



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«Ηλεκτρονικό όργανο μέτρησης pH διαλυμάτων»

Του φοιτητή
Μιμιδάκη Σπυρίδων
Αρ. Μητρώου: 516086

Επιβλέπων
Χατζόπουλος Αργύριος
Επίκουρος Καθηγητής

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2022

Ηλεκτρονικό όργανο μέτρησης pH διαλυμάτων

Κωδικός Δ.Ε. 20151

Του φοιτητή Μιμιδάκη Σπυρίδων

Εισηγητής Χατζόπουλος Αργύριος

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 15-10-2020

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 12-2-2022

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Μιμιδάκη Σπυρίδων που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

«Στην οικογένεια, τους φίλους και τους δασκάλους μου»

Πρόλογος

Η εργασία αυτή ασχολείται με τη μέτρηση pH, ιδιότητα που συναντάται στη χημεία και υποδηλώνει το βαθμό οξύτητας κάποιου διαλύματος. Η ηλεκτρονική μέτρηση του μεγέθους αυτού συνδυάζει κομψά τις αρχές της ηλεκτρονικής με την ηλεκτροχημεία και τη φυσικοχημεία με τρόπο που δίνει τη δυνατότητα για μετρήσεις με μεγάλη ακρίβεια και εφαρμογή σε διάφορα επιστημονικά πεδία. Στην εργασία αυτή ήρθαμε αντιμέτωποι με πολλές νέες έννοιες που χρειάστηκε να ξεκλειδώσουμε για να προχωρήσουμε. Μέσω της μελέτης εμπλουτίσαμε τις γνώσεις μας, πράγμα που μας βοήθησε να ξεπεράσουμε τις δυσκολίες που συναντήσαμε αλλά και να αποκτήσουμε μεγαλύτερη κατανόηση για το αντικείμενο που πραγματεύεται η εργασία.

Περίληψη

Αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η μελέτη και κατασκευή ενός ηλεκτρονικού οργάνου μέτρησης pH. Η πορεία της μελέτης ξεκινά από την περιγραφή του pH σαν φυσικό μέγεθος και τη σημασία του, τις εφαρμογές που χρειάζεται η γνώση του καθώς και τους τρόπους μέτρησής του. Αναλύεται εκτενώς η λειτουργία του ηλεκτροδίου pH που είναι το βασικό αισθητήριο του οργάνου. Έπειτα σχεδιάζεται το ηλεκτρονικό κύκλωμα που είναι υπεύθυνο για την προσαρμογή και ενίσχυση του σήματος που παράγεται από το ηλεκτρόδιο. Μετά από το κύκλωμα του ηλεκτροδίου σχεδιάζεται κύκλωμα που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση θερμοκρασίας, καθώς αυτή είναι σημαντική στη μέτρηση γιατί η απόκριση του ηλεκτροδίου επηρεάζεται και από τη θερμοκρασία. Το επόμενο βήμα στη μελέτη είναι η επιλογή του μικροελεγκτή που θα συνδέσει τα παραπάνω δεδομένα και θα εξάγει τις μετρήσεις. Ο μικροελεγκτής είναι ο RP2040 και βρίσκεται ενσωματωμένος στην πλακέτα Raspberry Pi PICO, όπου για τον προγραμματισμό του χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα Python. Για το όργανο σχεδιάστηκαν δύο τρόποι βαθμονόμησης, ο ένας τρόπος είναι η βαθμονόμηση μέσω του hardware και των μετρήσεων της θερμοκρασίας και ο άλλος τρόπος βαθμονόμησης γίνεται μέσω software. Γίνεται ανάλυση των μεθόδων που γίνεται η απεικόνιση των δεδομένων συγκεκριμένα χρησιμοποιείται μια οθόνη LCD, μια πλακέτα επέκτασης bluetooth και η μεταφορά των δεδομένων μέσω USB. Τελευταίο κομμάτι στη σχεδίαση του οργάνου είναι η ανάπτυξη ενός συστήματος τροφοδοσίας του οργάνου καθώς και η σχεδίαση της πλακέτας στην οποία θα τοποθετηθούν τα εξαρτήματα. Αμέσως μετά τη σχεδίαση γίνονται μετρήσεις pH σε διάφορα διαλύματα για να διαπιστωθεί η ορθή λειτουργία του οργάνου. Τέλος εξάγονται συμπεράσματα όσον αφορά τη λειτουργία του οργάνου όπως επίσης γίνονται προτάσεις για βελτιώσεις του συστήματος.

«Electronic instrument for pH measurement»

Spiridon Mimidakis

Abstract

The thesis subject is the study and development of an electronic instrument for pH measurements. The study begins with the description of pH as a physical quantity and its meaning, the importance of the pH knowledge and the measurement methods. There is an in depth analysis of the pH electrode function which is the basic sensor of the instrument. Afterwards we design an electronic circuit for conditioning and amplifying the electrode output signal. After the electrode circuit we design a circuit for temperature measurement, which is key for the pH measurement, because the electrode response is also affected by temperature. The next step in our study is choosing the microcontroller that will blend all the data that we referred to previously and provide the desired measurements. The microcontroller is the RP2040 which is implemented to the Raspberry Pi PICO board and programmed with Python. The instrument has two calibration methods, the first method is calibration by the hardware and temperature measurement and the second method is software calibration. We analyze the ways that the data is displayed, in fact we use an LCD display, a bluetooth module and data transfer using USB. Last part of the instrument design is the development of a power supply system, as well as designing a board where the components will be placed. After the instrument design we are taking pH measurements to realize the correct function of the device. In the end we are looking at the final conclusions and we suggest some improvements for the instrument.

Ευχαριστίες

Θέλω να ευχαριστήσω τον κύριο Χατζόπουλο Αργύριο και τον συμφοιτητή μου Στυλιανό Τράγο για την υποστήριξη και την πολύτιμη βοήθειά τους στην υλοποίηση της εργασίας.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	5
Περίληψη	6
Abstract	7
Ευχαριστίες	8
Περιεχόμενα	9
Κατάλογος Κυκλωμάτων	12
Κατάλογος Διαγραμμάτων	12
Κατάλογος Εικόνων	13
Κατάλογος Πινάκων	14
Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγικές έννοιες	15
1.1 Εισαγωγή	15
1.2 Ορισμός pH και η φυσική του σημασία	15
1.3 Χαρακτηριστικά οξέων και βάσεων	16
1.3.1 Οξέα	16
1.3.2 Βάσεις	17
1.4 Χρησιμότητα της γνώσης της τιμής pH	17
1.5 Μεθοδολογίες και τεχνικές μέτρησης	17
1.5.1 Διαλύματα δεικτών	18
1.5.2 Πεχαμετρικό χαρτί	18
1.5.3 Ηλεκτρόδιο γυαλιού	19
1.5.4 Ηλεκτρόδιο ISFET	20
Κεφάλαιο 2 - Επιλογή και ανάλυση του ηλεκτροδίου	22
2.1 Εισαγωγή	22
2.2 Επιλογή ηλεκτροδίου	22
2.3 Χαρακτηριστικά του ηλεκτροδίου	22
2.4 Λειτουργία του ηλεκτροδίου	22
2.4.1 Μια διαφορετική προσέγγιση	27
2.5 Επίδραση των χαρακτηριστικών του ηλεκτροδίου	28
Κεφάλαιο 3 - Αναλογικά κυκλώματα για την επεξεργασία σήματος του ηλεκτροδίου	30
3.1 Εισαγωγή	30
3.2 Απαιτήσεις κυκλώματος	30
3.2.1 Επιλογή ενισχυτή	30

3.2.2	Ενισχυτές οργανολογίας γενικά	30
3.3	Προσαρμογή σήματος	31
3.3.1	Πηγές τάσης αναφοράς με τελεστικού ενισχυτές γενικά	32
3.3.2	Πηγή τάσης αναφοράς με TE για το πραγματικό κύκλωμα της εφαρμογής	33
3.3.3	Σύνδεση με το ηλεκτρόδιο	35
3.4	Σύνδεση με τον ενισχυτή οργανολογίας	36
3.4.1	Σύνδεση ηλεκτροδίου και ενισχυτή οργανολογίας	36
3.5	Υπολογισμός κέρδους και επιπλέον χαρακτηριστικών του κυκλώματος	37
3.6	Προσομοίωση και μετρήσεις	41
Κεφάλαιο 4	- Επίδραση θερμοκρασίας και κυκλώματα	45
4.1	Εισαγωγή	45
4.2	Η αναγκαιότητα της μέτρησης θερμοκρασίας	45
4.3	Χαρακτηριστικά κυκλώματος	45
4.3.1	Αισθητήριο θερμοκρασίας	45
4.3.2	Κύκλωμα προσαρμογής	46
4.3.3	Πηγή ρεύματος αναφοράς	49
4.4	Σύνδεση με τον ενισχυτή οργανολογίας	51
4.5	Σφάλματα λόγω ανοχής αντιστάσεων	56
Κεφάλαιο 5	- Επιλογή μικροελεγκτή, διασύνδεση με τα αναλογικά ηλεκτρονικά και απεικόνιση των δεδομένων	59
5.1	Εισαγωγή	59
5.2	Επιλογή μικροελεγκτή και χαρακτηριστικά	59
5.3	Διασύνδεση με τα αναλογικά ηλεκτρονικά	60
5.4	Υπολογισμός pH και θερμοκρασίας στο μικροελεγκτή	62
5.4.1	Υπολογισμός θερμοκρασίας	62
5.4.2	Υπολογισμός pH	63
5.5	Βαθμονόμηση οργάνου	64
5.6	Απεικόνιση δεδομένων	66
5.6.1	Οθόνη LCD	66
5.6.2	USB επικοινωνία με serial terminal εφαρμογές	69
5.6.2.1	Επικοινωνία οργάνου μέτρησης με την εφαρμογή Thonny μέσω USB	69
5.6.2.2	Επικοινωνία οργάνου μέτρησης με την εφαρμογή PuTTY μέσω USB	70
5.6.2.3	Επικοινωνία οργάνου μέτρησης με το LabVIEW μέσω USB	71

5.6.5	Bluetooth επικοινωνία	73
5.6.6	Android εφαρμογή για την Bluetooth επικοινωνία	75
Κεφάλαιο 6 - Τροφοδοσία οργάνου και κατασκευή		76
6.1	Εισαγωγή	76
6.2	Τροφοδοσία οργάνου	76
6.3	Τελικό σχηματικό	78
6.4	Κατασκευή σε πλακέτα και κουτί	83
Κεφάλαιο 7 - Προτάσεις χρήσης και μετρήσεις δειγμάτων		85
7.1	Εισαγωγή	85
7.2	Χρήση του οργάνου	85
7.2.1	Βαθμονόμηση Hardware	85
7.2.2	Βαθμονόμηση Software	86
7.3	Αποθήκευση και συντήρηση του ηλεκτροδίου	86
7.4	Μετρήσεις διαλυμάτων	86
Κεφάλαιο 8 - Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης		91
8.1	Εισαγωγή	91
8.2	Συμπεράσματα	91
8.3	Προτάσεις βελτίωσης	91
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		92
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Προγράμματα μικροελεγκτή		95
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Φυλλάδιο Προδιαγραφών Ηλεκτροδίου		111
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ : Pinout Raspberry Pi Pico		112

Κατάλογος κυκλωμάτων

Κύκλωμα 3.1 α) β) γ): Ενισχυτής οργανολογίας μονοπολικής τροφοδοσίας σε διάφορες τοπολογίες	31
Κύκλωμα 3.2: Πηγή τάσης αναφοράς με τελεστικό ενισχυτή	32
Κύκλωμα 3.3: Πηγή τάσης αναφοράς με τελεστικό ενισχυτή στο PSpice	34
Κύκλωμα 3.4: Πειραματικό κύκλωμα πηγής τάσης αναφοράς με τελεστικό ενισχυτή στο PSpice	37
Κύκλωμα 3.5: Κύκλωμα με πηγή τάσης αναφοράς ηλεκτρόδιο buffer και ΕΟ	38
Κύκλωμα 3.6: Τελικό κύκλωμα ηλεκτροδίου	41
Κύκλωμα 4.1: Γέφυρα Wheatstone $\frac{1}{4}$ τροφοδοτούμενη από πηγή τάσης αναφοράς	47
Κύκλωμα 4.1: Γέφυρα Wheatstone $\frac{1}{4}$ τροφοδοτούμενη από πηγή ρεύματος αναφοράς	47
Κύκλωμα 4.3: Πηγή ρεύματος Howland με γειωμένο φορτίο	49
Κύκλωμα 4.4: Κύκλωμα μέτρησης θερμοκρασίας	53
Κύκλωμα 5.1: Συνδέσεις του A/D μετατροπέα	61
Κύκλωμα 5.2: Σύνδεση I2C οθόνης με το μικροελεγκτή	67
Κύκλωμα 5.3: Συνδεσμολογία μικροελεγκτή με την πλακέτα HC-05	74
Κύκλωμα 6.1: Κύκλωμα τροφοδοσίας με το LM317	78
Κύκλωμα 6.2: Συνολικό κύκλωμα στο PSpice	79
Κύκλωμα 6.3: Τελικό σχηματικό στο EasyEDA	80

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 2.1: Η απόκριση του ηλεκτροδίου για pH 0- 14 και θερμοκρασία 25°C	23
Διάγραμμα 2.2: Το δυναμικό αναφοράς για θερμοκρασίες σε °C	25
Διάγραμμα 2.3: Το δυναμικό αναφοράς για θερμοκρασίες σε °K	25
Διάγραμμα 2.4: Απόκριση ηλεκτροδίου για 4 διαφορετικές θερμοκρασίες(°C)	26
Διάγραμμα 2.5: Η κλίση της ευθείας σε θερμοκρασίες°C	27
Διάγραμμα 2.6: Λύση της εξίσωσης Nernst για 4 θερμοκρασίες	28
Διάγραμμα 2.7: Η επίδραση του αλκαλικού σφάλματος στους 25°C σε σχέση με το ιδανικό ηλεκτρόδιο	29
Διάγραμμα 3.1: Διαφορά δυναμικού ηλεκτροδίου σε συνδυασμό με την τάση της πηγής αναφοράς (γραφικά)	36
Διάγραμμα 3.2: Συνολική αντίσταση κέρδους και RG(trim) σε διάφορες θερμοκρασίες (γραφικά)	40
Διάγραμμα 3.3: Κέρδος σε διάφορες θερμοκρασίες (γραφικά)	40
Διάγραμμα 3.4: Έξοδος κυκλώματος για 0°C	41
Διάγραμμα 3.5: Έξοδος κυκλώματος για 25°C	42
Διάγραμμα 3.6: Έξοδος κυκλώματος για 50°C	42
Διάγραμμα 3.7: Έξοδος κυκλώματος για 80°C	43
Διάγραμμα 4.1: Αντίσταση Pt100 για θερμοκρασίες 0 έως 100°C (γραφικά)	46
Διάγραμμα 4.2: Διαφορική τάση εξόδου γέφυρας τροφοδοτούμενη από σταθερό ρεύμα έντασης 1, 3 και 5mA (γραφικά)	48
Διάγραμμα 4.3: Συνάρτηση μεταφοράς πηγής ρεύματος Howland	51
Διάγραμμα 4.4: Διαφορική τάση γέφυρας συναρτήσει της αντίστασης Pt100	53
Διάγραμμα 4.5: Τάση εξόδου κυκλώματος συναρτήσει της αντίστασης Pt100	54

Διάγραμμα 4.6: Συγκριτικά η διαφορική τάση της γέφυρας συναρτήσει της αντίστασης του Pt100	55
Διάγραμμα 4.7: Συγκριτικά η έξοδος του ενισχυτή οργανολογίας συναρτήσει της αντίστασης του Pt100	56
Διάγραμμα 4.8: Διαφορική τάση γέφυρας για σφάλμα $\pm 1\%$	57
Διάγραμμα 4.9: Τάση εξόδου ενισχυτή οργανολογίας για σφάλμα $\pm 1\%$	57
Διάγραμμα 4.10: Σφάλμα μη γραμμικότητας γέφυρας	58
Διάγραμμα 5.1 & 6.1: Block διάγραμμα οργάνου	59 78
Διάγραμμα 5.2: Πρόγραμμα LabVIEW	72
Διάγραμμα 5.3: Πρόγραμμα Android εφαρμογής.	75
Διάγραμμα 7.1: Μετρούμενες τιμές pH με hardware βαθμονόμηση (γραφικά)	87
Διάγραμμα 7.2: Μετρούμενες τιμές pH με software βαθμονόμηση (γραφικά)	88
Διάγραμμα 7.3: Μετρούμενες τιμές pH με βαθμονόμηση σε σχέση με την ονομαστική τιμή pH (γραφικά)	88
Διάγραμμα 7.4: Σφάλμα μεταξύ hardware βαθμονόμησης και ονομαστικής τιμής pH	89
Διάγραμμα 7.5: Σφάλμα μεταξύ software βαθμονόμησης και ονομαστικής τιμής pH	89

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Κλίμακα pH	15
Εικόνα 1.2: Παράδειγμα χρήσης διαλύματος δείκτη	18
Εικόνα 1.3: Παράδειγμα χρήσης πεχαμετρικού χαρτιού	18
Εικόνα 1.4: Ηλεκτρόδιο γυαλιού	19
Εικόνα 1.5.1: Σχηματική απεικόνιση ηλεκτροδίου	19
Εικόνα 1.5.2: Γραφική απεικόνιση ηλεκτροδίου	19
Εικόνα 1.6: Κατασκευαστική διαφορά μεταξύ MOSFET και ISFET	21
Εικόνα 1.7: Ηλεκτρόδιο ISFET του εμπορίου	21
Εικόνα 2.1: Ηλεκτρόδιο pH που χρησιμοποιήθηκε στο όργανο	22
Εικόνα 5.1: OK μικροελεγκτή RP2040	59
Εικόνα 5.2: Η πλακέτα Raspberry Pi PICO	60
Εικόνα 5.3: α) Πρώτο εισαγωγικό μήνυμα, β) δεύτερο εισαγωγικό μήνυμα	68
Εικόνα 5.4: Απεικόνιση μετρήσεων στην οθόνη	69
Εικόνα 5.5: Μετρήσεις στο Thonny μέσω USB	70
Εικόνα 5.6: Εισαγωγικό παράθυρο στο PuTTY	70
Εικόνα 5.7: Μετρήσεις στο PuTTY μέσω USB	71
Εικόνα 5.8: Εικονικό όργανο στο LabVIEW	72
Εικόνα 5.9: Η πλακέτα HC-05	74
Εικόνα 5.10: Λήψη δεδομένων μέσω bluetooth σε Android εφαρμογή.	75
Εικόνα 6.1: Επαναφορτιζόμενη μπαταρία 18650 3.7V -2600mAh XTAR	76
Εικόνα 6.2: Πλακέτα BMS HX-2S-JH20 V1.0	77
Εικόνα 6.3: Συνδεσμολογία μπαταριών με το BMS	77
Εικόνα 6.4: Κάτω όψη πλακέτας	80
Εικόνα 6.5: Πάνω όψη πλακέτας	81
Εικόνα 6.6: Silk Screen πλακέτας	81
Εικόνα 6.7: Πάνω όψη πλακέτας 2D εικόνα	82
Εικόνα 6.8: Κάτω όψη πλακέτας 2D εικόνα	82

Εικόνα 6.9:Κάτω όψη πλακέτας	83
Εικόνα 6.10: Πάνω όψη πλακέτας	83
Εικόνα 6.11: Τελική κατασκευή [1]	84
Εικόνα 6.12: Τελική κατασκευή [2]	84

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Η απόκριση του ηλεκτροδίου για pH 0- 14 και θερμοκρασία 25°C	23
Πίνακας 2.2: Δυναμικό αναφοράς για διάφορες θερμοκρασίες	25
Πίνακας 2.3: Απόκριση ηλεκτροδίου για 4 διαφορετικές θερμοκρασίες(°C)	26
Πίνακας 2.4: Η κλίση της εξίσωσης για διαφορετικές θερμοκρασίες °C	26
Πίνακας 2.5: Λύση της εξίσωσης Nernst για 4 θερμοκρασίες	28
Πίνακας 2.6: Η επίδραση του αλκαλικού σφάλματος στους 25°C σε σχέση με το ιδανικό ηλεκτρόδιο	29
Πίνακας 3.1: Μετρήσεις πηγής τάσης αναφοράς με τελεστικό ενισχυτή	33
Πίνακας 3.2: Διαφορά δυναμικού ηλεκτροδίου σε συνδυασμό με την τάση της πηγής αναφοράς	36
Πίνακας 3.3: Συνολική αντίσταση κέρδους , RG(trim) και κέρδος σε διάφορες θερμοκρασίες	49
Πίνακας 3.4: Πειραματικές μετρήσεις και προσομοίωση για 0°C	43
Πίνακας 3.5: Πειραματικές μετρήσεις και προσομοίωση για 25°C	43
Πίνακας 3.6: Πειραματικές μετρήσεις και προσομοίωση για 50°C	44
Πίνακας 3.7: Πειραματικές μετρήσεις και προσομοίωση για 80°C	44
Πίνακας 4.1: Αντίσταση Pt100 για θερμοκρασίες 0 έως 100°C	46
Πίνακας 4.2: Διαφορική τάση εξόδου γέφυρας τροφοδοτούμενη από σταθερό ρεύμα έντασης 1, 3 και 5mA	48
Πίνακας 4.3: Vz και Iz διόδου για αντίσταση 470Ω	50
Πίνακας 4.4: Ρεύμα αναφοράς για τάση εισόδου αναφοράς 3V	51
Πίνακας 4.5: Διαφορική τάση γέφυρας και τάση εξόδου ενισχυτή για Pt100 = 100Ω	54
Πίνακας 4.6: Διαφορική τάση γέφυρας και τάση εξόδου ενισχυτή για Pt100 = 110Ω	54
Πίνακας 4.7: Διαφορική τάση γέφυρας και τάση εξόδου ενισχυτή για Pt100 = 120Ω	54
Πίνακας 4.8: Διαφορική τάση γέφυρας και τάση εξόδου ενισχυτή για Pt100 = 130Ω	55
Πίνακας 4.9: Διαφορική τάση γέφυρας και τάση εξόδου ενισχυτή για Pt100 = 140Ω	55
Πίνακας 7.1: Μετρούμενες τιμές pH με δύο τρόπους βαθμονόμησης	87

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγικές έννοιες

1.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει ο ορισμός του pH η φυσική του σημασία σαν μέγεθος, την χρησιμότητα της γνώσης αυτού του μεγέθους και επιγραμματικά οι μεθοδολογίες και τεχνικές μέτρησής του.

