidity computation using example from the v4 datasheet"""
        calc_temp = SHT21._get_humidity_from_buffer([chr(99), chr(82)])
        self.failUnless(abs(calc_temp - 42.4924) < 0.001)

    def test_checksum(self):
        """Unit test to check the checksum method. Uses values read"""
        self.failUnless(SHT21._calculate_checksum([chr(99), chr(172)], 2) == 249)
        self.failUnless(SHT21._calculate_checksum([chr(99), chr(160)], 2) == 132)

if __name__ == "__main__":
    try:
        with SHT21(0) as sht21:
            while 1:
                print( time.strftime("%Y-%m-%d %H:%M:%S", time.gmtime())+' Temperature:
{:0.2f}'.format( sht21.read_temperature() )+ ' Humidity: {:0.2f}'.format( sht21.read_humidity() )
                time.sleep(1)
                #print( "Humidity: %s" % sht21.read_humidity() )
    except Exception as e:
        print(e)
        print ("Error creating connection to i2c. This must be run as root")
        raise

```



```

for i in range(4):
    sensor_current_float=adc_i.read_raw(i+1)
    sensor_current_volt=adc_i.read_voltage(i+1)
    print(dt_string, " Channel_Current: ", i+1, " float_dec=", '%5.0f' %
sensor_current_float, " with value of voltage=", '%.3f' % sensor_current_volt, "V")
    file.write (dt_string + " Channel_Current : " + str(i+1) + " float_dec = " +
str('%5.0f' % sensor_current_float) + " with value of voltage = " + str('%.3f' %
sensor_current_volt) + " V" + "\n")
    #file2.write (dt_string, " Channel_Current: ", i+1, " float_dec=", sensor_current_float,
"with value of voltage=", '%.3f' % sensor_current_volt)
    sleep(1)
    sleep(2)