1.2 Ορισμός pH και η φυσική του σημασία

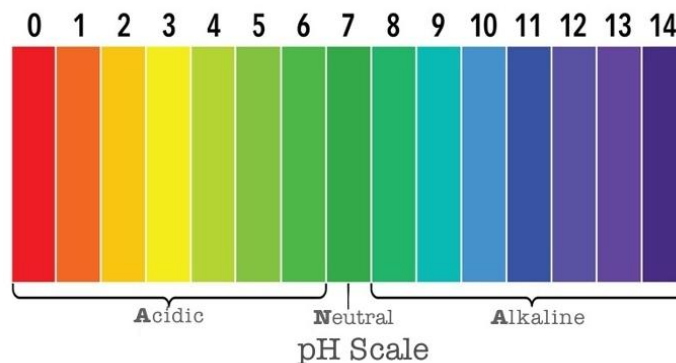
Η ενεργός οξύτητα ή αλλιώς pH (Potential of Hydrogen) στην χημεία ορίζεται ως η συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου σε ένα διάλυμα και συγκεκριμένα η συγκέντρωση κατιόντων υδρογόνου $[H^+]$. Μαθηματικά ορίζεται ως ο αρνητικός δεκαδικός λογάριθμος της συγκέντρωσης κατιόντων υδρογόνου. Η συγκέντρωση στη χημεία ερμηνεύεται ως τα moles μιας χημικής ουσίας ανα λίτρο διαλύματος και έχει μονάδα μέτρησης τα mol/L , molar ή συχνά M. Μαθηματικά και για συντομία η συγκέντρωση συμβολίζεται με C. Η εξίσωση του pH λοιπόν ορίζεται ως

$$pH = -\log[H^+] \quad (1.1)$$

Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί η ενεργότητα των κατιόντων υδρογόνου, η εξίσωση, μετατρέπεται στην παρακάτω έκφραση

$$pH = \log \left[\frac{1}{a_{H^+}} \right] \quad (1.2)$$

Το pH σαν μέγεθος δεν έχει μονάδες μέτρησης ενώ το εύρος τιμών του είναι από 0 έως 14, με μία μέση τιμή το 7. Με βάση τις τιμές αυτές, σχηματίζεται η γνωστή κλίμακα του pH που φαίνεται παρακάτω. Τα διαλύματα που έχουν $0 \leq pH < 7$ ονομάζονται όξινα και τα διαλύματα που έχουν $7 < pH \leq 14$ ονομάζονται αλκαλικά ή βασικά. Τέλος, στην περίπτωση που ένα διάλυμα έχει $pH = 7$ ονομάζεται ουδέτερο.



Εικόνα 1.1: Κλίμακα pH

Μεταξύ 0 και 7 βρίσκονται διαλύματα όπως το ξύδι (pH~3), ο καφές (pH~5) και το γάλα (pH~6.5) ενώ για τιμές μεταξύ 7 και 14 είναι διαλύματα όπως το θαλασσινό νερό (pH~8), η αμμωνία (pH~11.5) και η χλωρίνη (pH~12). Το καθαρό νερό έχει pH ίσο με 7.

Οι τιμές από 0 έως 14 έχουν φυσική σημασία και μέσω των παραπάνω εξισώσεων που αναλύθηκαν προκύπτουν από τα εξής γεγονότα. Εάν για οποιαδήποτε τιμή pH επιλυθεί η πρώτη εξίσωση ως προς την συγκέντρωση κατιόντων υδρογόνου τότε θα γίνει αντιληπτό το ότι η τιμή αυτή περιλαμβάνεται στην συγκέντρωση.

Παράδειγμα

Έστω διάλυμα με $\text{pH} = X$ λύνοντας την εξίσωση $\text{pH} = -\log[H^+]$ τότε

$$x = -\log[H^+] \Rightarrow [H^+] = 10^{-x} \quad (1.3)$$

Προχωρώντας ακόμη ένα βήμα και λύνοντας την επόμενη εξίσωση για τις ίδιες συνθήκες τότε βρίσκεται το πλήθος των κατιόντων υδρογόνου.

Καλό είναι να σημειωθεί το γεγονός ότι η κλίμακα του pH δεν περιλαμβάνει μόνο αυτές τις τιμές καθώς υπάρχουν διαλύματα όξινα και βασικά με pH που ξεπερνά τα όρια της κλασικής κλίμακας και ονομάζονται υπερ-οξέα και υπερ-βάσεις. Σαν παράδειγμα υπερ-οξέος είναι το θειικό οξύ (βιτριόλι) με pH μεταξύ -14 και -3 ενώ παράδειγμα υπερ-βάσης είναι το *ortho*-diethynylbenzene dianion με $\text{pH} > 14$.

1.3 Χαρακτηριστικά οξέων και βάσεων

Στην προηγούμενη ενότητα έγινε ο ορισμός του pH της φυσικής του σημασίας αλλά και της κλίμακας του pH. Σε αυτή την ενότητα θα γίνει οριστούν να χαρακτηριστικά των οξέων και των βάσεων. Η ερμηνεία των βάσεων και των οξέων πλέον γίνεται μέσω της θεωρίας του Arrhenius για την ηλεκτρολυτική διάσταση.

1.3.1 Οξέα

Οξύ χαρακτηρίζεται μία ένωση όταν κατά τη διάλυσή της σε νερό απελευθερώνονται κατιόντα υδρογόνου H^+ . Όμως υπάρχουν και πρόσθετα χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα, τα οξέα όπως ο χυμός λεμονιού, πορτοκαλιού και ξυδιού, που είναι ασφαλή για κατανάλωση, έχουν μία εύκολα αντιληπτή ξινή γεύση. Δυναμικά όλα τα οξέα θα μπορούσαν να έχουν αυτό το χαρακτηριστικό. Όμως λόγω του ότι πολλά από αυτά είναι δηλητηριώδη και τοξικά προς τον άνθρωπο η αναφορά στη γεύση γίνεται με βάση τα οξέα που αναφέρθηκαν παραπάνω. Άλλο ένα χαρακτηριστικό τους είναι η ικανότητά τους να αντιδρούν με μέταλλα, όπως το λίθιο το μαγνήσιο και ο ψευδάργυρος που είναι δραστηκότερα από το υδρογόνο, όπου κατά την αντίδραση αυτή απελευθερώνεται υδρογόνο σε μορφή αερίου. Επιπρόσθετα, τα οξέα χαρακτηρίζονται επίσης από την ικανότητά τους να αντιδρούν με τις βάσεις με την αντίδραση αυτή να λέγεται εξουδετέρωση και έχει ως αποτέλεσμα να παράγεται νερό και άλας. Επίσης, μπορούν να αλλάζουν το χρώμα των δεικτών, οι οποίες είναι ουσίες που το χρώμα τους διαφέρει αναλόγως με το περιβάλλον που βρίσκονται, με την ιδιότητα αυτή να χρησιμοποιείται στη μέτρηση pH. Τέλος, τα οξέα μπορούν να άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα ή αλλιώς είναι καλοί ηλεκτρολύτες καθώς όταν ένα οξύ διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα παράγεται υδρογόνο σε αέρια μορφή.

1.3.2 Βάσεις

Βάση ή αλκαλικό διάλυμα χαρακτηρίζεται μία ένωση όταν κατά τη διάλυσή της σε νερό απελευθερώνει ανιόντα υδροξειδίου OH^- . Όπως και τα οξέα έτσι και οι βάσεις έχουν και άλλα χαρακτηριστικά, κάποια από αυτά είναι σχεδόν όμοια με αυτά των οξέων. Οι βάσεις χαρακτηρίζονται από καυστική γεύση και σαπωνοειδή αφή. Όπως και στα οξέα λόγω της επικινδυνότητας μερικών το χαρακτηριστικό αυτό καθορίστηκε από βάσεις που είναι ασφαλείς προς κατανάλωση από ανθρώπους. Πέραν αυτού του χαρακτηριστικού έχουν τη δυνατότητα να αντιδρούν με τα οξέα ή αλλιώς να τα εξουδετερώνουν, ονομασία που χαρακτηρίζει και την αντίδραση αυτή δηλαδή η εξουδετέρωση. Επίσης, μπορούν όπως και τα οξέα να αλλάζουν το χρώμα δεικτών, καθώς επίσης και να άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα με την ιδιαιτερότητα πως αντί για αέριο υδρογόνου παράγεται αέριο οξυγόνο.

1.4 Χρησιμότητα της γνώσης της τιμής pH

Η γνώση του pH είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε πολλούς τομείς, όπως η βιομηχανία, η ιατρική, η φαρμακευτική, η γεωπονία και η έρευνα σε πολλά επιστημονικά πεδία. Στη βιομηχανία και συγκεκριμένα σε κλάδους όπως η παραγωγή τροφών, φαρμάκων, καλλυντικών κ.α. είναι σημαντική έτσι ώστε να εξασφαλιστεί πως το τελικό προϊόν που παράγεται είναι ασφαλές προς κατανάλωση χωρίς να προκαλεί βλάβες στον άνθρωπο που το καταναλώνει καθώς επίσης και η διάρκεια του προϊόντος.

Στην ιατρική είναι αναγκαία καθώς μέσω των διαφόρων εξετάσεων που γίνονται στον ασθενή (βιοχημικές, αιματολογικές κ.α.) αποτελεί έναν σημαντικό δείκτη για τις ζωτικές λειτουργίες του ασθενούς. Πέραν του γεγονότος αυτού η μέτρηση του pH χρησιμοποιείται και στο πεδίο της επιδημιολογίας λυμάτων όπου γίνεται μελέτη των λυμάτων μιας πόλης για την κατανόηση της υγειονομικής κατάστασης του πληθυσμού. Τρανό παράδειγμα για το πεδίο αυτό είναι η επιδημιολογική επιτήρηση των λυμάτων στην εποχή της πανδημίας του ιού SARS-CoV-2 που προκαλεί την ασθένεια Covid-19 στην περίπτωση αυτή, πέραν των άλλων παραγόντων όπως η θερμοκρασία και λοιπά βακτήρια και ιοί, το pH έχει σημαντικό ρόλο γιατί οι δύο παράγοντες αυτοί είναι σημαντικοί στην ανίχνευση και μελέτη του ιού στα λύματα καθώς αυτός επιβιώνει για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα σε περιβάλλον με ουδέτερο και βασικό pH ενώ δεν επιβιώνει για πολύ σε όξινο περιβάλλον.

Σημαντικό επίσης είναι το γεγονός πως το pH αποτελεί έναν από τους δείκτες ποιότητας νερού όπως είναι η αγωγιμότητα, τα μέταλλα που βρίσκονται στο νερό, η γεύση, το χρώμα κ.α. Η γνώση αυτών των παραγόντων είναι απαραίτητη όχι μόνο σε βιομηχανικό επίπεδο που χρησιμοποιείται το νερό για επεξεργασία τροφίμων ή για την εμφιάλωση αλλά και σε δημόσια υδρευτικά-αρδευτικά δίκτυα που ο πληθυσμός χρησιμοποιεί καθημερινά.

Στους τομείς φυτικής και ζωικής παραγωγής της γεωπονίας επίσης είναι χρήσιμη η μέτρηση του pH όπως και άλλων διαφόρων παραγόντων για να εξακριβωθεί η καταλληλότητα του εδάφους για καλλιέργεια φρούτων και λαχανικών αλλά και για την ασφάλεια των ζωοτροφών.

1.5 Μεθοδολογίες και τεχνικές μέτρησης

Η μέτρηση του pH μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους, είτε αυτοί είναι με τεχνικές που βασίζονται στη χημεία, είτε με τεχνικές που βασίζονται στην ηλεκτροχημεία. Στην ενότητα αυτή

θα αναφερθούν οι τέσσερις κύριες μεθοδολογίες μέτρησης του pH καθώς και οι τεχνικές στις οποίες βασίζονται.

1.5.1 Διαλύματα δεικτών

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην ιδιότητα των οξέων και των βάσεων να αλλάζουν το χρώμα των δεικτών. Όπως αναφέρθηκε πριν οι δείκτες είναι ουσίες που αλλάζουν χρώμα αναλόγως με το περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται. Η μέτρηση γίνεται παίρνοντας δείγμα από το διάλυμα σε δοκιμαστικό σωλήνα και προσθέτοντας μία σταγόνα δείκτη που θα προκαλέσει αλλαγή του χρώματος του διαλύματος, χαρακτηριστικό της οξύτητας του διαλύματος. Για παράδειγμα, το βάμμα ηλιοτροπίου όταν έρθει σε επαφή με αλκαλικό διάλυμα το χρώμα του γίνεται μπλε ενώ όταν έρθει σε επαφή με οξύ γίνεται κόκκινο. Αντίστοιχα, η φαινολοφθαλεΐνη αποκτά ελαφρύ κόκκινο χρώμα όταν έρθει σε επαφή με αλκαλικό διάλυμα ενώ αποχρωματίζεται όταν έρθει σε επαφή με οξύ. Τέλος αξίζει να αναφερθεί πως οι δείκτες χρησιμοποιούνται και στην ογκομέτρηση.



Εικόνα 1.2: Παράδειγμα χρήσης διαλύματος δείκτη

1.5.2 Πεχαμετρικό χαρτί

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί την τεχνική που αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, όμως στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται ειδικό χαρτί το οποίο έχει βυθιστεί σε διάλυμα δείκτη. Όταν το χαρτί εμβαπτιστεί με ένα διάλυμα οξέος ή βάσης τότε το χρώμα του θα αλλάξει και θα υποδείξει την οξύτητα του μετρούμενου διαλύματος.



Εικόνα 1.3: Παράδειγμα χρήσης πεχαμετρικού χαρτιού

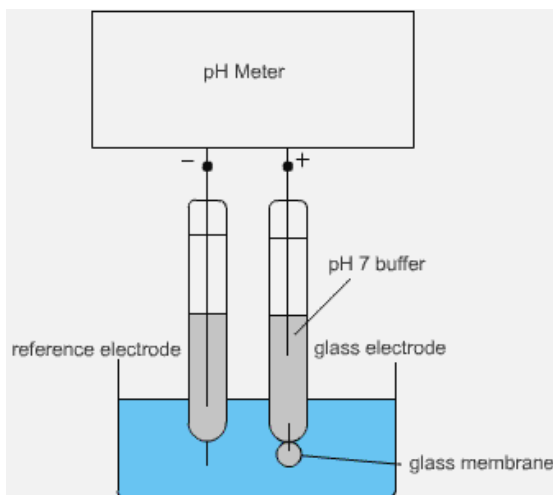
1.5.3 Ηλεκτρόδιο γυαλιού

Η μέθοδος αυτή διαφέρει από τις προηγούμενες και αυτό διότι δεν βασίζεται στη χρήση κάποιου δείκτη. Είναι πλέον η κύρια μέθοδος που χρησιμοποιείται στις εργαστηριακές μετρήσεις.

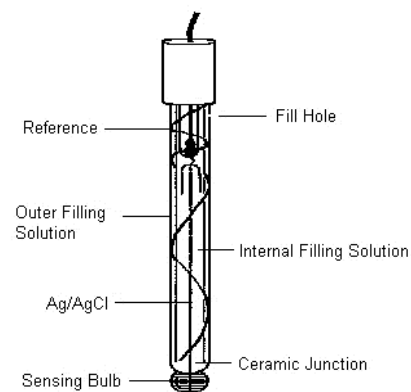


Εικόνα 1.4: Ηλεκτρόδιο γυαλιού

Για τη μέτρηση του pH χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός ηλεκτροδίων. Το ένα ηλεκτρόδιο είναι βυθισμένο σε ένα διάλυμα με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (pH, συγκέντρωση κ.α.) ενώ το άλλο ηλεκτρόδιο βρίσκεται σε ίδιο διάλυμα και περιέχεται μέσα σε μία γυάλινη ή πλαστική κατασκευή όπου στην άκρη υπάρχει ένας πολύ λεπτός γυάλινος “γλόμπος”. Τα ηλεκτρόδια αυτά ονομάζονται ηλεκτρόδιο αναφοράς και ένδειξης αντίστοιχα. Τα δύο αυτά ηλεκτρόδια είναι απομονωμένα το ένα από το άλλο και βρίσκονται σε ισορροπία όταν το ηλεκτρόδιο είναι αποθηκευμένο σε ειδικό διάλυμα. Κατά την βύθισή τους σε ένα διάλυμα διαφορετικού pH από αυτό που είναι αποθηκευμένο, η ισορροπία διαταράσσεται και δημιουργείται διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων.



Εικόνα 1.5.1: Σχηματική απεικόνιση ηλεκτροδίου



Εικόνα 1.5.2: Γραφική απεικόνιση ηλεκτροδίου

Στο ηλεκτρόδιο αναφοράς το δυναμικό που αναπτύσσεται εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία καθώς δεν υπάρχουν σημαντικές μεταβολές στο ίδιο το ηλεκτρόδιο ή στο διάλυμα που βρίσκεται. Στο ηλεκτρόδιο ένδειξης από την άλλη τα πράγματα είναι διαφορετικά. Το δυναμικό που

αναπτύσσεται, εξαρτάται από τη θερμοκρασία αλλά και από το pH του εξωτερικού διαλύματος. Αυτό συμβαίνει διότι κατά την βύθιση του στο μετρούμενο διάλυμα αναπτύσσεται δυναμικό εκατέρωθεν του γυαλιού λόγω της διαφοράς συγκέντρωσης ιόντων μεταξύ εσωτερικού και μετρούμενου διαλύματος. Όταν το εσωτερικό διάλυμα έχει σταθερό pH τότε το δυναμικό που αναπτύσσεται στο ηλεκτρόδιο μέτρησης, εξαρτάται από το pH και τη θερμοκρασία του μετρούμενου διαλύματος.

Ποσοτικά, η λειτουργία του ηλεκτροδίου περιγράφεται από την εξίσωση Nernst

$$E = E_0 - 2.303 \left(\frac{RT}{nF} \right) \cdot pH \quad (1.4)$$

Όπου

E : Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων αναφοράς και ένδειξης

E_0 : Το δυναμικό αναφοράς

R : Η παγκόσμια σταθερά αερίων και ίση με $8,314472 \text{ Jk}^{-1} \text{ mol}^{-1}$

T : Η θερμοκρασία σε βαθμούς Κέλβιν

F : Η σταθερά Faraday και ίση με $9.6485309 \frac{\text{Coulomb}}{\text{mol}}$

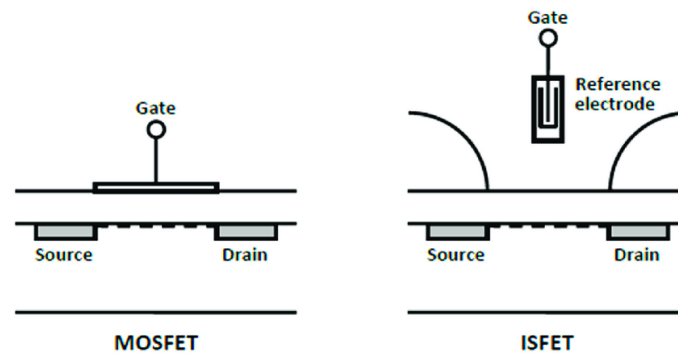
n : Ρυθμός μεταφοράς ηλεκτρονίων

Στο εμπόριο τα ηλεκτρόδια γυαλιού έρχονται σαν μια συμπαγής κατασκευή που στο ίδιο σώμα περιέχονται τα ηλεκτρόδια αναφοράς, ένδειξης και το εσωτερικό διάλυμα. Συνήθως τα ηλεκτρόδια αναφοράς/ένδειξης είναι κατασκευασμένα από κράμα αργύρου-χλωριούχου αργύρου (Ag/AgCl) ενώ το εσωτερικό διάλυμα είναι χλωριούχο κάλιο KCl διαφόρων συγκεντρώσεων, επιπρόσθετα το διάλυμα στο οποίο αποθηκεύεται το ηλεκτρόδιο είναι ρυθμιστικό διάλυμα συνήθως με pH 7. Ανάλογα με τον κατασκευαστή και το οικονομικό κόστος θα υπάρχουν διαφορές με την πτώση σημαντική να είναι η δυνατότητα του χρήστη να αλλάζει το εσωτερικό διάλυμα. Η αλλαγή του είναι σημαντική διότι με την πάροδο του χρόνου αλλά και της χρήσης του ηλεκτροδίου, το διάλυμα αλλοιώνεται με αποτέλεσμα οι μετρήσεις να μην είναι αξιόπιστες.

1.5.4 Ηλεκτρόδιο ISFET

Η ονομασία ISFET σημαίνει Ion Sensitive Field Effect Transistor (Transistor Επίδρασης Πεδίου Ευαίσθητο στα Ιόντα). Κατασκευαστικά είναι όμοιο με ένα κοινό MOSFET (Metal Oxide Field Effect Transistor) όμως η ειδοποιός διαφορά μεταξύ των δύο είναι στην κατασκευή της πύλης (Gate). Στα MOSFET η πύλη είναι κατασκευασμένη από ένα αγωγίμο ηλεκτρόδιο και ένα διηλεκτρικό για μονωτή. Ανάλογα με τον τύπο του MOSFET (n ή p καναλιού) και την τάση που εφαρμόζεται στην πύλη μπορεί να ελεγχθεί η ροή ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ των άλλων δύο ακροδεκτών της πηγής (Source) και του απαγωγού (Drain).

Σε ένα ISFET το ηλεκτρόδιο πύλης δεν έχει επαφή με την ημιαγώγιμη διάταξη ενώ αντί για το διηλεκτρικό υλικό που βρίσκεται στο MOSFET έχει τοποθετηθεί μία μεμβράνη με υψηλή ευαισθησία στην παρουσία ιόντων, ταυτόχρονα στο ηλεκτρόδιο πύλης παρέχεται σταθερή τάση.



Εικόνα 1.6: Κατασκευαστική διαφορά μεταξύ MOSFET και ISFET

Όταν το ISFET βρίσκεται σ'ένα διάλυμα τότε τα ελεύθερα ιόντα υδρογόνου ωθούνται σε κίνηση λόγω του σταθερού δυναμικού που παρέχεται από το ηλεκτρόδιο πύλης και οδηγούνται στην ευαίσθητη μεμβράνη, τα ιόντα υδρογόνου που θα βρεθούν στη μεμβράνη θα δημιουργήσουν το απαραίτητο ηλεκτρικό φορτίο ώστε να ελεγχθεί η ροή ρεύματος στο κανάλι. Ανάλογα το pH του διαλύματος άρα και της ποσότητας των ελεύθερων ιόντων υδρογόνου ελέγχεται το μέγεθος του καναλιού επομένως και του ρεύματος που διαρρέει το transistor. Τα αισθητήρια pH βασισμένα σε ISFET σε σχέση με τα ηλεκτρόδια γυαλιού έχουν πιο γρήγορη απόκριση ενώ μπορούν να ενσωματωθούν σε πολλές εφαρμογές με άλλους βιοαισθητήρες λόγω του μικρού τους μεγέθους.



Εικόνα 1.7: Ηλεκτρόδιο ISFET του εμπορίου

Κεφάλαιο 2 - Επιλογή και ανάλυση του ηλεκτροδίου

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί η επιλογή και η λειτουργία του αισθητήρα για τη μέτρηση pH καθώς και τα κριτήρια επιλογής του.

2.2 Επιλογή ηλεκτροδίου

Το ηλεκτρόδιο που επιλέχθηκε για την κατασκευή του οργάνου είναι ένα ηλεκτρόδιο γυαλιού, ο λόγος πίσω από αυτή την απόφαση είναι αρχικά η δυνατότητα μέτρησης σε υγρά διαλύματα, η δυνατότητα μέτρησης σε όλη την κλίμακα pH, το μεγάλο εύρος θερμοκρασιών που μπορεί να λειτουργήσει, η έξοδός του είναι τάση της τάξης των mV και τέλος το κόστος καθώς είναι πολύ φθηνότερο από τα ηλεκτρόδια ISFET όπως επίσης είναι εύκολα διαθέσιμα και μπορούν να αγοραστούν σαν kit με ρυθμιστικά διαλύματα για βαθμονόμηση αλλά και υγρό για το εσωτερικό του ηλεκτροδίου, αν το επιτρέπει.



Εικόνα 2.1: Ηλεκτρόδιο pH που χρησιμοποιήθηκε στο όργανο

2.3 Χαρακτηριστικά του ηλεκτροδίου

Το ηλεκτρόδιο συνοδεύεται από ένα datasheet με σημαντικά χαρακτηριστικά, όπως το εύρος μέτρησης (pH 0 - 14), το εύρος θερμοκρασιών στο οποίο μπορεί να λειτουργήσει το ηλεκτρόδιο (0 - 80°C), το αλκαλικό σφάλμα ($<15\text{mV}$), ο χρόνος απόκρισης ($< 2\text{min}$) και η εσωτερική του αντίσταση ($<250\text{M}\Omega$).

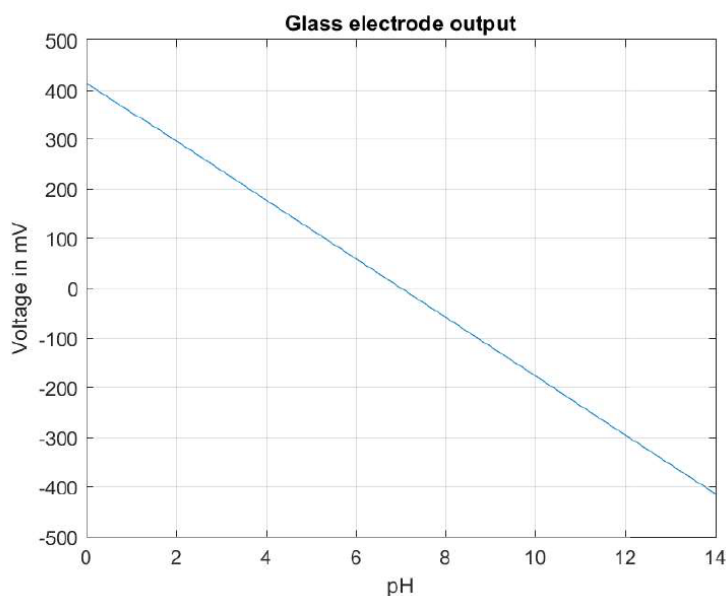
2.4 Λειτουργία του ηλεκτροδίου

Όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο η λειτουργία ενός ηλεκτροδίου γυαλιού περιγράφεται μαθηματικά από την εξίσωση Nernst.

$$E = E_0 - 2.303 \left(\frac{RT}{nF} \right) \cdot pH \quad (2.1)$$

Για να είμαστε σε θέση να καταλάβουμε την απόκριση του ηλεκτροδίου και την επίδραση της θερμοκρασίας και του pH πρέπει να λύσουμε την παραπάνω εξίσωση.

Από τη βιβλιογραφία είναι γνωστό πως στους 25°C η απόκριση του ηλεκτροδίου είναι η παρακάτω.



Διάγραμμα 2.1: Η απόκριση του ηλεκτροδίου για pH 0- 14 και θερμοκρασία 25°C

Πίνακας 2.1: Η απόκριση του ηλεκτροδίου για pH 0- 14 και θερμοκρασία 25°C

pH	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
mV	414	355	296	237	177	118	59	00	-59	-118	-177	-237	-296	-355	-414

Το ζητούμενο για την κατασκευή του οργάνου είναι να γνωρίζουμε την απόκριση του ηλεκτροδίου για θερμοκρασίες από 0 - 100°C. Στην περίπτωση αυτή η εξίσωση πρέπει να μελετηθεί παραπάνω.

Η εξίσωση Nernst είναι γραμμική της μορφής $y = -ax + \beta$ με την κλίση a να είναι η σχέση $\frac{RT}{nF}$ και ο σταθερός όρος β να είναι το δυναμικό αναφοράς E_0 .

Στην περίπτωση που το pH είναι 0 η εξίσωση Nernst είναι:

$$E = E_0 - \frac{RT}{nF} \cdot pH \Rightarrow E = E_0 - \frac{RT}{nF} \cdot 0 \Rightarrow E = E_0 = 414mV$$

Άρα αν αντικαταστήσουμε τις κατάλληλες μεταβλητές και λύσουμε την εξίσωση για 25°C θα έχουμε τα αποτελέσματα στον πίνακα 1. Όταν όμως επιχειρήσουμε να λύσουμε την εξίσωση για θερμοκρασία διαφορετική από τους 25°C, τότε τα αποτελέσματα θα είναι διαφορετικά.

Κεφάλαιο 2

Αυτό συμβαίνει επειδή δεν γνωρίζουμε ακόμα το δυναμικό αναφοράς του ηλεκτροδίου και τον τρόπο για να το υπολογίσουμε. Λόγω της αλλαγής της θερμοκρασίας, η ισορροπία του ηλεκτροδίου αναφοράς διαταράσσεται με αποτέλεσμα την αλλαγή του δυναμικού αναφοράς. Το δυναμικό αναφοράς υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$E_0 = \frac{RT}{nF} \cdot \log_{10}(K_c) \quad (2.2)$$

Οι μεταβλητές R, T, n, F είναι γνωστές ενώ K_c ονομάζεται η σταθερά χημικής ισορροπίας και υπολογίζεται μέσω της σύστασης του ηλεκτροδίου αναφοράς. Για το ηλεκτρόδιο με σύσταση Ag/AgCl η σταθερά χημικής ισορροπίας υπολογίζεται ως

$$K_c = \frac{[Ag^+][Cl^-]}{[AgCl]}$$

Για να υπολογίσουμε το δυναμικό αναφοράς θα πρέπει λοιπόν να γνωρίζουμε και την σταθερά χημικής ισορροπίας όμως για το συγκεκριμένο ηλεκτρόδιο δεν έχουμε επιπλέον δεδομένα που να μας δίνουν την συγκέντρωση αργύρου και χλωρίου στο ηλεκτρόδιο. Γι'αυτό θα λύσουμε την εξίσωση ως προς $\log_{10}(K_c)$ αφού έχουμε γνωστή την τιμή του δυναμικού αναφοράς και γνωρίζοντας πως ο λογάριθμος είναι σταθερός λόγω της K_c .

Έτσι λοιπόν είναι:

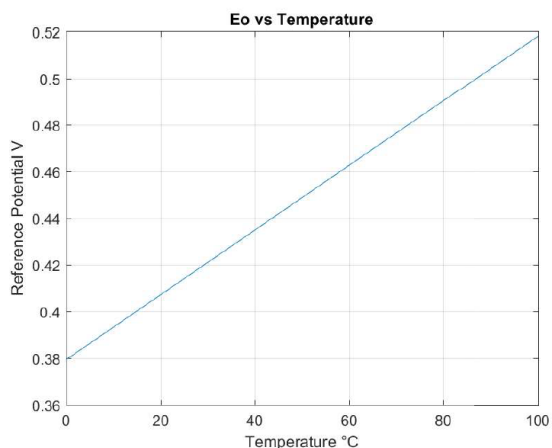
$\log_{10}(K_c) = \frac{E_0}{\frac{RT}{nF}}$ στους 25°C η θερμοκρασία σε °K είναι 298.15°K και το δυναμικό αναφοράς 414mV. Αντικαθιστώντας όλες τις μεταβλητές στην εξίσωση είναι:

$$\log_{10}(K_c) = \frac{E_0}{\frac{RT}{nF}} = \frac{0.414}{\frac{8.314472 \cdot 298.15}{96485}} = 16.1135$$

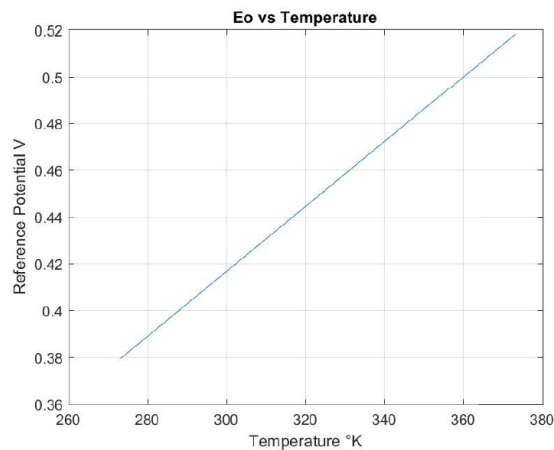
Λύνοντας το λογάριθμο η σταθερά χημικής ισορροπίας είναι ίση με $10^{16.1135}$.

Έχοντας πλέον όλα τα δεδομένα που χρειαζόμαστε στη διάθεσή μας μπορούμε να υπολογίσουμε το δυναμικό αναφοράς για οποιαδήποτε θερμοκρασία. Στο παρακάτω γράφημα παριστάνεται το δυναμικό αναφοράς συναρτήσει της θερμοκρασίας για το εύρος 0 - 100°C και το αντίστοιχο εύρος σε βαθμούς °K.

Επιλογή και χαρακτηριστικά του ηλεκτροδίου



Διάγραμμα 2.2: Το δυναμικό αναφοράς για θερμοκρασίες σε °C



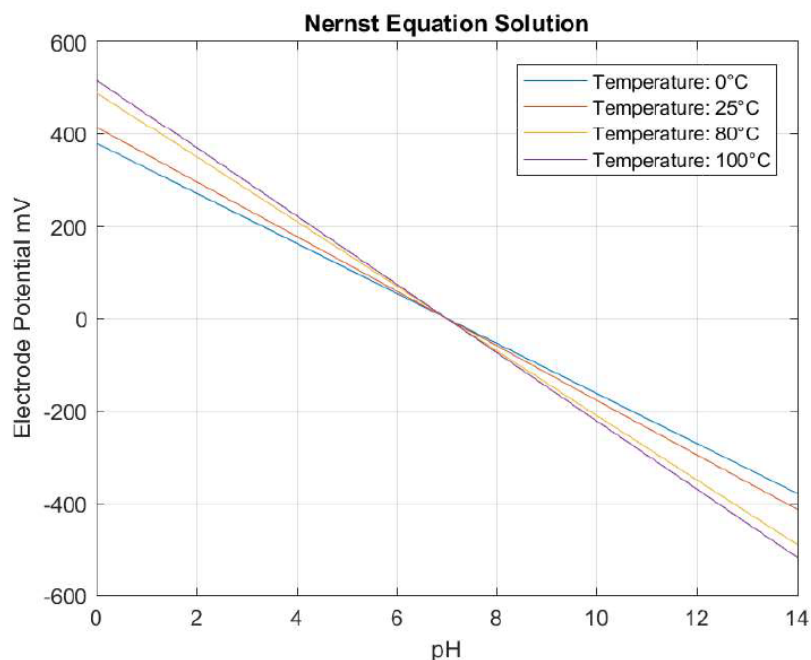
Διάγραμμα 2.3: Το δυναμικό αναφοράς για θερμοκρασίες σε °K

Στον παρακάτω πίνακα δίνεται το δυναμικό αναφοράς για θερμοκρασίες 0, 10, 20, 25,30,50, 60, 75,80 και 100 °C

Πίνακας 2.2: Δυναμικό αναφοράς για διάφορες θερμοκρασίες

E_0 (mV)	379.3	393.2	407.1	414	420.9	448.7	462.6	483.4	490.4	518.1
Temp °C	0	10	20	25	30	50	60	75	80	100
Temp °K	273.15	283.15	293.15	298.15	303.15	323.15	333.15	348.15	353.15	373.15

Αφού πλέον γνωρίζουμε και τον τρόπο υπολογισμού του ηλεκτροδίου αναφοράς μπορούμε να υπολογίσουμε την απόκριση του ηλεκτροδίου για τιμές pH 0 έως 14 και διάφορες θερμοκρασίες.



Διάγραμμα 2.4: Απόκριση ηλεκτροδίου για 4 διαφορετικές θερμοκρασίες(°C)

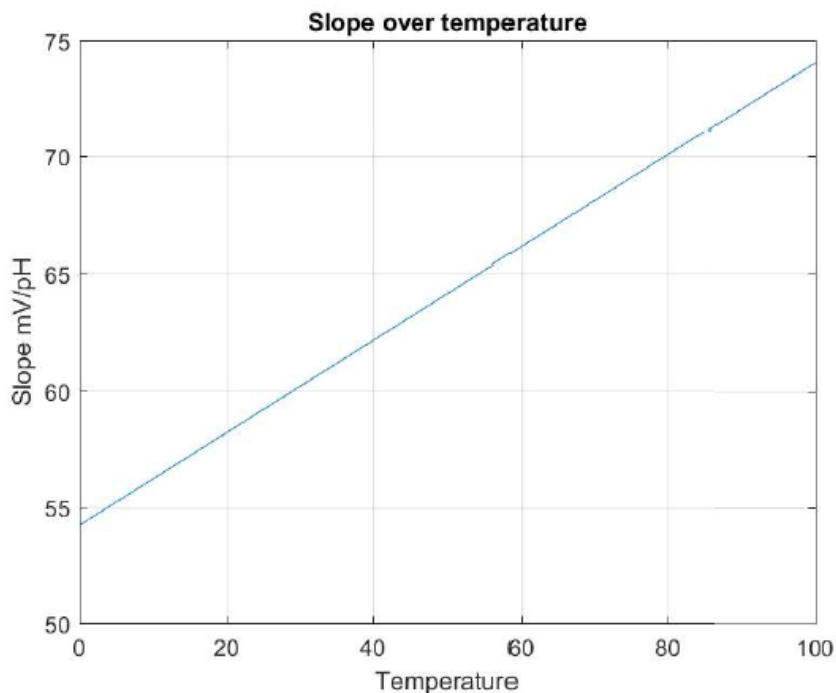
Πίνακας 2.3: Απόκριση ηλεκτροδίου για 4 διαφορετικές θερμοκρασίες(°C)

pH	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	T °C
E(mV)	379.3	325.1	270.9	216.7	162.5	108.2	54.03	-0.174 5	-54.38	-108.6	-162.8	-217	-271.2	-325.4	-379.6	0
	414	354.8	295.7	236.5	177.3	118.2	59.98	-0.190 1	-59.36	-118.5	-177.7	-236.9	-296	-355.2	-414.4	25
	490.4	420.3	350.2	280.1	210.0	139.9	69.86	-0.225 2	-70.31	-140.4	-210.5	-280.6	-350.7	-420.7	-490.8	80
	518.1	444.1	370.0	296.0	221.9	147.9	73.8	-0.237 9	-73.8	-148.3	-222.4	-296.5	-370.5	-444.6	-518.6	100

Όπως φαίνεται από την εξίσωση Nernst, η απόκριση του ηλεκτροδίου εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την τιμή pH του διαλύματος. Αν εστιάσουμε στην χαρακτηριστική E(mV)-pH, για σταθερή θερμοκρασία, προκύπτει μία ευθεία με κλίση που δίνεται από τη σχέση $-2.303 \frac{RT}{nF}$. Αν θεωρήσουμε ότι έχουμε άλλη θερμοκρασία, τότε η κλίση αλλάζει και η τιμή της μπορεί να υπολογιστεί από την ίδια σχέση. Για θερμοκρασίες 0 - 100 °C η τιμή της κλίσης εμφανίζεται παρακάτω

Πίνακας 2.4: Η κλίση της εξίσωσης για διαφορετικές θερμοκρασίες °C

Κλίση (mV)	54.21	56.19	58.18	59.17	60.16	64.13	66.12	69.09	70.09	74.05
Temp °C	0	10	20	25	30	50	60	75	80	100



Διάγραμμα 2.5: Η κλίση της ευθείας σε θερμοκρασίες°C

Η κλίση όπως φαίνεται και στο γράφημα αυξάνεται αριθμητικά ανάλογα με την αύξηση της θερμοκρασίας, όμως στην πραγματικότητα λόγω του αρνητικού προσήμου στην εξίσωση Nernst η απόκριση του ηλεκτροδίου μειώνεται με την αύξηση του pH. Η μονάδα μέτρησης της κλίσης είναι mV/pH.

2.4.1 Μια διαφορετική προσέγγιση

Μια διαφορετική αποτύπωση της εξίσωσης Nernst είναι η παρακάτω.

$$E = - 2.303 \frac{RT}{nF} (pH_m - pH_{ref}) \quad (2.3)$$

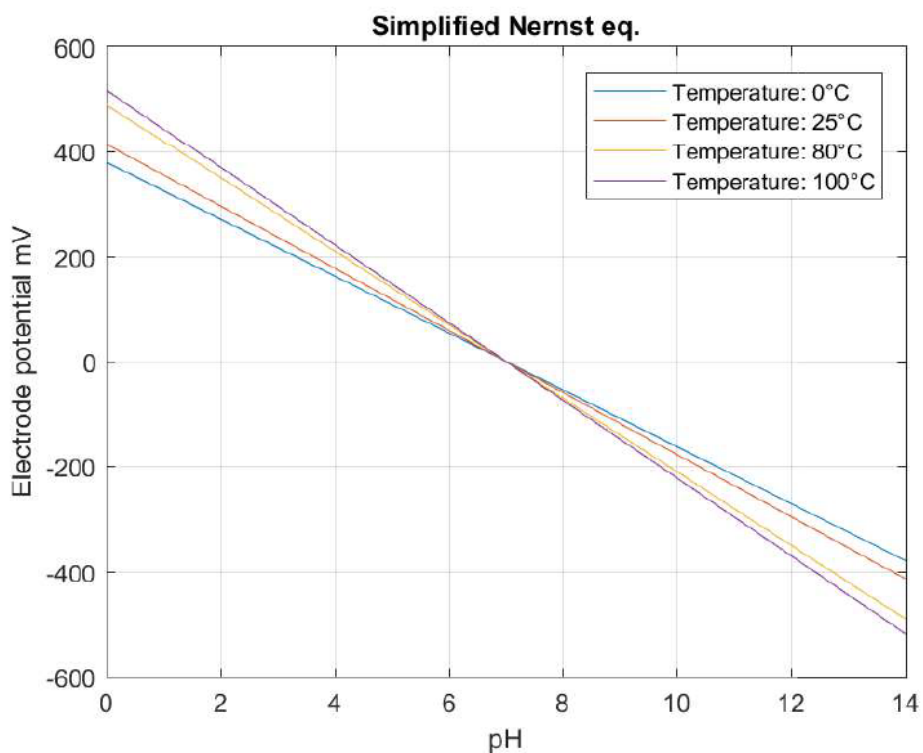
Όπου στην συγκεκριμένη εξίσωση pH_m και pH_{ref} είναι το pH του μετρούμενου διαλύματος και του εσωτερικού διαλύματος αντίστοιχα. Το εσωτερικό διάλυμα στα ηλεκτρόδια γυαλιού έχει pH 7 και είναι χλωριούχο κάλιο (KCl) διάφορων συγκεντρώσεων. Αντικαθιστώντας το pH του εσωτερικού διαλύματος με 7 η εξίσωση (4) γίνεται.

$$E = - 2.303 \frac{RT}{nF} (pH_m - 7)$$

Λύνοντας την εξίσωση για τιμές pH 0 - 14 και για διάφορες θερμοκρασίες είναι:

Πίνακας 2.5: Λύση της εξίσωσης Nernst για 4 θερμοκρασίες

pH	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	T °C
E(mV)	379.5	325.3	271	216.8	162.6	108.4	54.21	0	-54.21	-108.4	-162.6	-216.8	-271	-325.3	-379.5	0
	414.2	355	295.9	236.7	177.5	118.3	59.17	0	-59.17	-118.3	-177.5	-236.7	-295.9	-355	-414.2	25
	490.6	420.5	350.4	280.3	210.3	140.2	70.09	0	-70.09	-140.2	-210.3	-280.3	-350.4	-420.5	-490.6	80
	518.4	444.3	370.3	296.2	222.2	148.1	74.05	0	-74.05	-148.1	-222.2	-296.2	-370.3	-444.3	-518.4	100



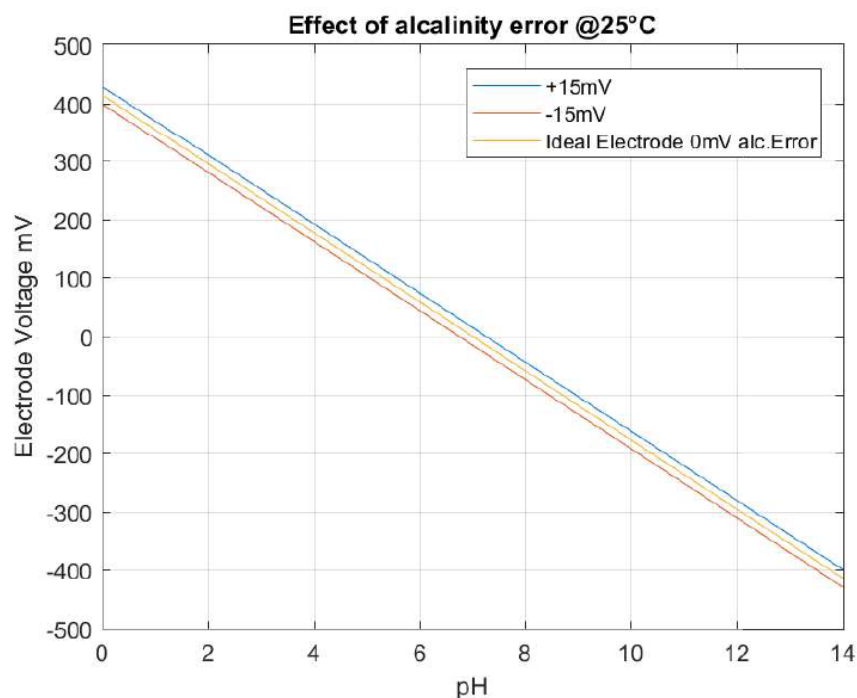
Διάγραμμα 2.6: Λύση της εξίσωσης Nernst για 4 θερμοκρασίες

Παρατηρώντας τις λύσεις των δύο εξισώσεων και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα είναι φανερό πως και οι δύο εξισώσεις μας δίνουν τα ίδια αποτελέσματα με μικρές διαφορές ως προς τη συμμετρία της ευθείας και την απόκριση του ηλεκτροδίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως στην πρώτη εξίσωση λάβαμε υπόψη μας παράγοντες όπως το δυναμικό αναφοράς και κατ' επέκταση τη σταθερά χημικής ισορροπίας, με την πρώτη εξίσωση θεωρούμε πως έχουμε μια πιο ακριβή εικόνα για την λειτουργία του ηλεκτροδίου ενώ με τη δεύτερη εξίσωση περιγράφεται με ευκολότερο τρόπο η λειτουργία του. Σε πολλές εφαρμογές χρησιμοποιείται η δεύτερη εξίσωση καθώς είναι και αυτή ακριβής με μικρές προσεγγίσεις και εύκολη στην επίλυσή της.