for i in range(4):
    sensor_voltage_float=adc_v.read_raw(i+1)
    sensor_voltage_volt=adc_v.read_voltage(i+1)
    print(dt_string, " Channel_Voltage: ", i+1, " float_dec=", '%5.0f' %
sensor_voltage_float, " with value of voltage=", '%.3f' % sensor_voltage_volt, "V")
    file.write (dt_string + " Channel_Voltage : " + str(i+1) + " float_dec = " +
str('%5.0f' % sensor_voltage_float) + " with value of voltage = " + str('%.3f' %
sensor_voltage_volt) + " V" + "\n")
    sleep(1)
    sleep(2)

```


ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΗΓΕΣ

- [1] Ν. Σταθόπουλος – “Μετρήσεις, Ηλεκτρονικά Συστήματα Μετρήσεων & Αισθητήρια” (Εκδόσεις Αράκυνθος)
- [2] Andy Bateman – “Αισθητήρες για Μετρήσεις και Έλεγχο” (Εκδόσεις Τζιόλα)
- [3] Κ. Καλοβρέκτης / Ν. Κατέβας – “Αισθητήρες μέτρησης και ελέγχου” (Εκδόσεις Τζιόλα)
- [4] Β. Πετρίδη – “Συστήματα μετρήσεων” (Εκδόσεις University Studio)
- [5] S. Paonessa / B. McDuffee – “*The Fundamentals of 4-20 mA Current Loops*”
- [6] Basics of The 4 - 20mA Current Loop
<https://www.instrumentationtoolbox.com/2012/03/basics-of-4-20ma-current-loop.html?m=1>
- [7] How a 4-20mA Transmitter Works
<https://instrumentationtools.com/4-20ma-transmitter-works/>
- [8] Analog Devices –
“*Fundamentals, System Design and Setup for the 4 to 20 mA Current Loop*”
- [9] Industrial, 4-20mA Current Loop Measuring Basics I
<https://industrialcircuits.wordpress.com/2014/07/28/industrial-4-20-ma-current-loop->
- [10] Industrial, 4-20mA Current Loop Measuring Basics II
<https://industrialcircuits.wordpress.com/2014/07/28/industrial-4-20-ma-current-loop>
- [11] Serial and UART Tutorial
<https://www.freebsd.org/doc/en/articles/serial-uart/>
- [12] Στ. Ποτηράκης – “*Ηλεκτρονική Σχεδίαση και Αρχιτεκτονικές Υλικού – Τελεστικοί Ενισχυτές 1 & 2*”
- [13] Datasheet for : “*OPA4171AIPWR*” (Texas Instruments)
IC OPAMP GP 4 CIRCUIT 14TSSOP
- [14] A. P. Malvino – “*Ηλεκτρονική*” (Εκδόσεις Τζιόλα)

- [15] Digi-Key Electronics | From Prototype to Production <https://www.digikey.gr/>
- [16] Datasheet for : “*ISU0305S24*” (XP Power) DC DC CONVERTER 24V 3W
- [17] Datasheet for : “*LM317A*” (Texas Instr.) IC REG LIN POS ADJ 1.5A SOT223
- [18] Datasheet for : “*TPL0501*” 256-Taps, Single-Channel, Digital Potentiometer With SPI Interface
- [19] Analog Devices – “*OP AMP Applications*”
- [20] Analog Devices – “*A Designer’s Guide to Instrumentation Amplifiers*”
- [21] EasyEDA Tutorial <https://easyeda.com/editor>
- [22] Datasheet for : “*PX2AF1XX500PSCHX*”
Pressure Transducers Heavy Duty - Honeywell - PX2 Series (15-500psi) 4-20mA
- [23] Datasheet for : “*LTPCTAA30UEBITX0I*”
Temperature Sensor NTC - Honeywell - LTP Series (-40oC +150oC)
- [24] TDK – “*NTC Thermistors, Application Notes*” (EPCOS AG 2018)
- [25] Datasheet for : “*GP2Y0A60SZLF*”
Distance Sensor - Sharp (10cm-150cm)
- [26] Datasheet for : “*50782100*”
Temperature Sensor RTD - Sensata - Darts200DS (-40oC +850oC)
- [27] Η. Γ. Δημόπουλος – “*Ενεργά & Παθητικά Φίλτρα - Θεωρία, Σύνθεση, Σχεδίαση*”
- [28] Σ. Α. Πακτίτη – “*Εργαστηριακές Ασκήσεις Φίλτρων*” (Εκδόσεις ΙΩΝ)
- [29] Analog Devices – “*Analog Filter Wizard*”
<https://tools.analog.com/en/filterwizard/>
- [30] AB Electronics UK - ADC Differential Pi
<https://www.abelectronics.co.uk>
- [31] Datasheet for : “*MCP3424*” - ADC – Microchip Technology
- [32] Datasheet for : “*FDC6301N*” - Dual N-Channel, Digital FET – ON Semiconductor
- [33] Raspberry Pi Team – “*The Complete Manual*” (Future Publishing Ltd)

- [34] Raspberry Pi Foundation <https://www.raspberrypi.org/>
- [35] Russell Barnes – “*Raspberry Pi 3: Specs, benchmarks & testing*”
(The official Raspberry Pi Magazine)
- [36] Surin Kittitornkun – Hardware: Raspberry Pi
- [37] Raspberry Pi Pinout
<http://www.toptechboy.com/raspberry-pi/raspberry-pi-linux-lesson-25-raspberry/>
- [38] ElectronicWings – Raspberry Pi
<https://www.electronicwings.com/raspberry-pi/basics>
- [39] Python.org <https://www.python.org/doc/>
- [40] Python Online Compiler
<https://www.programiz.com/python-programming/online-compiler/?ref=b1361832>
- [41] Built for developers Platform
https://github.com/abelectronicsuk/ABElectronics_Python_Libraries
- [42] Communication Protocols and Uses – UART vs I2C vs SPI
<https://www.seeedstudio.com/blog/2019/09/25/uart-vs-i2c-vs-spi-communication/>
- [43] Datasheet for : “*SHT21*”
Humidity and Temperature Sensor I2C - Sensirion - Darts200DS (-40oC +125oC)
- [44] Siemens - Design complete production layouts in a single system
<https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/manufacturing->
- [45] Connected greenhouses: how the Internet of things can feed the planet
<https://hellofuture.orange.com/en/connected-greenhouses-how-the-internet-of-things/>