2.5 Επίδραση των χαρακτηριστικών του ηλεκτροδίου

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 2.1 δύο από τα χαρακτηριστικά του ηλεκτροδίου είναι το αλκαλικό σφάλμα και η εσωτερική του αντίσταση. Το αλκαλικό σφάλμα δίνεται μικρότερο των 15mV και η εσωτερική αντίσταση μικρότερη των 250MΩ. Στα πλαίσια της σχεδίασης του οργάνου μας ενδιαφέρουν αυτά τα δύο μεγέθη γιατί στην περίπτωση του αλκαλικού σφάλματος πρέπει να γίνεται σωστή βαθμονόμηση για να λαμβάνουμε ικανοποιητικές μετρήσεις ενώ για την εσωτερική αντίσταση πρέπει ο σχεδιασμός να γίνει με τρόπο έτσι ώστε το σήμα που θα λαμβάνεται από το ηλεκτρόδιο να

μην επηρεάζεται από τις εσωτερικές αντιστάσεις των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων καθώς επίσης και των ρευμάτων πόλωσης που χρειάζονται για να λειτουργήσουν. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί πως δεν γίνεται να μετρηθεί η διαφορά δυναμικού που παράγει το ηλεκτρόδιο με το πολύμετρο καθώς η αντίσταση εισόδου του πολυμέτρου επηρεάζει την έξοδο του ηλεκτροδίου με αποτέλεσμα οι μετρήσεις να είναι λανθασμένες. Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται η διαφοροποίηση της απόκρισης του ηλεκτροδίου όταν υπάρχει το αλκαλικό σφάλμα. Για την περίπτωση αυτή θεωρούμε πως το αλκαλικό σφάλμα είναι $\pm 15\text{mV}$.



Διάγραμμα 2.7: Η επίδραση του αλκαλικού σφάλματος στους 25°C σε σχέση με το ιδανικό ηλεκτρόδιο

Πίνακας 2.6: Η επίδραση του αλκαλικού σφάλματος στους 25°C σε σχέση με το ιδανικό ηλεκτρόδιο

pH	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	A.Err (mV)
E(mV)	429.2	370	310.9	251.7	192.5	133.3	74.17	15	-44.17	-103.3	-162.5	-221.7	-280.9	-340	-399.2	+15
	414.2	355	295.9	236.7	177.5	118.3	59.17	0	-59.17	-118.3	-177.5	-236.7	-295.9	-355	-414.2	0
	399.2	340	280.9	221.7	162.5	103.3	44.17	-15	-74.17	-133.3	-192.5	-251.7	-310.9	-370	-429.2	-15

Αφού πλέον έχουμε γνωστά τα χαρακτηριστικά, τον τρόπο λειτουργίας και την διαφορά δυναμικού που δημιουργείται στα άκρα του ηλεκτροδίου συναρτήσει του pH και της θερμοκρασίας το επόμενο βήμα είναι η σχεδίαση των αναλογικών ηλεκτρονικών που θα επεξεργαστούν την διαφορά δυναμικού του ηλεκτροδίου.

Κεφάλαιο 3 - Αναλογικά κυκλώματα για την επεξεργασία σήματος του ηλεκτροδίου

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται ανάλυση του σχεδιασμού και των χαρακτηριστικών των αναλογικών κυκλωμάτων που είναι υπεύθυνα για την επεξεργασία του σήματος που παράγεται από το ηλεκτρόδιο.

3.2 Απαιτήσεις Κυκλώματος

Το αναλογικό κύκλωμα που χρειαζόμαστε πρέπει αρχικά να έχει ενισχυτή και αυτό γιατί τα σήματα που παράγονται από το ηλεκτρόδιο είναι μικρά με αποτέλεσμα να μην μπορούν να γίνουν αντιληπτά από κάποιον Analog to Digital μετατροπέα και δεύτερον πρέπει η έξοδος του κυκλώματος να είναι θετική > 0 καθώς λόγω της τροφοδοσίας 5V και του μικροελεγκτή θα υπάρχει δυνατότητα μετατροπής σημάτων από 0V έως 3.3V. Αυτά είναι τα βασικά χαρακτηριστικά του κυκλώματος που θα μας επιτρέψουν να αναπτύξουμε την εφαρμογή.

Λόγω του γεγονότος πως η διαφορά δυναμικού του ηλεκτροδίου μπορεί να λάβει αρνητικές και θετικές τιμές μας οδηγεί στο επόμενο βήμα που είναι ο τρόπος με τον οποίο το σήμα θα λαμβάνεται από τον ενισχυτή για την επεξεργασία του. Η τροφοδοσία του κυκλώματος θα είναι μονοπολική και ίση με 5V.

3.2.1 Επιλογή ενισχυτή

Για τον ενισχυτή θα χρησιμοποιηθεί ο ενισχυτής οργανολογίας AD623 που έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά.

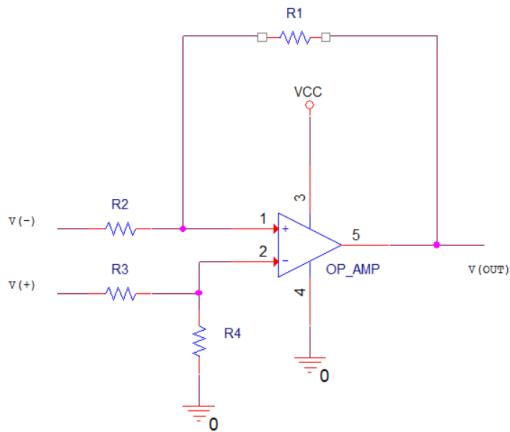
- Δυνατότητα λειτουργίας με μονοπολική και διπολική τροφοδοσία
- Rail to Rail έξοδος
- Προγραμματιζόμενο κέρδος
- Τάση ασυμμετρίας εισόδου (Input Offset Voltage) 200uV
- Τάση ασυμμετρίας εξόδου (Output Offset Voltage) 1mV
- Χαμηλό ρεύμα πόλωσης $\sim 25nA$
- Υψηλή αντίσταση εισόδου, διαφορική και κοινού σήματος
- Χαμηλή αντίσταση εξόδου

3.2.2 Ενισχυτές οργανολογίας γενικά

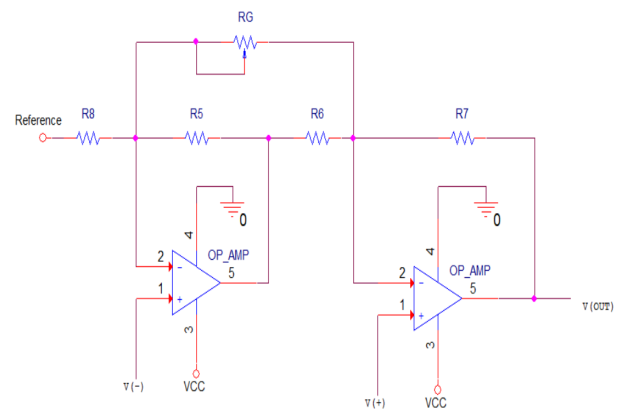
Γενικότερα οι ενισχυτές οργανολογίας χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές με αισθητήρια και συστήματα μετρήσεων καθώς παρέχουν μεγάλη ακρίβεια και υψηλό CMRR, δηλαδή λόγο απόρριψης κοινού σήματος. Ένας ενισχυτής οργανολογίας (EO) ενισχύει τη διαφορά τάσης των εισόδων του. Ο ορισμός του κέρδους στους EO διαφέρει από σύστημα σε σύστημα. Αναφορικά για αυτό στα ολοκληρωμένα κυκλώματα EO το κέρδος μπορεί να ρυθμιστεί αναλογικά με την προσθήκη μία αντίστασης όπως τον AD623 τον AD8420 και τον AD8222. Πέραν της αναλογικής ρύθμισης υπάρχουν περιπτώσεις που μπορεί να ρυθμιστεί και ψηφιακά όπως στον ADA4255, τον LTC6373, τον ADA4254 και άλλους.

Πέραν όμως των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, ενισχυτές οργανολογίας μπορούν να κατασκευαστούν με διακριτούς τελεστικούς ενισχυτές, με την πιο απλή τοπολογία να είναι ο διαφορικός ενισχυτής ενώ στα πιο σύνθετα κυκλώματα αποτελούνται από δύο, τρεις ή και τέσσερις τελεστικούς ενισχυτές.

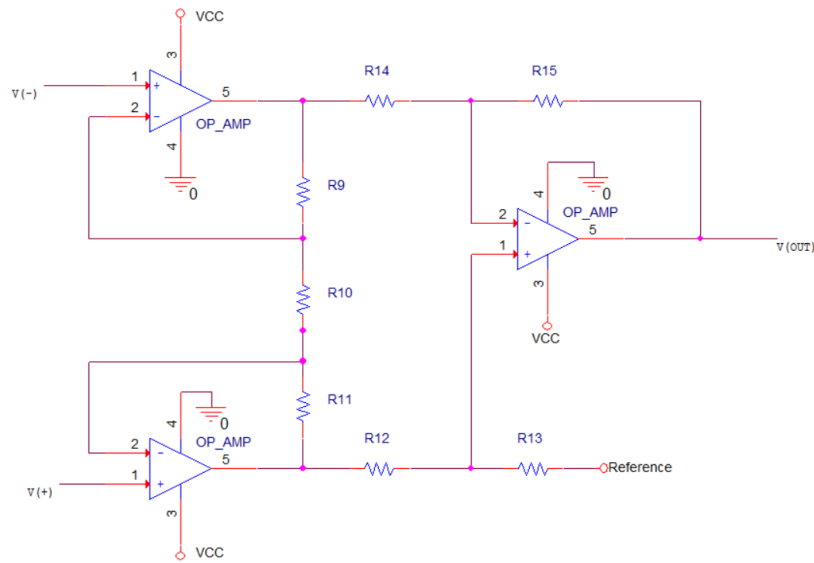
Αναλογικά κυκλώματα για την επεξεργασία σήματος του ηλεκτροδίου



α) Διαφορικός Ενισχυτής



β) ΕΟ με 2 τελεστικούς ενισχυτές



γ) Ενισχυτής οργανολογίας με 3 τελεστικούς ενισχυτές

Κύκλωμα 3.1 α) β) γ): Ενισχυτής οργανολογίας μονοπολικής τροφοδοσίας σε διάφορες τροπολογίες

3.3 Προσαρμογή σήματος

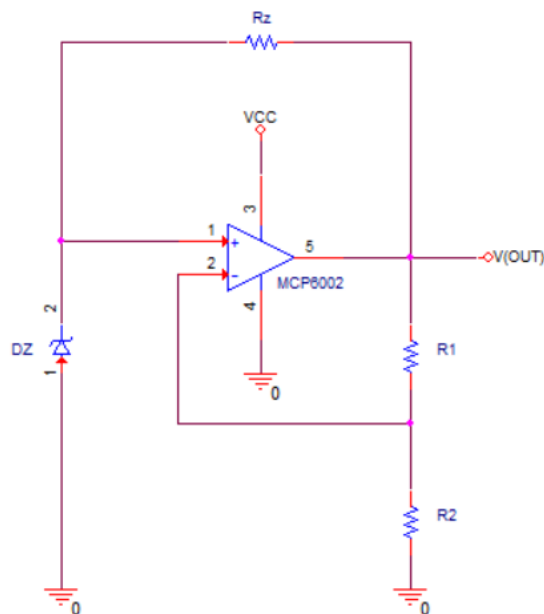
Αφού επιλέχθηκε το είδος του ενισχυτή, σειρά έχει η μελέτη της εισόδου και συγκεκριμένα το πως η διαφορά δυναμικού που παράγεται από το ηλεκτρόδιο θα λαμβάνεται στην διαφορική είσοδο του

ενισχυτή. Σε πολλές διατάξεις λόγω της φύσης του σήματος που πρέπει να επεξεργαστεί, χρησιμοποιείται μία τάση η οποία ανυψώνει το σήμα εισόδου σε επίπεδα τα οποία θα είναι αντιληπτά από τον ενισχυτή οργανολογίας. Η τάση αυτή ονομάζεται τάση κοινού σήματος V_{CM} και δεν επηρεάζει σημαντικά τη λειτουργία του ενισχυτή καθώς είναι κοινή και στις δύο εισόδους της διάταξης και λόγω του υψηλού CMRR των ΕΟ, η επίδρασή της είναι ελάχιστη έως μηδαμινή. Για το κύκλωμα που είναι υπεύθυνο για το ηλεκτρόδιο η τάση αυτή έχει οριστεί στα 2.5V .

Η τάση αυτή μπορεί να ληφθεί με διάφορους τρόπους όπως είναι ένας διαιρέτης τάσης, μία διόδος zener ανάστροφα πολωμένη, κυκλώματα πηγών τάσης αναφοράς, ολοκληρωμένα κυκλώματα τάσης αναφοράς και άλλα. Για την εφαρμογή μας επιλέχθηκε μια πηγή τάσης αναφοράς με τελεστικό ενισχυτή.

3.3.1 Πηγές τάσης αναφοράς με τελεστικούς ενισχυτές γενικά

Μία πηγή τάσης αναφοράς με τελεστικό ενισχυτή χρησιμοποιεί την τάση μιας ανάστροφα πολωμένης διόδου zener ως τάση εισόδου και με τη χρήση ενός δικτύωματος ανάδρασης την ενισχύει. Με τη χρήση επίσης μίας αντίστασης μεταξύ της εξόδου του τελεστικού ενισχυτή και της καθόδου της διόδου επιτυγχάνεται η σταθερή ανάστροφη πόλωση της διόδου με σταθερό ρεύμα.



Κύκλωμα 3.2: Πηγή τάσης αναφοράς με τελεστικό ενισχυτή

Η τάση της διόδου zener λαμβάνεται στην μη αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού ενισχυτή πράγμα που σημαίνει πως ο ενισχυτής είναι μη αναστρέφων με την έξοδό του να περιγράφεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση

$$V_o = V_Z \cdot \left(1 + \frac{R1}{R2} \right) \quad (3.1)$$

Εκτός όμως από την τάση εξόδου πρέπει να γνωρίζουμε και το ρεύμα πόλωσης της διόδου zener. Το ρεύμα αυτό ονομάζεται I_{ZT} και παρακάτω περιγράφεται μαθηματικά ο υπολογισμός του.

Μία διόδος zener έχει τα εξής χαρακτηριστικά

- Την τάση zener V_Z

- Την μέγιστη ισχύ στην οποία μπορεί να λειτουργήσει P_z
- Ανοχή %

Μέσω της τάσης zener και της ισχύος θα υπολογιστεί το μέγιστο ανάστροφο ρεύμα της διόδου, στην περίπτωση αυτή ισχύει

$$P_z = V_z \cdot I_{z(MAX)} \Leftrightarrow I_{z(MAX)} = \frac{P_z}{V_z}$$

Από τα παραπάνω υπολογίζεται το ελάχιστο ρεύμα ανάστροφης λειτουργίας της διόδου και είναι το 10% του μέγιστου ανάστροφου ρεύματος

$$I_{ZT} = \frac{I_{z(MAX)}}{10}$$

Αφού πλέον είναι γνωστό το I_{ZT} επόμενο βήμα στη σχεδίαση είναι ο υπολογισμός της αντίστασης μεταξύ εξόδου ΤΕ και καθόδου της διόδου

$$R_z = \frac{V_0 - V_z}{I_{ZT}}$$

Σημαντικό κομμάτι στην παραπάνω διαδικασία είναι επίσης και το ρεύμα βραχυκύκλωσης του ΤΕ καθώς είναι το μέγιστο ρεύμα που ο ΤΕ μπορεί να παρέχει στην έξοδό του.

3.3.2 Πηγή ρεύματος με ΤΕ για το πραγματικό κύκλωμα της εφαρμογής

Έχοντας ένα απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο το επόμενο βήμα είναι η σχεδίαση του πραγματικού κυκλώματος που θα χρησιμοποιηθεί στην εφαρμογή. Η απαίτηση για το κύκλωμα αυτό είναι η έξοδος του να είναι 2.5V . Για την τάση εισόδου του κυκλώματος θα χρησιμοποιηθεί μία διόδος zener BZX75C1V4 ανάστροφα πολωμένη με χαρακτηριστικά, $V_z = 1.4V$, $P_z = 0.4W$ ενώ το τελεστικός ενισχυτής είναι ο MCP6002, ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα με 2 τελεστικούς ενισχυτές σε DIP8 συσκευασία.

Αρχικά πρέπει να υπολογιστεί το ελάχιστο ρεύμα ανάστροφης λειτουργίας, που είναι

$$I_{ZT} = \frac{I_{z(MAX)}}{10}$$

Με $I_{z(MAX)}$

$$I_{z(MAX)} = \frac{P_z}{V_z} = \frac{0.4}{1.4} = 285.714mA$$

προκύπτει

$$I_{ZT} = \frac{285.714}{10} = 28.57mA$$

Γνωρίζοντας πλέον το ρεύμα, την τάση εξόδου και εισόδου, η αντίσταση που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάστροφη πόλωση της διόδου είναι

$$R_z = \frac{2.5V - 1.4V}{28.57mA} = 38.50\Omega \approx 38 \text{ ή } 39\Omega$$

Τέλος πρέπει να υπολογίσουμε τις αντιστάσεις του δικτύματος ανάδρασης του κυκλώματος. Το κέρδος του ενισχυτή υπολογίζεται από το λόγο της τάσης εξόδου προς την τάση εισόδου και είναι

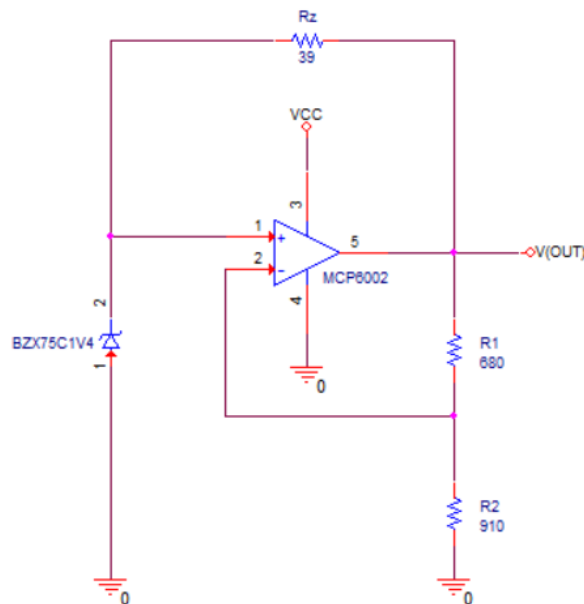
$$Av = \frac{V_0}{V_z} = \frac{2.5}{1.4} = 1.78$$

Μέσω αυτού οι αντιστάσεις του δικτύωματος ανάδρασης υπολογίζονται

$$Av = \left(1 + \frac{R1}{R2}\right) \Leftrightarrow Av - 1 = \frac{R1}{R2} \Leftrightarrow (Av - 1) \cdot R2 = R1 \Rightarrow (0.78) \cdot R2 = R1$$

Για τις αντιστάσεις χρησιμοποιήθηκαν $R1 = 680\Omega$ και $R2 = 910\Omega$ που ορίζουν το κέρδος ίσο με 1.74.

Το κύκλωμα της πηγής τάσης σχεδιασμένο στο PSpice είναι το παρακάτω.

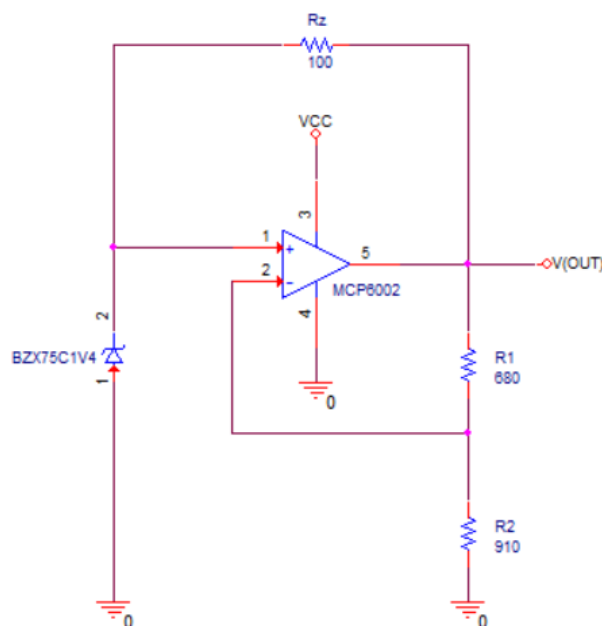


Κύκλωμα 3.3: Πηγή τάσης αναφοράς με τελεστικό ενισχυτή στο PSpice

Στην προσομοίωση το κύκλωμα παρουσιάζει διαφορές σχετικά με τη θεωρία, η κύρια διαφορά είναι πως η τάση εξόδου δεν είναι 2.5V αλλά 2.16V ενώ το αναμενόμενο αποτέλεσμα σύμφωνα με τους παραπάνω υπολογισμούς είναι ιδανικά 2.5V ή με βάση τις αντιστάσεις για το δίκτυωμα ανάδρασης 2.43V. Θέλοντας να πετύχουμε την τάση εξόδου ίση με 2.43V επιχειρήσαμε την παρακάτω αλλαγή. Κρατώντας σταθερές τις αντιστάσεις $R1$, $R2$ και ορίζοντας την Rz ίση με 100Ω τότε η τάση εξόδου γίνεται 2.44V και το ρεύμα ανάστροφης πόλωσης της διόδου 10.45mA. Πειραματικά εξετάζοντας το νέο κύκλωμα έχουμε 2.43V, ρεύμα ανάστροφης πόλωσης 10.2mA ενώ η ανάστροφη τάση zener είναι ίση με 1.4V. Οι παραπάνω μετρήσεις συμφωνούν με τους νέους θεωρητικούς υπολογισμούς καθώς για Rz ίση με 100Ω το ρεύμα ανάστροφης πόλωσης της διόδου βγαίνει ίσο με 10.3mA και η τάση εξόδου ίση με 2.43V. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι παραπάνω μετρήσεις και το νέο κύκλωμα.

Πίνακας 3.1: Μετρήσεις πηγής τάσης αναφοράς με τελεστικό ενισχυτή

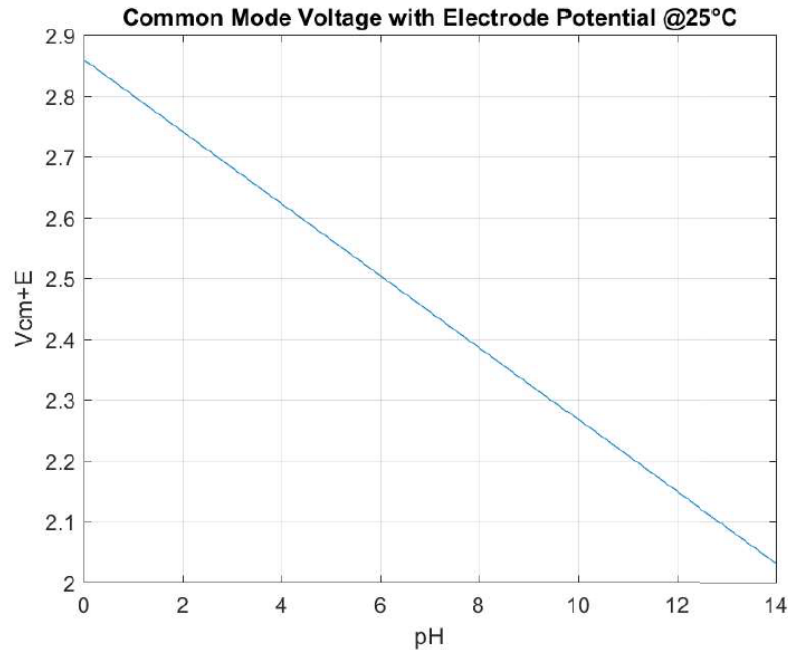
	Θεωρητικά	Προσομοίωση	Πείραμα
V_0 (V)	2.43	2.44	2.43
V_Z (V)	1.4	1.4	1.4
I_Z (mA)	10.3	10.45	10.2



Κύκλωμα 3.4: Πειραματικό κύκλωμα πηγής τάσης αναφοράς με τελεστικό ενισχυτή στο PSpice

3.3.3 Σύνδεση με το ηλεκτρόδιο

Όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2, η διαφορά δυναμικού που παράγεται από το ηλεκτρόδιο λαμβάνει αρνητικές και θετικές τιμές και σε συνδυασμό με τα δεδομένα που έχουμε από την ενότητα 3.2 χρησιμοποιείται μία συνεχής τάση έτσι ώστε να ανυψώσει αυτή τη διαφορά δυναμικού έτσι ώστε να είναι δυνατή η λήψη και επεξεργασία της από τον ενισχυτή οργανολογίας. Το ηλεκτρόδιο θα συνδεθεί σε σειρά με την έξοδο της πηγής τάσης αναφοράς και μετά με τον ενισχυτή, οπότε στον ακροδέκτη εισόδου του ενισχυτή θα λαμβάνεται το άθροισμα της διαφοράς δυναμικού του αισθητηρίου και της τάσης αναφοράς. Παρακάτω, παρατίθενται γραφικά και αριθμητικά η διαφορά δυναμικού σε συνδυασμό με την τάση της πηγής αναφοράς όταν η θερμοκρασία είναι 25°C.



Διάγραμμα 3.1: Διαφορά δυναμικού ηλεκτροδίου σε συνδυασμό με την τάση της πηγής αναφοράς (γραφικά)

Πίνακας 3.2: Διαφορά δυναμικού ηλεκτροδίου σε συνδυασμό με την τάση της πηγής αναφοράς

pH	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
E(mV)	414	354.8	295.7	236.5	177.3	118.2	59.98	0.1901	-59.36	-118.5	-177.7	-236.9	-296	-355.2	-414.4
E+V _{cm}	2.859	2.8	2.741	2.682	2.623	2.563	2.504	2.445	2.386	2.327	2.267	2.208	2.149	2.09	2.031

3.4 Σύνδεση με τον ενισχυτή οργανολογίας

Το επόμενο βήμα στη σχεδίαση των κυκλωμάτων είναι η ενσωμάτωση όλων όσων αναφέρθηκαν παραπάνω σε ένα πλήρες, αξιόπιστο και λειτουργικό κύκλωμα. Πλέον εστιάζουμε στον ενισχυτή οργανολογίας, στον τρόπο λειτουργίας του στις μεθόδους και τα εξαρτήματα που θα μας βοηθήσουν στην κατασκευή του κυκλώματος και την απόκρισή του στις αλλαγές που συμβαίνουν στο ηλεκτρόδιο η στο μετρούμενο διάλυμα.

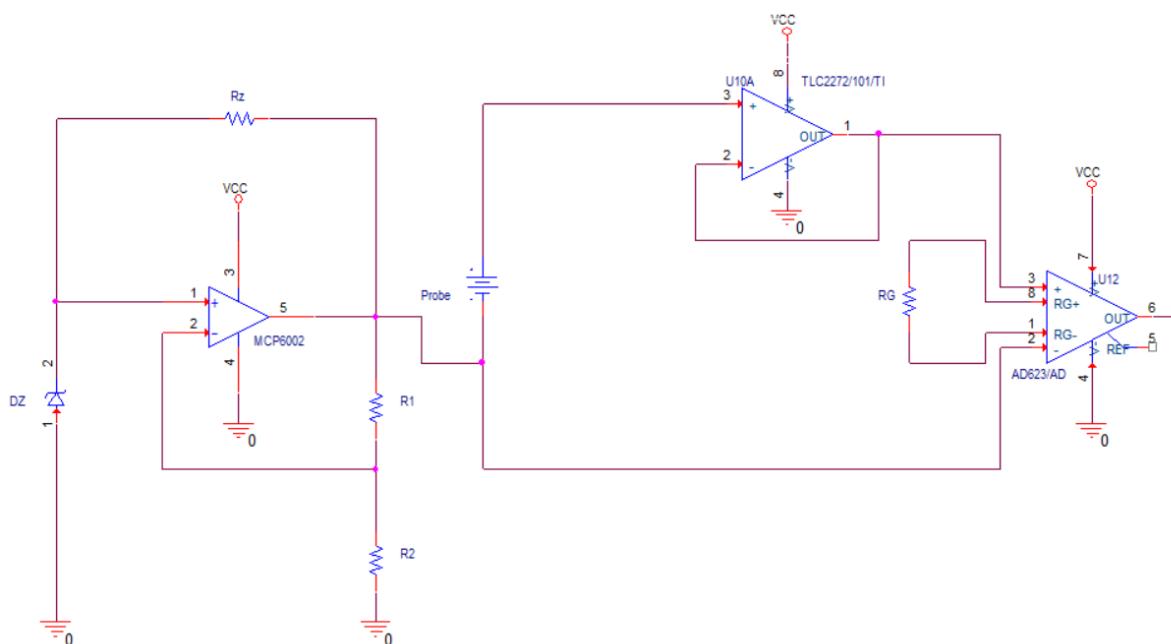
3.4.1 Σύνδεση ηλεκτροδίου και ενισχυτή οργανολογίας

Το σήμα που παράγεται από το ηλεκτρόδιο θα λαμβάνεται στη μη αναστρέφουσα είσοδο του ενισχυτή οργανολογίας μέσω ενός ακόλουθου τάσης (voltage buffer) ενώ η αναστρέφουσα είσοδος του ενισχυτή οργανολογίας θα συνδεθεί απευθείας με την έξοδο της πηγής τάσης αναφοράς. Ο ακόλουθος τάσης είναι απαραίτητος έτσι ώστε η διαφορά δυναμικού του ηλεκτροδίου να μην επηρεάζεται από τυχόν ρεύματα που θα τραβάει η είσοδος του ενισχυτή οργανολογίας. Σημαντικό χαρακτηριστικό του τελεστικού ενισχυτή είναι η αντίσταση εισόδου, που ιδανικά πρέπει να είναι άπειρη, αλλά και το ρεύμα πόλωσης του όσο και η τάση ασυμμετρίας εισόδου (input offset voltage) που πρέπει να έχουν εξαιρετικά χαμηλές τιμές. Πειραματικά έχουμε δει πως η τάση ασυμμετρίας εισόδου έχει μικρή επίδραση στην λειτουργία του ηλεκτροδίου που ακόμα και αν επηρεάζει την τάση που λαμβάνεται στην είσοδο του ενισχυτή οργανολογίας, υπάρχει δυνατότητα ρύθμισής της χρησιμοποιώντας κάποια από τις βαθμίδες που θα δούμε μετά. Σημαντική επίδραση όμως έχει το

ρεύμα πόλωσης του τελεστικού ενισχυτή καθώς ακόμα και ρεύματα της τάξης των nA, να χρειάζεται ο τελεστικός ενισχυτής, είναι ικανά να αλλοιώσουν την τάση εισόδου στο buffer και κατ'επέκταση τις μετρήσεις. Στο κύκλωμά μας χρησιμοποιήθηκε ως voltage buffer το, TLC2272CP ολοκληρωμένο κύκλωμα σε DIP-8 συσκευασία με δύο τελεστικούς ενισχυτές. Ο τελεστικός ενισχυτής έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά όπως δίνονται από το datasheet του.

- Rail to Rail έξοδο
- Τάση ασυμμετρίας εισόδου input voltage offset στα 3mV
- Ρεύμα πόλωσης 1-100pA
- Αντίσταση εισόδου στο 1TΩ
- Δυνατότητα λειτουργίας με μονοπολική ή συμμετρική τροφοδοσία

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω το κύκλωμα θα είναι το παρακάτω.



Κύκλωμα 3.5: Κύκλωμα με πηγή τάσης αναφοράς ηλεκτρόδιο buffer και ΕΟ

3.5 Υπολογισμός κέρδους και επιπλέον χαρακτηριστικών του κυκλώματος

Η σχεδίαση δεν τελειώνει σε αυτό το σημείο καθώς πρέπει να αναλυθεί μαθηματικά η λειτουργία του κυκλώματος. Από τα μέχρι τώρα δεδομένα γνωρίζουμε την διαφορά δυναμικού που εμφανίζει το ηλεκτρόδιο στα άκρα του καθώς και πως αυτό μεταβάλλεται. Πλέον το επόμενο βήμα στη σχεδίαση είναι να αναλυθεί η λειτουργία ολόκληρου του συστήματος. Αρχικά πρέπει να ορίσουμε το εύρος της τάσης εξόδου του κυκλώματος του ενισχυτή, λόγω του μικροελεγκτή που θα χρησιμοποιήσουμε η τάση αυτή πρέπει να λαμβάνει τιμές από 0.5V έως 3V και αυτό γιατί ο μετατροπέας A/D του μικροελεγκτή μπορεί να λάβει τάσεις έως 3.3V. Έχοντας γνωστά, αυτά προχωράμε ένα βήμα παραπάνω. Στο κύκλωμα 3.6 δεν έχει οριστεί η αντίσταση RG που είναι υπεύθυνη για το κέρδος και κατ'επέκταση δεν έχει οριστεί το κέρδος του ενισχυτή όπως επίσης και η τάση αναφοράς του η οποία δεν γνωρίζουμε ακόμη αν χρειάζεται. Αυτό σημαίνει πως πρέπει να δούμε τη συμπεριφορά του κυκλώματος για ακραίες τιμές τόσο pH, όσο και θερμοκρασίας δηλαδή για pH 0 και 14 σε

Κεφάλαιο 3

θερμοκρασίες 0 και 100°C. Όπως είδαμε και σε προηγούμενη ενότητα σε θερμοκρασία 0°C με pH 0 και 14, η διαφορά δυναμικού που εμφανίζει το ηλεκτρόδιο είναι 379.3 mV και -379.6mV αντίστοιχα ενώ για pH 0 και 14 σε θερμοκρασία 100°C η διαφορά δυναμικού είναι 518.1 mV και -518.6mV αντίστοιχα. Η μελέτη της συμπεριφοράς του κυκλώματος υπό αυτές τις συνθήκες στην είσοδο του μας δίνει τη δυνατότητα να κάνουμε βαθμονόμηση στο τελικό όργανο. Για να υπολογίσουμε λοιπόν το κέρδος και την τάση αναφοράς του ενισχυτή για τις ακραίες τιμές εξόδου υπό τις συνθήκες που αναφέραμε, πρέπει να λύσουμε τα παρακάτω συστήματα εξισώσεων.

Αρχικά η έξοδος του ενισχυτή οργανολογίας περιγράφεται από την εξίσωση

$$V_0 = \Delta V_{IN} \cdot G + Vref \quad (3.2)$$

Όπου

V_0 : Η τάση εξόδου

ΔV_{IN} : Η διαφορική τάση εισόδου

G : Το κέρδος του ενισχυτή που είναι ίσο με $1 + \frac{100k}{RG}$

$Vref$: Η τάση αναφοράς του ενισχυτή οργανολογίας

Με περαιτέρω ανάλυση μπορούμε να διαπιστώσουμε πως η τάση που δίνεται από την πηγή τάσης αναφοράς δεν επηρεάζει την έξοδο του κυκλώματος καθώς

$$\Delta V_{IN} = V_{(+)} - V_{(-)} = (E + V_{CM}) - V_{CM} = E + V_{CM} - V_{CM} = E$$

Άρα η τάση εξόδου του ενισχυτή οργανολογίας είναι

$$V_0 = E \cdot G + Vref \quad (3.3)$$

Πλέον μπορούμε να βρούμε την τάση αναφοράς του ΕΟ και το κέρδος του λύνοντας ένα σύστημα εξισώσεων με δύο αγνώστους, θεωρώντας πως η τάση εξόδου είναι ίση με 3V όταν το ηλεκτρόδιο είναι βυθισμένο σε διάλυμα με pH = 0 και 0.5V όταν είναι βυθισμένο σε διάλυμα με pH = 14. Έτσι λοιπόν έχουμε το παρακάτω σύστημα γραμμικών εξισώσεων.

$$3 = E_{(pH=0)} \cdot G + Vref$$

$$0.5 = E_{(pH=14)} \cdot G + Vref$$

Εφαρμόζοντας το παραπάνω σύστημα για διαφορά δυναμικού ηλεκτροδίου υπό θερμοκρασία 0°C έχουμε

$$3 = 379.3 \text{ mV} \cdot G + Vref$$

$$0.5 = -379.6 \text{ mV} \cdot G + Vref$$

Λύνοντας ως προς Vref

$$3 = 379.3 \text{ mV} \cdot G + Vref$$

$$Vref = 0.5 + 379.6 \text{ mV} \cdot G$$

Αντικαθιστώντας το Vref στην επάνω εξίσωση και λύνοντας ως προς G είναι

$$3 = 379.3 \text{ mV} \cdot G + 0.5 + 379.6 \text{ mV} \cdot G \Rightarrow$$

$$2.5 = 758.9 \text{ mV} \cdot G \Rightarrow G = \frac{2.5}{758.9 \text{ mV}} = 3.29$$

Αντικαθιστώντας το G στην εξίσωση $V_{ref} = 0.5 + 379.6 \text{ mV} \cdot G$ τότε η V_{ref} βγαίνει ίση με 1.75 V . Λύνοντας τελικά την εξίσωση $G = 1 + \frac{100k}{RG}$ η αντίσταση RG υπολογίζεται ίση με $43.6 \text{ k}\Omega$.

Αντίστοιχα λύνοντας το ίδιο σύστημα εξισώσεων για διαφορά δυναμικού ηλεκτροδίου υπό θερμοκρασία 100°C είναι

$$3 = 518.1 \text{ mV} \cdot G + V_{ref}$$

$$0.5 = -518.6 \text{ mV} \cdot G + V_{ref}$$

Με την τάση αναφοράς V_{ref} να είναι ίση με 1.75 V ενώ το κέρδος και η αντίσταση RG είναι 2.41 και $70.8 \text{ k}\Omega$ αντίστοιχα.

Από την παραπάνω ανάλυση εξάγουμε τα εξής δύο συμπεράσματα, πρώτον η τάση V_{ref} και στις δύο περιπτώσεις υπολογίστηκε 1.75 V και δεύτερον λόγω της αλλαγής της θερμοκρασίας το κέρδος θα πρέπει να είναι μεταβλητό έτσι ώστε να μπορούμε για κάθε θερμοκρασία να έχουμε αξιόπιστες μετρήσεις στην κλίμακα $\text{pH } 0 - 14$. Βλέπουμε πως για θερμοκρασία 0°C το κέρδος είναι 3.29 ενώ για θερμοκρασία 100°C το κέρδος είναι 2.41 .

Ονομάζουμε το κέρδος στους 0°C μέγιστο κέρδος και το κέρδος στους 100°C μέγιστο κέρδος αντίστοιχα οι αντιστάσεις RG θα ονομαστούν $RG(\text{min})=43.6 \text{ k}\Omega$ για το μέγιστο κέρδος και $RG(\text{max})=70.8 \text{ k}\Omega$ για το ελάχιστο κέρδος. Θέτουμε την $RG(\text{min})$ να είναι αμετάβλητη και θέτουμε ως $RG(\text{trim})$ την διαφορά μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης αντίστασης κέρδους, επομένως $RG(\text{trim}) = RG(\text{max}) - RG(\text{min}) = 70.8 \text{ k}\Omega - 43.6 \text{ k}\Omega = 27.2 \text{ k}\Omega$ πρακτικά αυτό σημαίνει πως για να έχουμε την επιθυμητή έξοδο για οποιαδήποτε θερμοκρασία μεταξύ 0 και 100°C η συνολική αντίσταση κέρδους του ενισχυτή οργανολογίας θα πρέπει να είναι άθροισμα της $RG(\text{min})$ και ενός ποσοστού της $RG(\text{trim})$. Στο κύκλωμα η $RG(\text{trim})$ θα είναι ένα ποτενσιόμετρο.

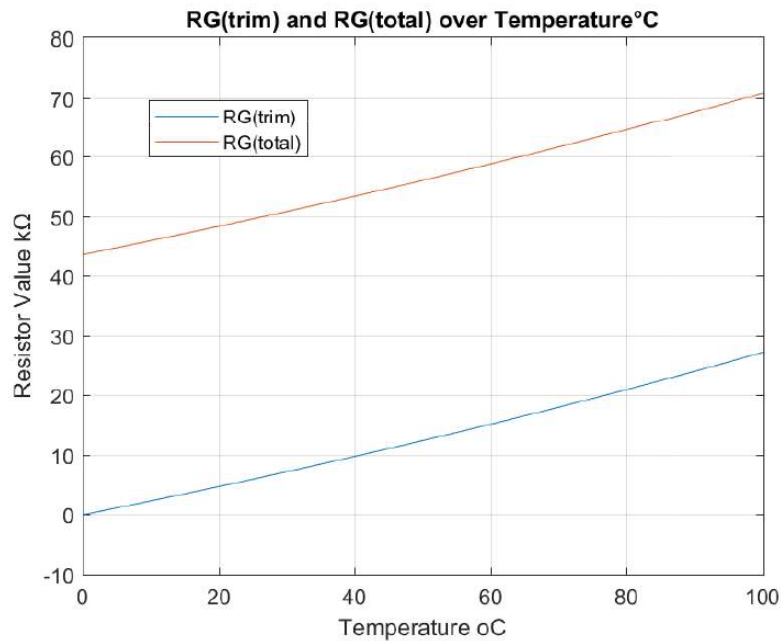
Η τιμή της $RG(\text{trim})$ μπορεί να υπολογιστεί μέσω της θερμοκρασίας και δίνεται στην παρακάτω εξίσωση

$$RG(\text{trim}) = 1 - \frac{100k}{\frac{3-V_{ref}}{E_0} - 1} - RG(\text{min}) \quad (3.4)$$

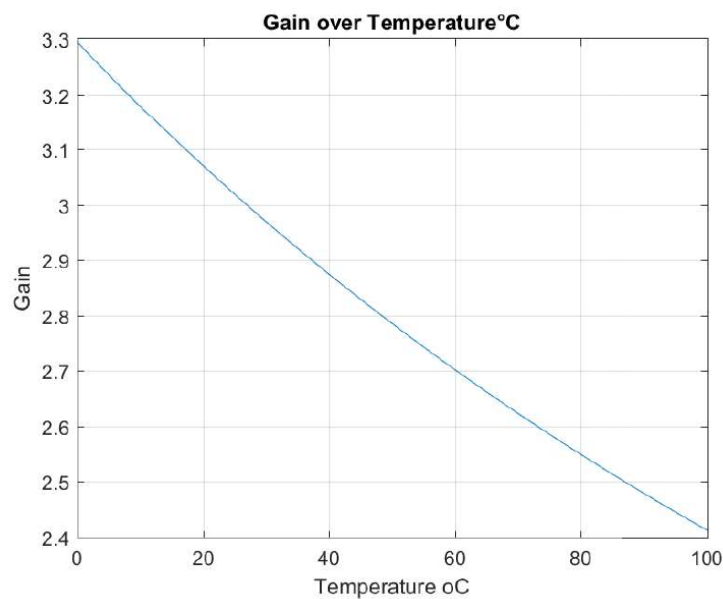
Υπολογίζοντας την τιμή της αντίστασης $RG(\text{trim})$ και την συνολική αντίσταση κέρδους $RG(\text{total})$ του ενισχυτή για θερμοκρασίες μεταξύ 0 και 100°C έχουμε

Πίνακας 3.3: Συνολική αντίσταση κέρδους, $RG(\text{trim})$ και κέρδος σε διάφορες θερμοκρασίες

Θερμοκρασία	0°C	25°C	50°C	80°C	100°C
$RG(\text{trim}) \text{ k}\Omega$	0	5.922	12.4	20.95	27.2
$RG(\text{total}) \text{ k}\Omega$	43.56	49.52	56	64.55	70.8
GAIN	3.296	3.019	2.786	2.549	2.412



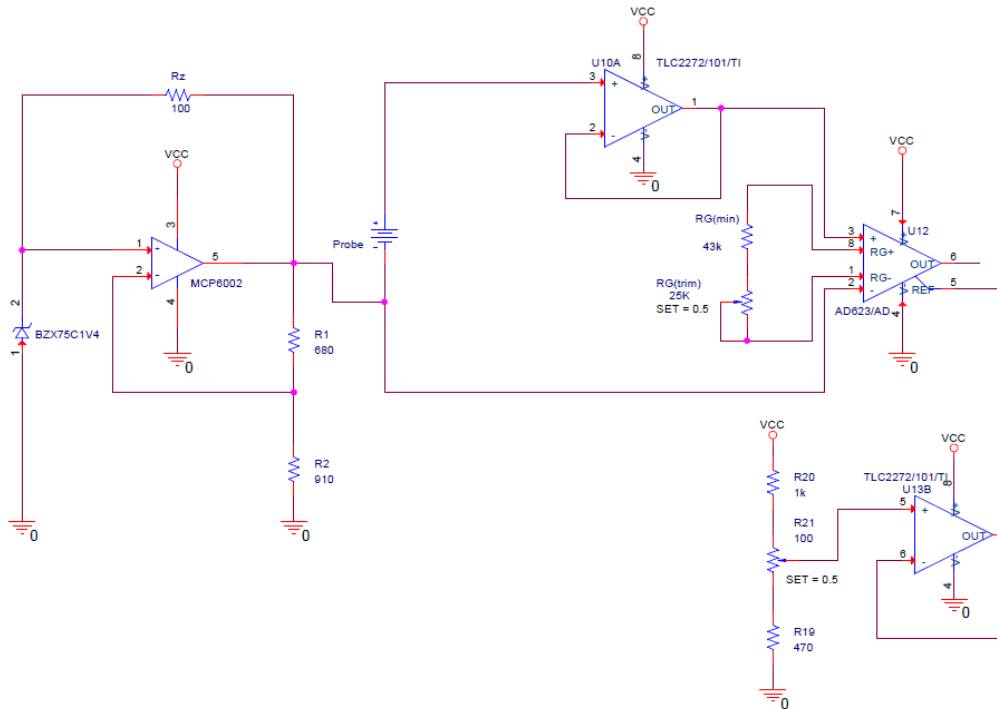
Διάγραμμα 3.2: Συνολική αντίσταση κέρδους και RG(trim) σε διάφορες θερμοκρασίες (γραφικά)



Διάγραμμα 3.3: Κέρδος σε διάφορες θερμοκρασίες (γραφικά)

Επιπλέον η τάση αναφοράς V_{ref} δίνεται μέσω ενός διαιρέτη τάσης με δύο αντιστάσεις και ένα ποτενσιόμετρο και λαμβάνεται από τη μεσαία λήψη και παρέχεται μέσω ενός voltage buffer στον ενισχυτή οργανολογίας. Το τελικό κύκλωμα διαφέρει με το θεωρητικό και αυτό γιατί στη διάθεσή μας είχαμε ένα ποτενσιόμετρο των $25k\Omega$ και μία αντίσταση των $43k\Omega$. Οι τιμές αυτές δεν επηρεάζουν τη λειτουργία αλλά επιβάλλουν έναν περιορισμό, επιτρέπουν στο κύκλωμα να κάνει μετρήσεις μέχρι τους $90^{\circ}C$. Ο περιορισμός αυτός δεν αποτελεί πρόβλημα καθώς το ηλεκτρόδιο που χρησιμοποιούμε μπορεί να λειτουργήσει μέχρι τους $80^{\circ}C$. Το τελικό κύκλωμα είναι το παρακάτω.

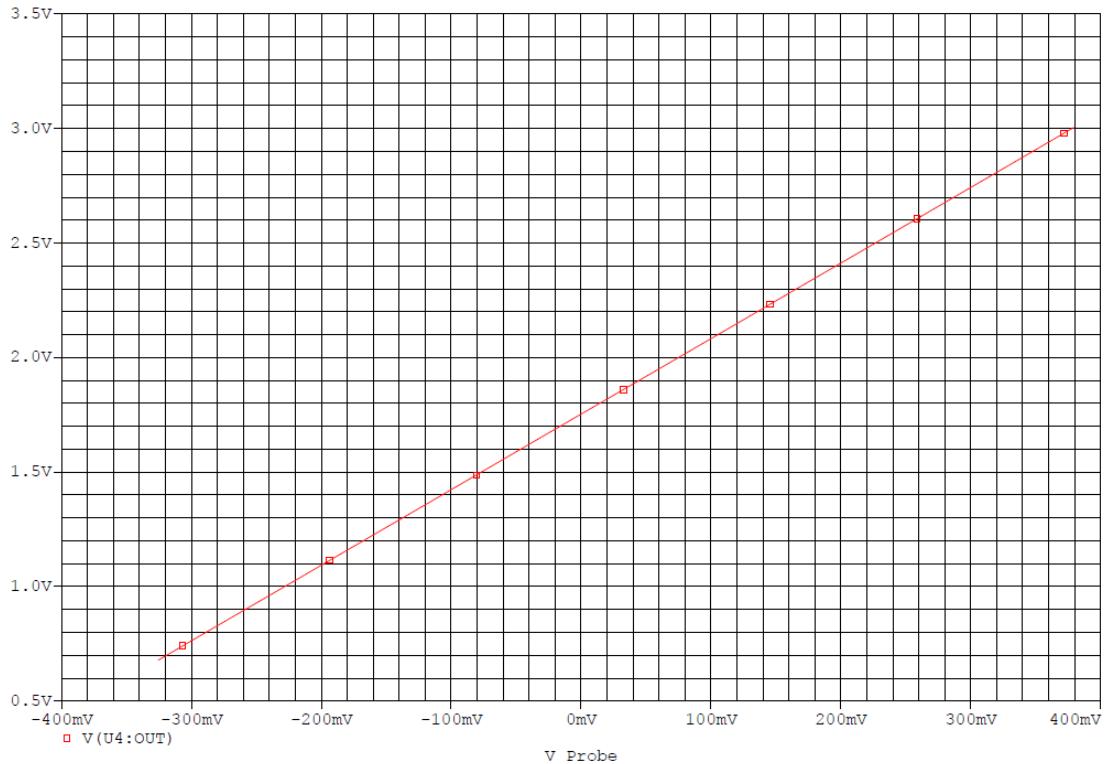
Αναλογικά κυκλώματα για την επεξεργασία σήματος του ηλεκτροδίου



Κύκλωμα 3.6: Τελικό κύκλωμα

3.6 Προσομοίωση και μετρήσεις

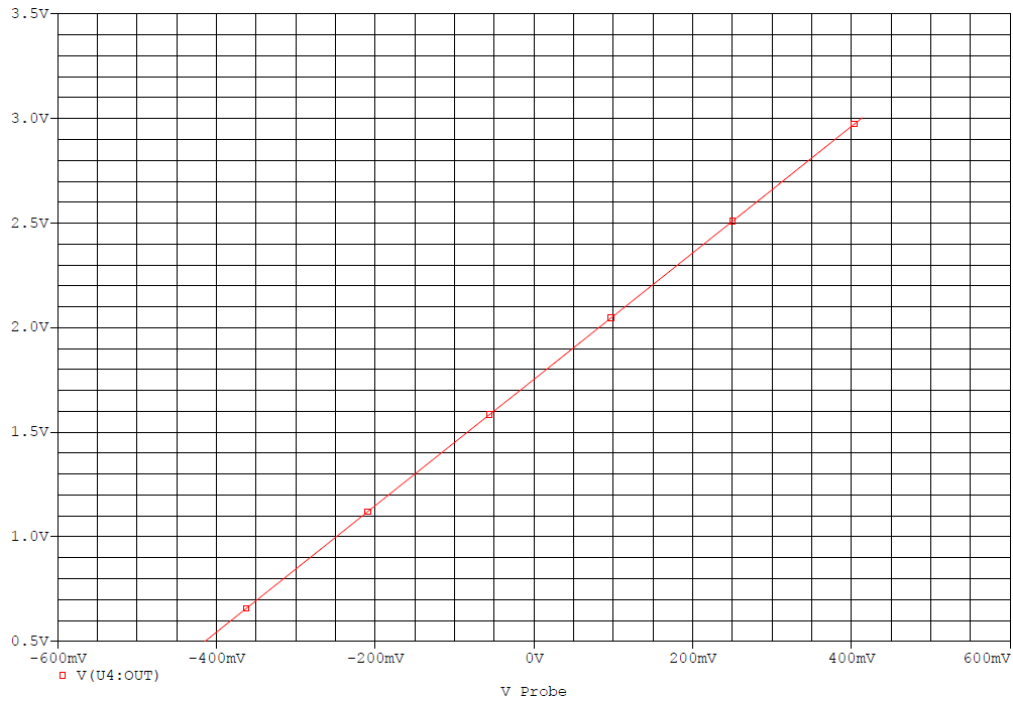
Η προσομοίωση και οι μετρήσεις θα γίνουν για θερμοκρασίες 0, 25, 50 και 80°C. Για θερμοκρασία 0°C το ηλεκτρόδιο εμφανίζει διαφορά δυναμικού ίση με 379.3mV έως -379.6mV με διαφορά μεταξύ κάθε τιμής pH ίση με 54.21 mV/pH και ορίζοντας την RG(trim) ίση με 0kΩ η έξοδος του κυκλώματος στην προσομοίωση είναι η παρακάτω.



Διάγραμμα 3.4: Έξοδος κυκλώματος για 0°C

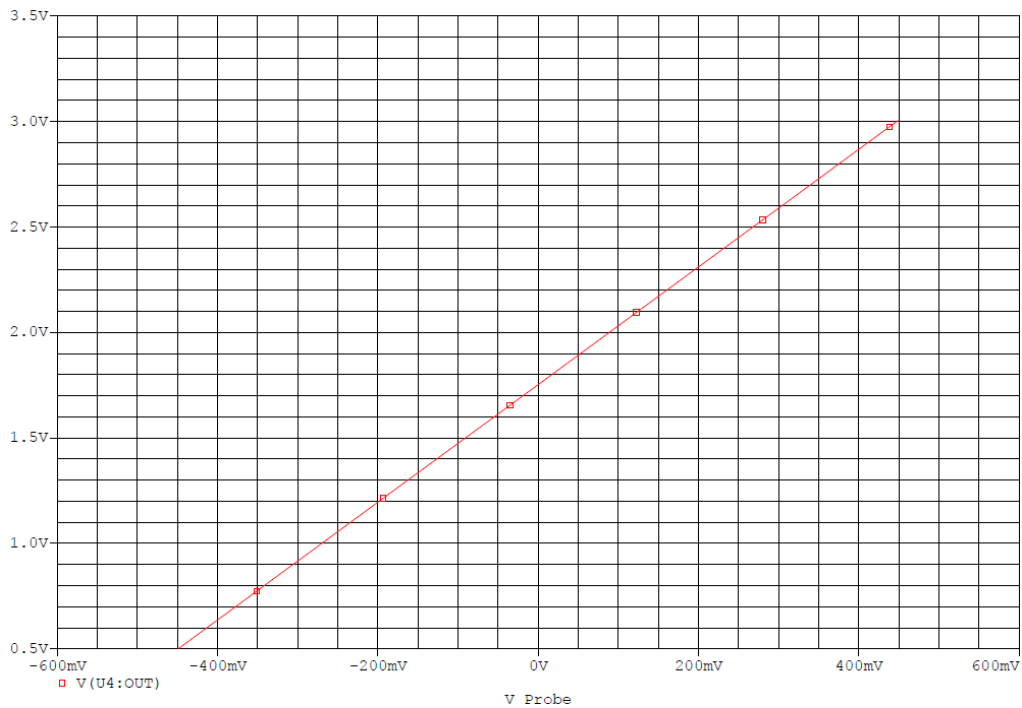
Κεφάλαιο 3

Για θερμοκρασία 25°C η διαφορά δυναμικού είναι ίση με 414mV έως -414.4mV διαφορά μεταξύ κάθε τιμής pH ίση με 59.17 mV/pH και ορίζοντας την RG(trim) ίση με 5.92kΩ η έξοδος του κυκλώματος στην προσομοίωση είναι η παρακάτω.



Διάγραμμα 3.5: Έξοδος κυκλώματος για 25°C

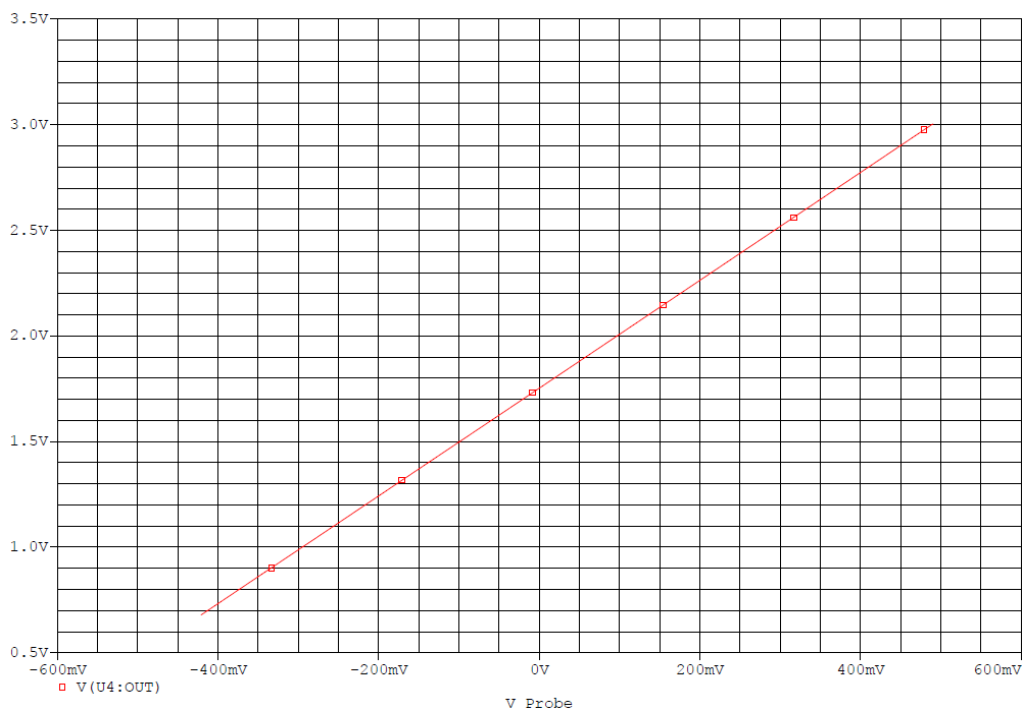
Για θερμοκρασία 50°C η διαφορά δυναμικού είναι ίση με 448.7mV έως -449.1mV διαφορά μεταξύ κάθε τιμής pH ίση με 64.13 mV/pH και ορίζοντας την RG(trim) ίση με 12.4kΩ η έξοδος του κυκλώματος στην προσομοίωση είναι η παρακάτω.



Διάγραμμα 3.6: Έξοδος κυκλώματος για 50°C

Αναλογικά κυκλώματα για την επεξεργασία
σήματος του ηλεκτροδίου

Για θερμοκρασία 80°C η διαφορά δυναμικού είναι ίση με 490.4mV έως -490.8mV διαφορά μεταξύ κάθε τιμής pH ίση με 70.09 mV/pH και ορίζοντας την RG(trim) ίση με 12.4kΩ η έξοδος του κυκλώματος στην προσομοίωση είναι η παρακάτω.



Διάγραμμα 3.7: Έξοδος κυκλώματος για 80°C

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις για τιμές pH 0, 4, 7, 9, 14 επιπλέον δίνονται οι αντίστοιχες τιμές της διαφοράς δυναμικού για θερμοκρασίες 0, 25, 50 και 80°C όπως και η έξοδος του κυκλώματος σε σχέση με τις αντίστοιχες της προσομοίωσης.

Πίνακας 3.4: Πειραματικές μετρήσεις και προσομοίωση για 0°C

pH	0	4	7	9	14	0°C
E(mV)	379.3	162.5	0	-108.6	-397.6	
Vo (Pspice)	3.00	2.29	1.75	1.39	0.478	
Vo(Πείραμα)	3.01	2.28	1.75	1.39	0.502	

Πίνακας 3.5: Πειραματικές μετρήσεις και προσομοίωση για 25°C

pH	0	4	7	9	14	25°C
E(mV)	414	177.3	0	-118.5	-414.4	
Vo (Pspice)	3.00	2.28	1.74	1.39	0.678	
Vo(Πείραμα)	2.99	2.27	1.75	1.394	0.500	

Κεφάλαιο 3

Πίνακας 3.6: Πειραματικές μετρήσεις και προσομοίωση για 50°C

pH	0	4	7	9	14	50°C
E(mV)	448.7	192.5	0	-128.5	-449.1	
V _o (Pspice)	3.00	2.28	1.75	1.39	0.501	
V _o (Πείραμα)	2.99	2.28	1.75	1.39	0.502	

Πίνακας 3.7: Πειραματικές μετρήσεις και προσομοίωση για 80°C

pH	0	4	7	9	14	80°C
E(mV)	490.4	210	0	-140.4	-490.8	
V _o (Pspice)	3.00	2.28	1.75	1.39	0.679	
V _o (Πείραμα)	3.00	2.29	1.75	1.39	0.510	

Κεφάλαιο 4 - Επίδραση θερμοκρασίας και κυκλώματα

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξεταστεί η επίδραση θερμοκρασίας στη μέτρηση pH και η κατασκευή κυκλώματος για τη μέτρησή της, έτσι ώστε οι μετρήσεις του οργάνου να μην επηρεάζονται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας που μπορεί να υπάρχουν στο μετρούμενο διάλυμα.

4.2 Η αναγκαιότητα της μέτρησης θερμοκρασίας

Όπως είδαμε και στα κεφάλαια 2 και 3 η θερμοκρασία έχει σημαντική επίδραση στη μέτρηση pH καθώς επηρεάζει την διαφορά δυναμικού που παράγεται από το ηλεκτρόδιο αλλά έμμεσα επηρεάζεται και η αντίσταση κέρδους του ενισχυτή έτσι ώστε να έχουμε το επιθυμητό κέρδος για κάθε τιμή θερμοκρασίας. Σε επόμενο κεφάλαιο θα δούμε το πως συνδυάζεται η θερμοκρασία με την έξοδο του κυκλώματος του ηλεκτροδίου έτσι ώστε να υπολογιστεί η τιμή του pH. Στο κεφάλαιο αυτό εστιάζουμε στη σχεδίαση ενός κυκλώματος θερμοκρασίας που θα μας βοηθήσει στην μετέπειτα επεξεργασία της απόκρισης του ενισχυτή ηλεκτροδίου για την εξαγωγή της τιμής του pH.

4.3 Χαρακτηριστικά κυκλώματος

Το κύκλωμα μέτρησης θερμοκρασίας θέλουμε να έχει εύρος τάσεων εξόδου από 0.5V έως 3V όπως και στο κύκλωμα ηλεκτροδίου. Η τάση τροφοδοσίας του κυκλώματος θα είναι μονοπολική και ίση με 5V. Ενώ και σ'αυτή την περίπτωση θα χρησιμοποιηθεί ολοκληρωμένο κύκλωμα ενισχυτή οργανολογίας AD623.

4.3.1 Αισθητήριο θερμοκρασίας

Για τη μέτρηση θερμοκρασίας επιλέχθηκε το αισθητήριο pt100 που ανήκει στην οικογένεια των RTD (Resistive Temperature Detectors). Το pt100 είναι στην πραγματικότητα μία μεταβλητή αντίσταση που η τιμή της αλλάζει συναρτήσει της θερμοκρασίας. Η ονομασία του αισθητήρα υποδηλώνει το υλικό κατασκευής του και την αντίστασή του σε μία θερμοκρασία αναφοράς. Στην προκειμένη περίπτωση το "Pt" δηλώνει το υλικό κατασκευής του αισθητηρίου που είναι πλατίνα (Platinum => Pt), ενώ το 100 είναι η ωμική του αντίσταση σε θερμοκρασία αναφοράς, δηλαδή στους 0°C η αντίσταση είναι ίση με 100Ω. Η αντίσταση του αισθητήρα για διάφορες θερμοκρασίες υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση

$$R(T) = R(T_0) \cdot (1 + a \cdot \Delta T) \quad (4.1)$$

Όπου

$R(T)$: Η αντίστασή του στη μετρούμενη θερμοκρασία (Ω)

$R(T_0)$: Η αντίστασή του σε θερμοκρασία αναφοράς, 100Ω στους 0°C

a : Συντελεστής θερμοκρασίας, που εξαρτάται από το υλικό κατασκευής 0.00385(Ω/°C)

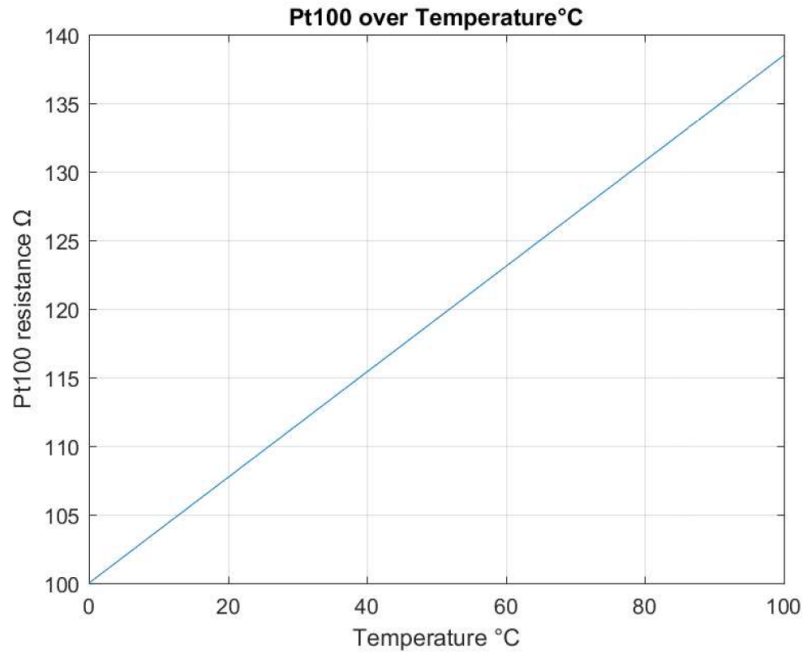
ΔT : Διαφορά μεταξύ μετρούμενης θερμοκρασίας και θερμοκρασίας αναφοράς

Αντικαθιστώντας τα παραπάνω δεδομένα, η εξίσωση γίνεται

$$R(T) = 100 \cdot (1 + 0.00385 \cdot (T - T_0)) = 100 \cdot (1 + 0.00385 \cdot T)$$

Κεφάλαιο 4

Λύνοντας την εξίσωση υπολογιστικά για θερμοκρασίες από 0 έως 100°C βρίσκουμε την αντίσταση του αισθητηρίου.



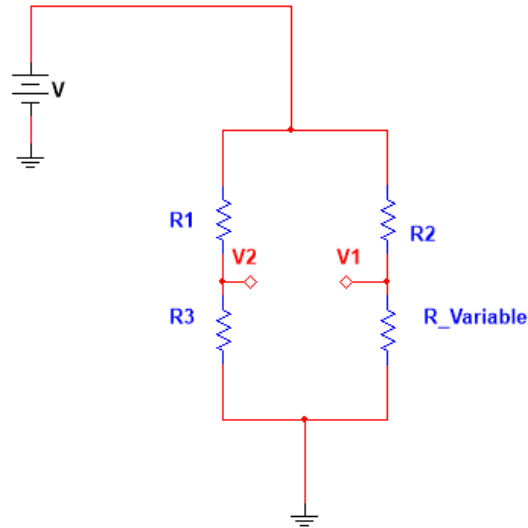
Διάγραμμα 4.1: Αντίσταση Pt100 για θερμοκρασίες 0 έως 100°C (γραφικά)

Πίνακας 4.1: Αντίσταση Pt100 για θερμοκρασίες 0 έως 100°C

Temp (°C)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Pt100 (Ω)	100	103.8	107.7	111.6	115.4	119.2	123.1	127	130.8	134.7	138.5

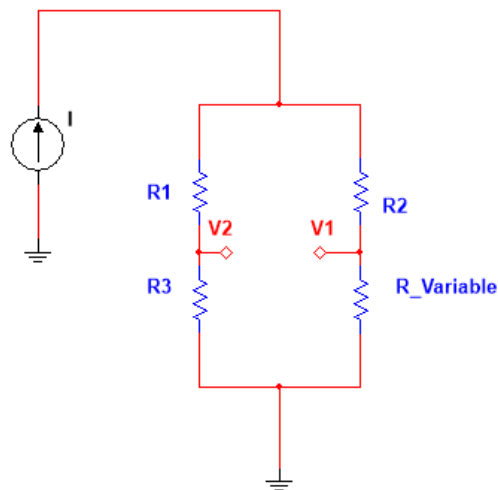
4.3.2 Κύκλωμα προσαρμογής

Αφού πλέον γνωρίζουμε τον τρόπο που μεταβάλλεται η αντίσταση του Pt100 και τις τιμές που παίρνει, το επόμενο βήμα είναι η σχεδίαση ενός κυκλώματος που θα παρέχει στον ενισχυτή οργανολογίας το επιθυμητό σήμα για επεξεργασία. Ένας τρόπος για να το πετύχουμε αυτό είναι με τη χρήση μια DC γέφυρας Wheatstone $\frac{1}{4}$ στην οποία η μεταβλητή αντίσταση θα βρίσκεται στο κάτω μέρος του δεξιού κλάδου. Η έξοδος της γέφυρας είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ των τάσεων V1 και V2 όπου η κάθε μία υπολογίζεται μέσω διαιρέτη τάσης. Το κύκλωμα φαίνεται παρακάτω.



Κύκλωμα 4.1: Γέφυρα Wheatstone $\frac{1}{4}$ τροφοδοτούμενη από πηγή τάσης αναφοράς

Στο πραγματικό κύκλωμα δεν χρησιμοποιήθηκε πηγή τάσης αναφοράς αλλά πηγή ρεύματος αναφοράς καθώς πειραματικά το παραπάνω κύκλωμα δεν λειτουργούσε, παρουσία του αισθητηρίου.



Κύκλωμα 4.2: Γέφυρα Wheatstone $\frac{1}{4}$ τροφοδοτούμενη από πηγή ρεύματος αναφοράς

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω τοπολογία πάλι στην είσοδο του ενισχυτή οργανολογίας λαμβάνεται η διαφορά τάσης μεταξύ του δεξιού και του αριστερού κλάδου, όμως στην περίπτωση αυτή ο υπολογισμός των τάσεων $V1$ και $V2$ είναι διαφορετικός σε σχέση με την γέφυρα όταν είναι τροφοδοτούμενη από πηγή τάσης αναφοράς. Για τον υπολογισμό της διαφοράς μεταξύ των τάσεων $V1$ και $V2$ ακολουθούμε τα εξής βήματα. Θέτουμε $R1=R2=R3=R$ και την $R_Variable$ ίση με RTD . Η διαφορική τάση εξόδου της γέφυρας υπολογίζεται ως $\Delta V = V1 - V2$, οι τάσεις $V1$ και $V2$ υπολογίζονται ως $V1 = I_{RTD} \cdot RTD$ και $V2 = I_{R2} \cdot R2$. Τα ρεύματα I_{RTD} και I_{R2} υπολογίζονται ως εξής

$$I_{RTD} = I \cdot \left(\frac{2R}{3R+RTD} \right)$$

$$I_{R2} = I \cdot \left(\frac{R+RTD}{3R+RTD} \right)$$

Αντικαθιστώντας τα ρεύματα στις αντίστοιχες μεταβλητές, οι τάσεις V1 και V2 είναι

$$V1 = I \cdot \left(\frac{2R}{3R+RTD} \right) \cdot RTD$$

$$V2 = I \cdot \left(\frac{R+RTD}{3R+RTD} \right) \cdot RTD$$

Εφαρμόζοντας τις τάσεις V1 και V2 στην εξίσωση της διαφοράς είναι

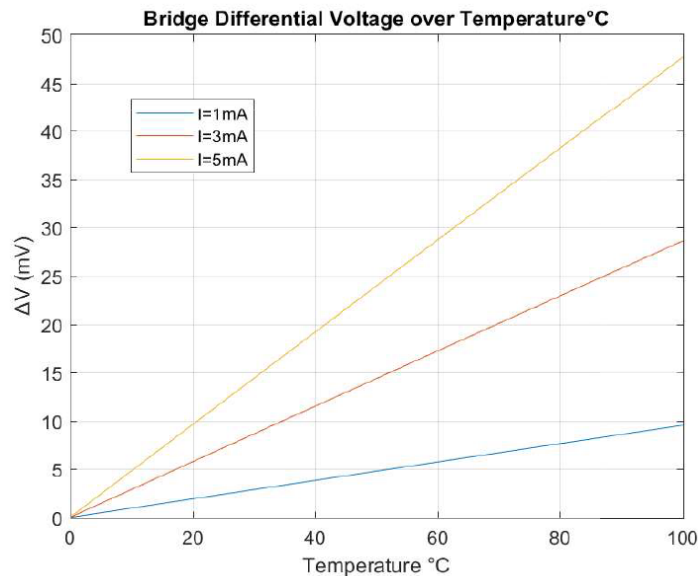
$$\Delta V = V1 - V2 = I \cdot RTD \cdot \left(\frac{2R-R-RTD}{3R+RTD} \right) = I \cdot RTD \cdot \left(\frac{R-RTD}{3R+RTD} \right) \Rightarrow$$

$$\Delta V = \frac{I \cdot RTD \cdot R - I \cdot RTD^2}{3R+RTD}$$

Επιλέγοντας τις αντιστάσεις R=1.1kΩ και την RTD να αποτελείται από μία αντίσταση του 1kΩ σε σειρά με το Pt100 η εξίσωση παίρνει την τελική μορφή

$$\Delta V = \frac{I \cdot RTD \cdot 1.1k - I \cdot RTD^2}{3.3k + RTD} \quad (4.2)$$

Λύνοντας την παραπάνω εξίσωση για ρεύματα με τιμή 1, 3 και 5mA με την RTD να αλλάζει σύμφωνα με τη θερμοκρασία όπως το Pt100 έχουμε.



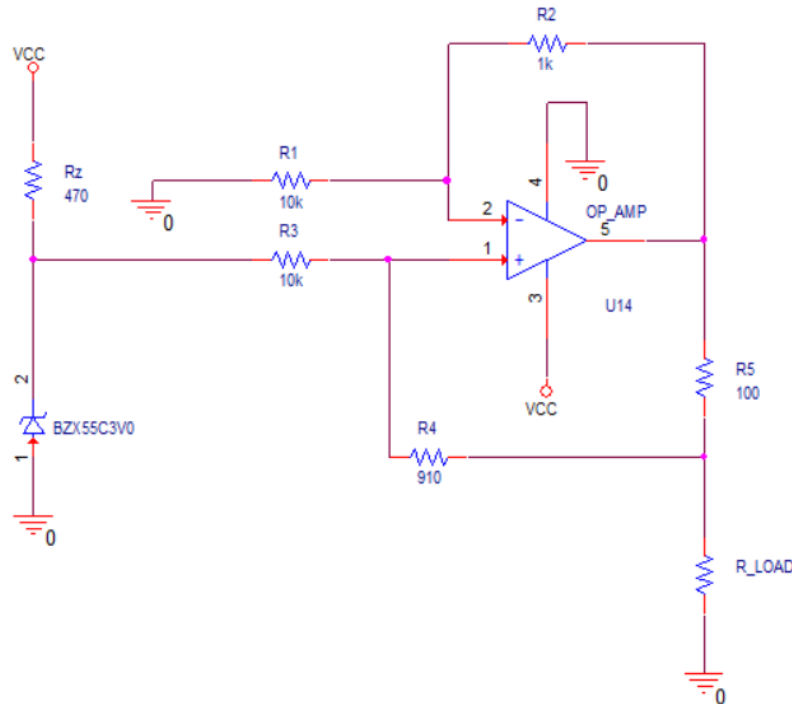
Διάγραμμα 4.2: Διαφορική τάση εξόδου γέφυρας τροφοδοτούμενη από σταθερό ρεύμα έντασης 1, 3 και 5mA (γραφικά)

Πίνακας 4.2: Διαφορική τάση εξόδου γέφυρας τροφοδοτούμενη από σταθερό ρεύμα έντασης 1, 3 και 5mA

	Temp°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
I	1 mA	0	0.9617	1.922	2.88	3.83	4.79	5.74	6.69	7.64	8.59	9.54	ΔV (mV)
	3 mA	0	2.88	5.76	8.64	11.51	14.37	17.23	20.09	22.94	25.78	28.62	
	5 mA	0	4.80	9.60	14.4	19.18	23.96	28.72	33.48	38.23	42.97	47.71	

4.3.3 Πηγή ρεύματος αναφοράς

Γνωρίζοντας πλέον τη συμπεριφορά του αισθητηρίου και της γέφυρας συναρτήσει της θερμοκρασίας και του ρεύματος αναφοράς, το επόμενο βήμα στη σχεδίαση είναι η επιλογή του ρεύματος και το κύκλωμα που θα μας παρέχει το ρεύμα αυτό. Το ρεύμα αναφοράς επιλέχθηκε να έχει ένταση ίση με 3mA ενώ το κύκλωμα επιλέχθηκε να είναι πηγή ρεύματος Howland σχεδιασμένη έτσι ώστε να παρέχει ρεύμα ίσο με το 0.1% της τάσης που δέχεται στην είσοδό της. Το κύκλωμα της πηγής που σχεδιάσαμε είναι το παρακάτω.



Κύκλωμα 4.3: Πηγή ρεύματος Howland με γειωμένο φορτίο

Η τάση αναφοράς που μέσω αυτής υπολογίζεται το ρεύμα αναφοράς είναι η τάση της διόδου zener BZX55C3V0, η διόδος αυτή έχει τάση zener ίση με 3V και μέγιστη ισχύ ίση με 0.5W. Μέσω των δεδομένων αυτών υπολογίζουμε τα ρεύματα $I_{Z(MAX)}$ και I_{ZT} . Το ρεύμα $I_{Z(MAX)}$ υπολογίζεται ίσο με 166.6mA ενώ το ρεύμα I_{ZT} υπολογίζεται ίσο με 16.66mA. Χρησιμοποιώντας το ρεύμα I_{ZT} υπολογίζουμε την αντίσταση R_z ίση με 120Ω. Μέσω των πειραματικών μετρήσεων η τάση V_z μετρήθηκε ίση με 3.43V ενώ το ρεύμα ανάστροφης πόλωσης I_z ίσο με 13.3mA. Κάνοντας παρόμοιες αλλαγές όπως στην πηγή τάσης αναφοράς στο κεφάλαιο 3, καταλήξαμε στη χρήση μια αντίστασης των 470Ω για την ανάστροφη πόλωση της διόδου. Στην περίπτωση αυτή η τάση V_z μετρήθηκε 3,05V και το ρεύμα ανάστροφης πόλωσης I_z ίσο με 4.64mA. Τα πειραματικά δεδομένα σε σχέση με τα θεωρητικά δεδομένα και της προσομοίωσης παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.3: V_z και I_z διόδου για αντίσταση 470Ω

	Θεωρητικά	Προσομοίωση	Πειραματικά
V_z (V)	3.00	3.00	3.05
I_z (mA)	4.25	4.25	4.64

Το κύκλωμα της πηγής ρεύματος Howland περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις

$$I_{Ref} = \frac{GAIN \cdot (V(+)) - V(-)}{R5}$$

Όπου

$$GAIN = \frac{R4+R5}{R3}$$

Η τάση $V(-)$ είναι ίση με 0V επομένως η εξίσωση του ρεύματος αναφοράς γίνεται

$$I_{Ref} = \frac{\frac{R4+R5}{R3} \cdot V(+)}{R5} \quad (4.3)$$

Απλοποιώντας την εξίσωση, το ρεύμα αναφοράς γίνεται ίσο με

$$I_{Ref} = \frac{(R4+R5)}{R3 \cdot R5} \cdot V(+)$$

Λόγω του ότι πρέπει να ισχύει $R1=R3$ και $R2=R4+R5$ με $R5 \ll R4$ η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφεί ως

$$I_{Ref} = \frac{R2}{R3 \cdot R5} \cdot V(+)$$

Εφαρμόζοντας τις τιμές των αντιστάσεων στην εξίσωση έχουμε

$$I_{Ref} = \frac{V(+)}{1000}$$

Λόγω όμως του ότι $R2 = 1k\Omega$ και $R4+R5=1.01k\Omega$ το ρεύμα είναι

$$I_{Ref} = \frac{V(+)}{1010}$$

Γενικά το παραπάνω κύκλωμα έχει τη δυνατότητα να μας παρέχει ρεύμα σταθερής έντασης συναρτήσει της διαφορικής τάσης εισόδου $\Delta V = V(+)) - V(-)$.

Πλέον γνωρίζουμε την τάση αναφοράς του κυκλώματος και πως υπολογίζεται το ρεύμα αναφοράς του. Εφαρμόζοντας την τάση V_z στην εξίσωση του ρεύματος έχουμε

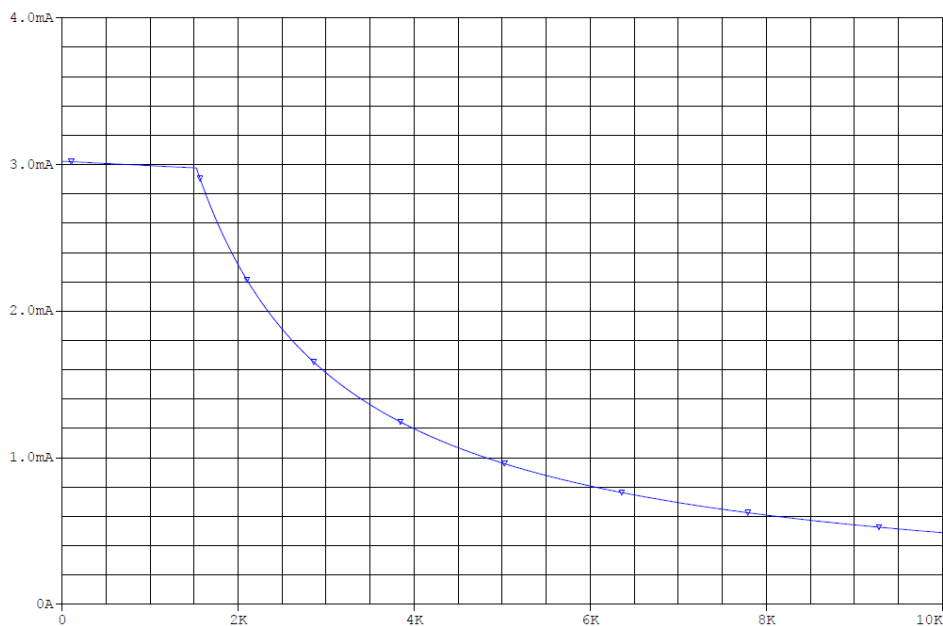
$$I_{Ref} = \frac{3V}{1010} = 2.97mA$$

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται το ρεύμα αναφοράς του κυκλώματος μετά από πειραματικές μετρήσεις και προσομοίωση σε σχέση με το θεωρητικό

Πίνακας 4.4: Ρεύμα αναφοράς για τάση εισόδου αναφοράς 3V

	Θεωρητικά	Προσομοίωση	Πειραματικά
I_{Ref} (mA)	2.97	2.98	3.04

Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημάνουμε το γεγονός πως το ρεύμα αναφοράς επηρεάζεται και από την αντίσταση φορτίου καθώς όσο αυτή αυξάνεται το ρεύμα μειώνεται, μελετώντας την συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος μπορούμε να διαπιστώσουμε πως από ένα σημείο και μετά το ρεύμα αναφοράς μειώνεται.



Διάγραμμα 4.3: Συνάρτηση μεταφοράς πηγής ρεύματος Howland

Μέσω της συνάρτησης μεταφοράς βλέπουμε πως το ρεύμα αναφοράς μειώνεται όταν η αντίσταση φορτίου λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες του 1.52kΩ. Χρησιμοποιώντας τη γέφυρα Wheatstone και τροφοδοτώντας τη με το ρεύμα της πηγής πρέπει να γνωρίζουμε την επίδραση της συνολικής αντίστασης της γέφυρας στο ρεύμα που παρέχεται από την πηγή. Η γέφυρα μπορεί να απλοποιηθεί σε ένα ισοδύναμο κύκλωμα όπου η αντίστασή του θα υπολογίζεται λόγω της παραλληλίας των κλάδων της γέφυρας. Υπολογίζοντας λοιπόν την ισοδύναμη αντίσταση βλέπουμε πως η συνολική αντίσταση της γέφυρας μεταβάλλεται από 1.1kΩ σε 1.11kΩ λόγω της μεταβολής του Pt100. Εξετάζοντας τη συνάρτηση μεταφοράς της πηγής συμπεραίνουμε πως το ρεύμα αναφοράς δεν επηρεάζεται καθώς για τις τιμές αυτές παραμένει σταθερό και ίσο με 2.98mA.

4.4 Σύνδεση με τον ενισχυτή οργανολογίας

Γνωρίζοντας πλέον τη διαφορική τάση της γέφυρας συναρτήσει της μεταβολής του Pt100 μπορούμε να προχωρήσουμε στη σχεδίαση του κυκλώματος με τον ενισχυτή οργανολογίας. Η τάση V1 από τον δεξί κλάδο θα λαμβάνεται στην V(+) είσοδο του AD623 ενώ η τάση V2 από τον αριστερό κλάδο θα λαμβάνεται στην V(-) είσοδο του ολοκληρωμένου κυκλώματος. Όπως και στο κεφάλαιο 3 η τάση εξόδου του ενισχυτή οργανολογίας περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$V_0 = G \cdot \Delta V + V_{Ref}$$

Γνωρίζοντας το ότι η έξοδος του ενισχυτή θέλουμε να κυμαίνεται μεταξύ 0.5 και 3V μπορούμε να υπολογίσουμε το κέρδος και την τάση αναφοράς του ενισχυτή μέσω ενός συστήματος γραμμικών εξισώσεων με δύο αγνώστους. Στην προκειμένη περίπτωση έχουμε

$$\begin{aligned} 3V &= G \cdot \Delta V_{100^\circ C} + V_{Ref} \\ 0.5V &= G \cdot \Delta V_{0^\circ C} + V_{Ref} \end{aligned}$$

Από την κάτω εξίσωση εύκολα συμπεραίνουμε ότι η τάση V_{Ref} είναι ίση με 0.5V λόγω του ότι για θερμοκρασία 0°C η διαφορική τάση της γέφυρας είναι ίση με 0mV. Αντικαθιστώντας την τάση V_{Ref} στην πάνω εξίσωση υπολογίζουμε το κέρδος του ενισχυτή να είναι

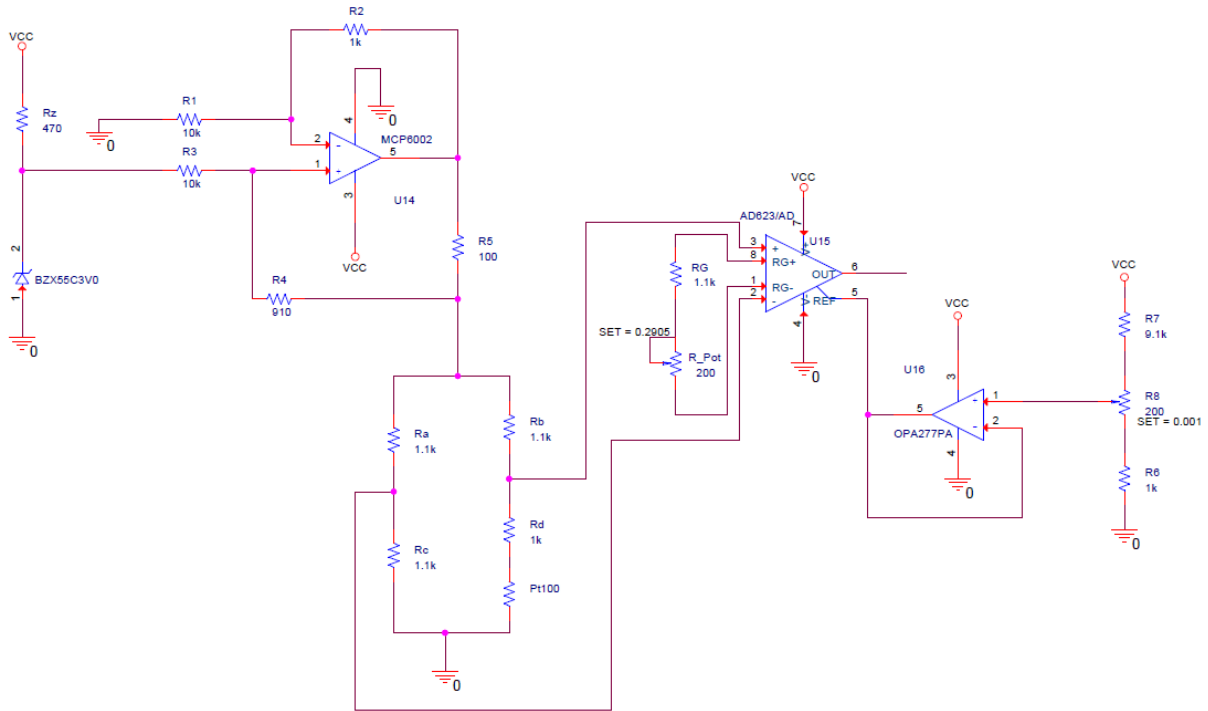
$$G = \frac{3V - V_{Ref}}{\Delta V_{100^\circ C}} = \frac{2.5V}{28.62mV} = 87.35$$

Λύνοντας την εξίσωση για το κέρδος του ενισχυτή, η αντίσταση κέρδους υπολογίζεται ως

$$RG = \frac{100k}{G-1} = \frac{100k}{86.35} = 1.158k\Omega$$

Έχοντας στη διάθεσή μας αντιστάσεις με ονομαστική τιμή 1.1kΩ συνδέσαμε και ένα ποτενσιόμετρο 200Ω σε σειρά με την RG όπως κάναμε στο κύκλωμα του ηλεκτροδίου στο κεφάλαιο 3 για να ρυθμιστεί με ακρίβεια το κέρδος του ενισχυτή. Επιπλέον με το ποτενσιόμετρο ρυθμίζουμε το κέρδος όχι μόνο για να πετύχουμε την θεωρητική τιμή κέρδους αλλά μας δίνει και τη δυνατότητα να ρυθμίσουμε την έξοδο του κυκλώματος, λόγω του σφάλματος που δημιουργείται στη γέφυρα από τις ανοχές των αντιστάσεών της. Τέλος, η τάση αναφοράς του ενισχυτή λαμβάνεται μέσω ενός voltage buffer από ένα διαιρέτη τάσης που σχηματίζουν δύο αντιστάσεις με τιμές 9.1kΩ και 1kΩ με ένα ποτενσιόμετρο 200Ω ενδιάμεσα για την ρύθμιση της τάσης αυτής.

Έχοντας υπολογίσει τα χαρακτηριστικά του κυκλώματος πλέον μπορούμε να προσομοιώσουμε τη λειτουργία του και να το εξετάσουμε πειραματικά. Το τελικό κύκλωμα μέτρησης θερμοκρασίας είναι το παρακάτω.



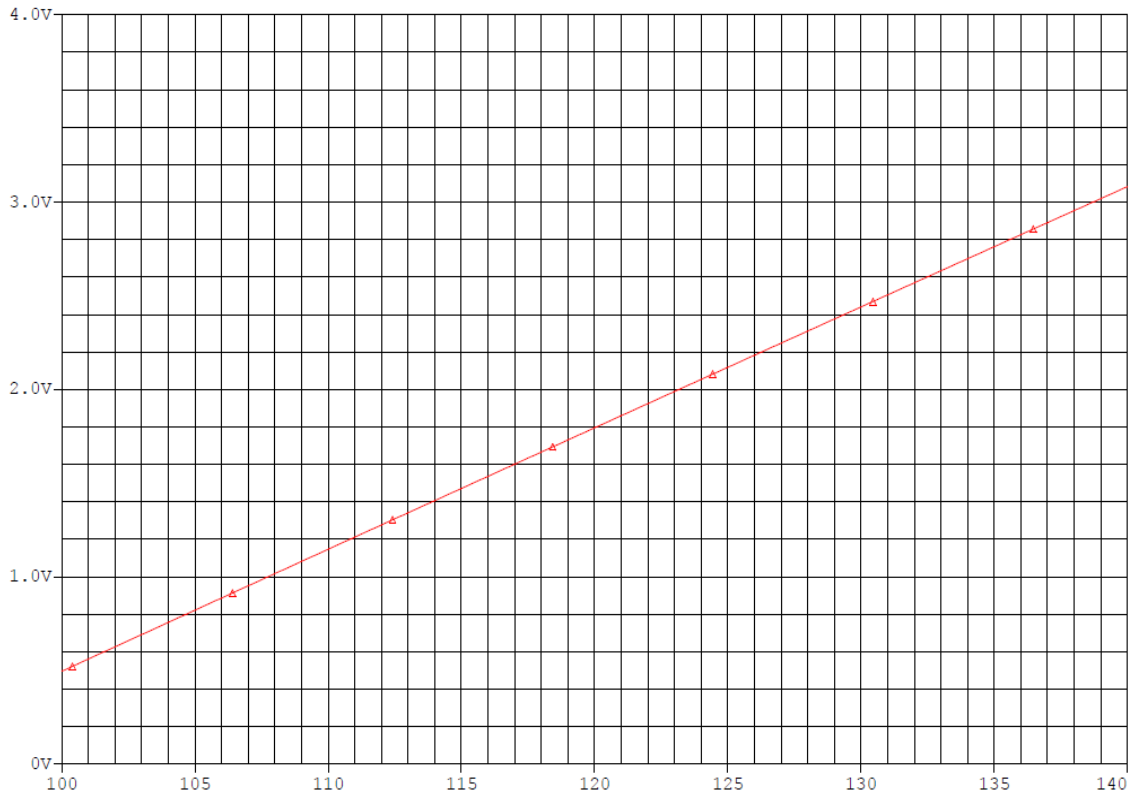
Κύκλωμα 4.4: Κύκλωμα μέτρησης θερμοκρασίας

Προσομοιώνοντας το κύκλωμα για αντίσταση Pt100 που αντιστοιχεί σε θερμοκρασίες από 0°C έως 100°C η διαφορική τάση της γέφυρας και η έξοδος του κυκλώματος είναι οι παρακάτω.



Διάγραμμα 4.4: Διαφορική τάση γέφυρας συναρτήσει της αντίστασης Pt100

Κεφάλαιο 4



Διάγραμμα 4.5: Τάση εξόδου κυκλώματος συναρτήσει της αντίστασης Pt100

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι μετρήσεις για πέντε τιμές αντιστάσεων 100, 110, 120, 130, 140Ω σε σχέση με τη θεωρία και την προσομοίωση.

Πίνακας 4.5: Διαφορική τάση γέφυρας και τάση εξόδου ενισχυτή για Pt100 = 100Ω

	Θεωρητικά	Προσομοίωση	Πείραμα	Pt100 = 100Ω T = 0°C
ΔV (mV)	0	0	0	
V_o (V)	0.5	0.496	0.502	

Πίνακας 4.6: Διαφορική τάση γέφυρας και τάση εξόδου ενισχυτή για Pt100 = 110Ω

	Θεωρητικά	Προσομοίωση	Πείραμα	Pt100 = 110Ω T = 26°C
ΔV (mV)	7.49	7.45	7.18	
V_o (V)	1.15	1.14	1.13	

Πίνακας 4.7: Διαφορική τάση γέφυρας και τάση εξόδου ενισχυτή για Pt100 = 120Ω

	Θεωρητικά	Προσομοίωση	Πείραμα	Pt100 = 120Ω T = 52°C
ΔV (mV)	14.95	14.90	13.7	
V_o (V)	1.80	1.79	1.70	

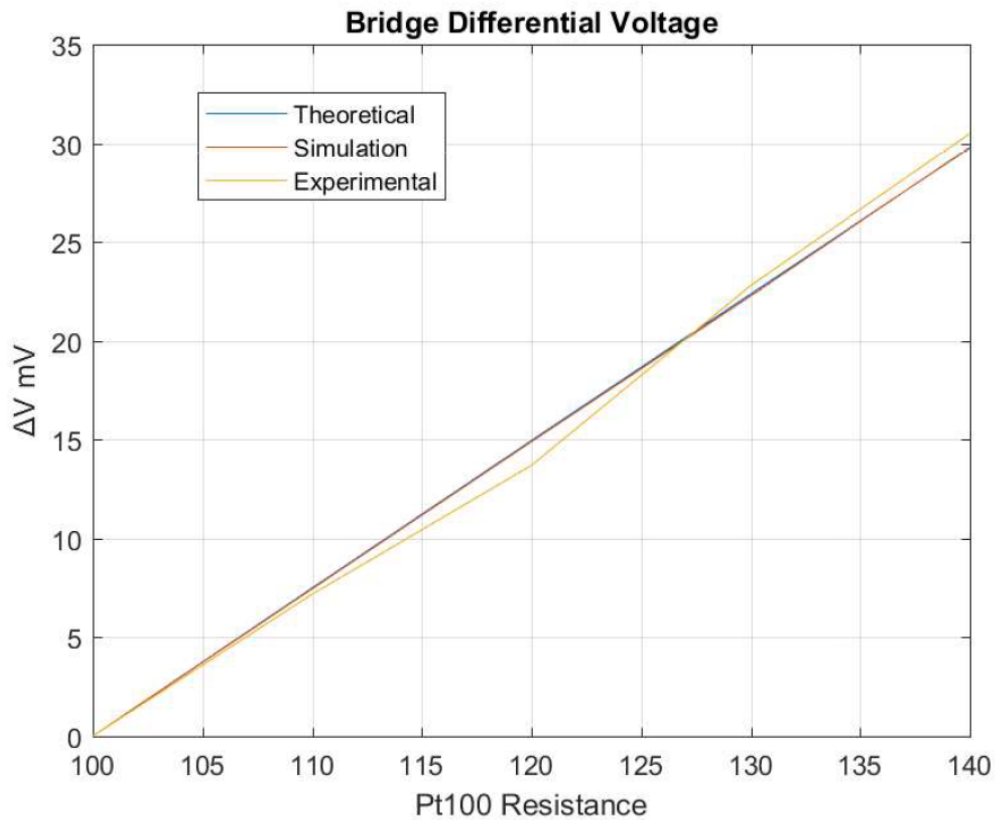
Πίνακας 4.8. Διαφορική τάση γέφυρας και τάση εξόδου ενισχυτή για Pt100 = 130Ω

	Θεωρητικά	Προσομοίωση	Πείραμα	Pt100 = 130Ω T = 78°C
ΔV (mV)	22.37	22.27	22.8	
V_o (V)	2.45	2.44	2.49	

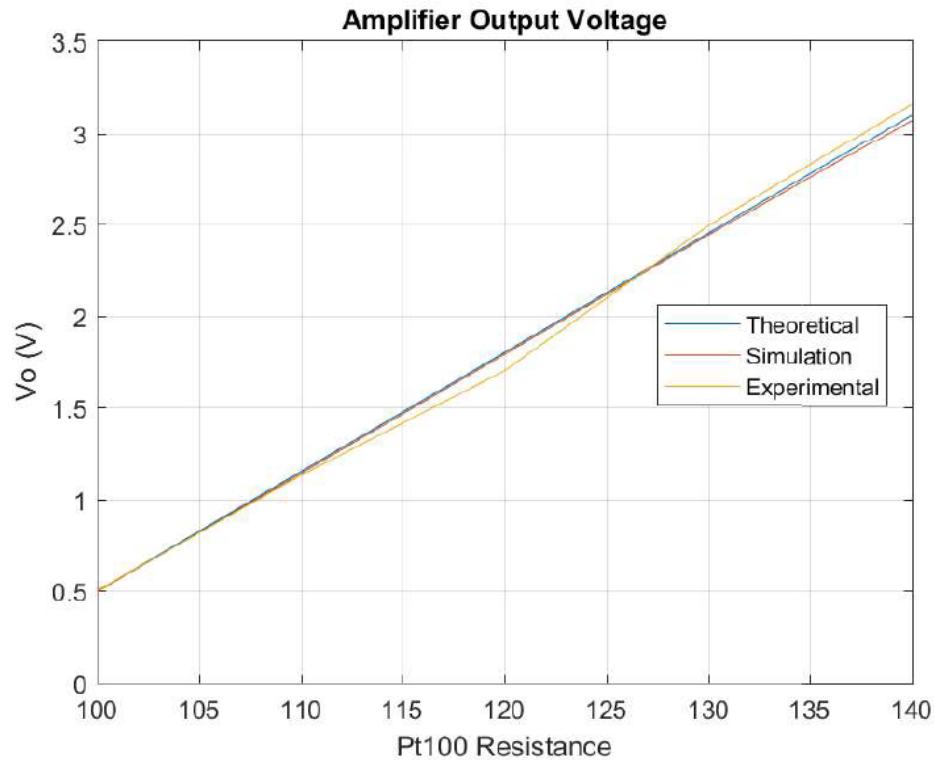
Πίνακας 4.9: Διαφορική τάση γέφυρας και τάση εξόδου ενισχυτή για Pt100 = 140Ω

	Θεωρητικά	Προσομοίωση	Πείραμα	Pt100 = 140Ω T = 104°C
ΔV (mV)	29.76	29.62	30.5	
V_o (V)	3.099	3.07	3.16	

Συγκριτικά τα παραπάνω αποτελέσματα είναι τα παρακάτω



Διάγραμμα 4.6: Συγκριτικά η διαφορική τάση της γέφυρας συναρτήσει της αντίστασης του Pt100

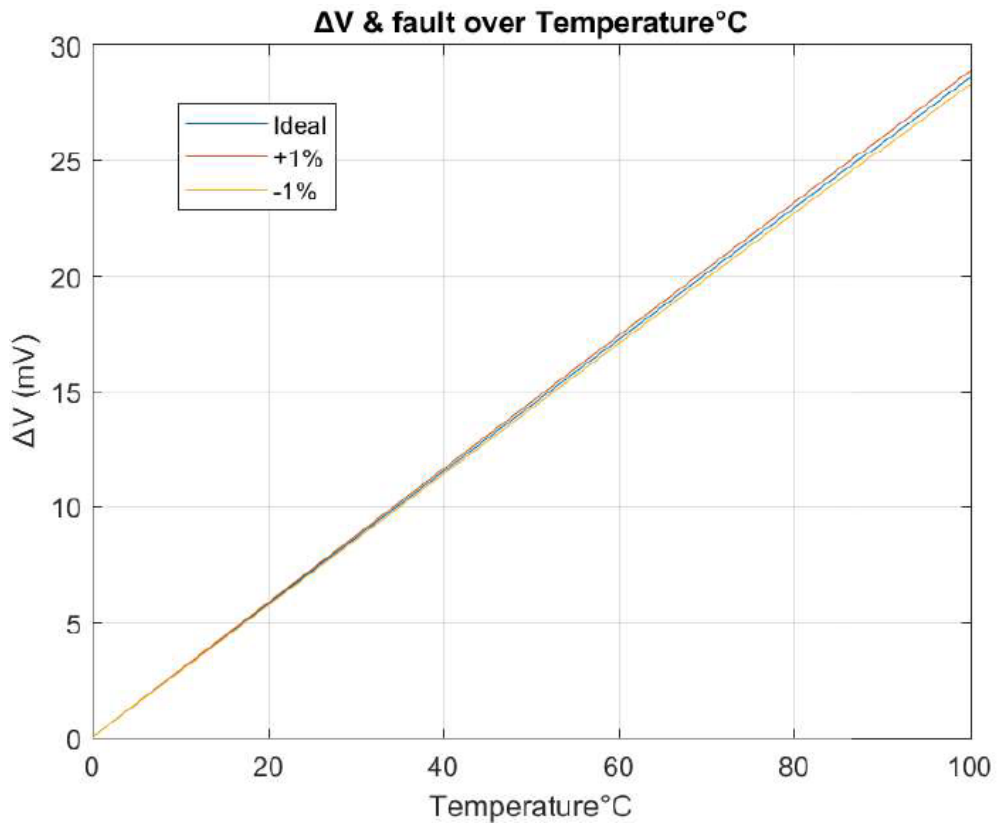


Διάγραμμα 4.7: Συγκριτικά η έξοδος του ενισχυτή οργανολογίας συναρτήσει της αντίστασης του Pt100

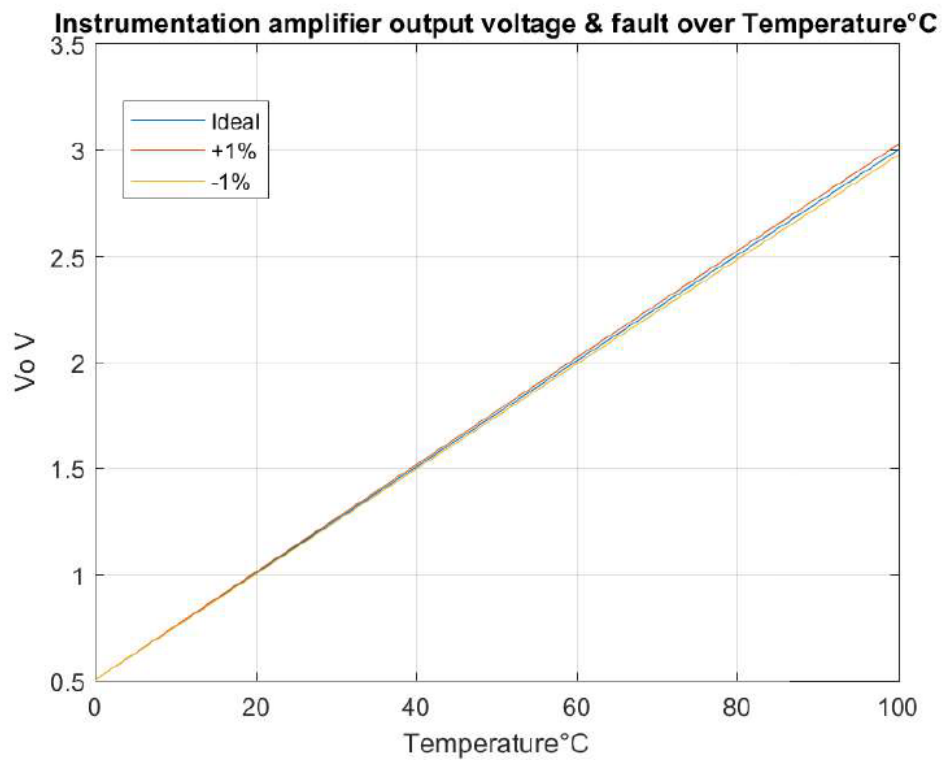
Όπως βλέπουμε από τα παραπάνω γραφήματα τα αποτελέσματα της θεωρίας και της προσομοίωσης σχεδόν ταυτίζονται, γεγονός που υποδηλώνει πως η σχεδίαση είναι σωστή και το κύκλωμα λειτουργικό. Τα παραπάνω σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις παρουσιάζουν ταύτιση σε κάποια σημεία και σε κάποια άλλα όχι, αυτό ερμηνεύεται μέσω του πειράματος καθώς για να προσομοιώσουμε τη λειτουργία του Pt100 στη θέση του βάλουμε μια αντίσταση 100Ω και προσθέταμε τις ανάλογες αντιστάσεις για να πετύχουμε τα αποτελέσματα. Οι διαφορές λοιπόν που εμφανίζονται στα πειραματικά δεδομένα οφείλονται στις ανοχές των αντιστάσεων που βάλουμε για την προσομοίωση του αισθητήρα. Όσον αφορά την περίπτωση που η θερμοκρασία είναι 0 °C, για να μετρήσουμε την απόκριση του ενισχυτή, βραχυκυκλώσαμε τις εισόδους του έτσι ώστε η διαφορική του είσοδος να γίνει μηδενική και έτσι με αυτόν τον τρόπο μετρήσαμε την έξοδό του.

4.5 Σφάλματα γέφυρας λόγω ανοχής αντιστάσεων

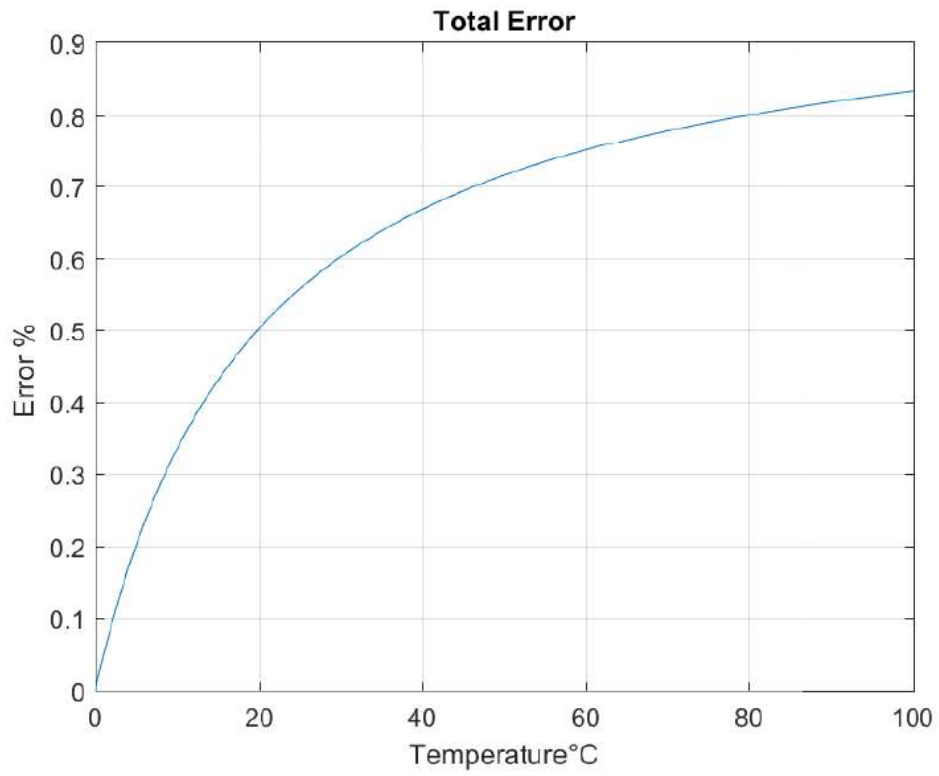
Οι αντιστάσεις της γέφυρας έχουν ανοχή $\pm 1\%$. Θέτοντας τη μεταβολή της αντίστασης αισθητηρίου ίση με $\pm 1\%$, η διαφορική τάση της γέφυρας σε σχέση με την ιδανική και συναρτήσει της θερμοκρασίας και το συνολικό σφάλμα της γέφυρας είναι τα παρακάτω.



Διάγραμμα 4.8: Διαφορική τάση γέφυρας για σφάλμα $\pm 1\%$



Διάγραμμα 4.9: Τάση εξόδου ενισχυτή οργανολογίας για σφάλμα $\pm 1\%$

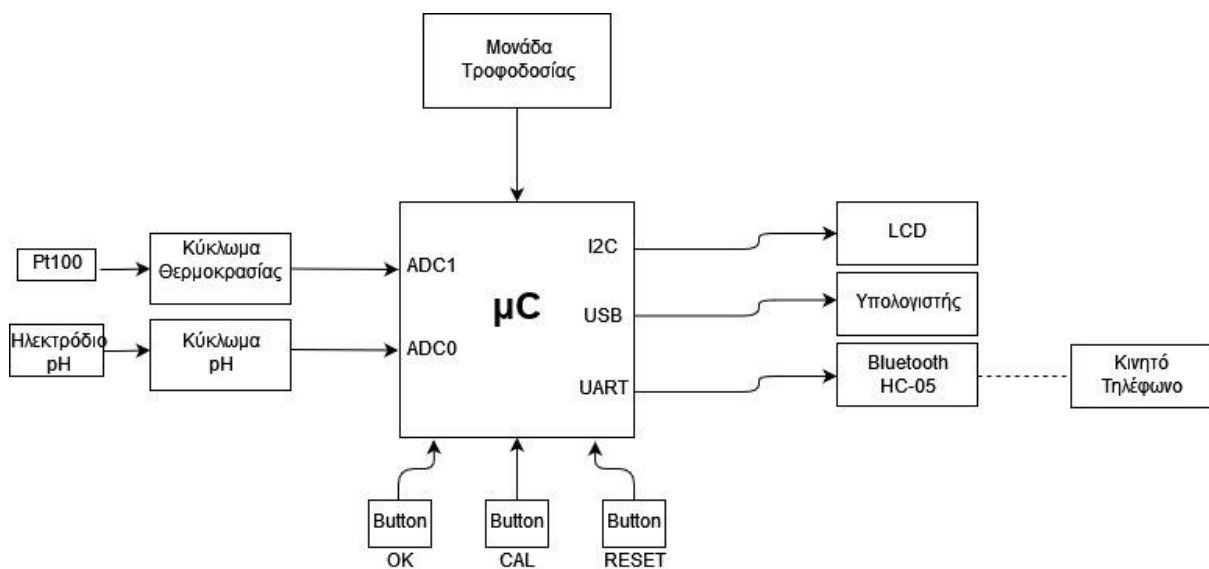


Διάγραμμα 4.10: Σφάλμα μη γραμμικότητας γέφυρας

Κεφάλαιο 5 - Επιλογή μικροελεγκτή, διασύνδεση με τα αναλογικά ηλεκτρονικά και απεικόνιση των δεδομένων.

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με τον μικροελεγκτή που καλείται να μετατρέψει τις τάσεις εξόδου των αναλογικών κυκλωμάτων σε τιμές pH και θερμοκρασίας. Θα παρουσιάσουμε τα χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή και θα μελετήσουμε τον τρόπο συνδεσμολογίας με τα αναλογικά ηλεκτρονικά, τους τρόπους με τους οποίους θα παράγονται τα επιθυμητά αποτελέσματα καθώς και τους τρόπους απεικόνισης των μετρούμενων μεγεθών. Στον μικροελεγκτή επίσης θα συνδεθούν και πλήκτρα έτσι ώστε ο χρήστης να έχει τη δυνατότητα ελέγχου του οργάνου. Συνολικά τα συστήματα του οργάνου είναι τα παρακάτω.



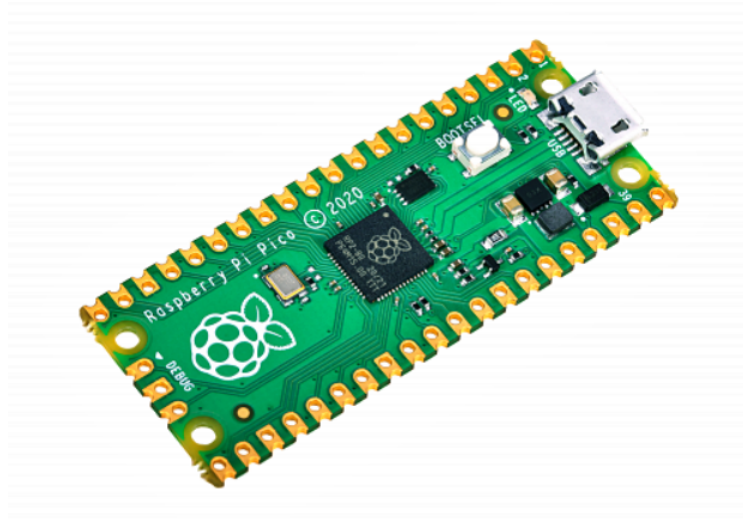
Διάγραμμα 5.1: Block διάγραμμα οργάνου

5.2 Επιλογή μικροελεγκτή και χαρακτηριστικά

Ο μικροελεγκτής που επιλέχθηκε για το όργανο είναι ο Raspberry Pi σε πλακέτα Raspberry Pi PICO. Στην πλακέτα αυτή είναι ενσωματωμένος ο μικροελεγκτής RP2040 από την εταιρεία Raspberry Pi. Είναι ο πρώτος μικροελεγκτής της εταιρείας καθώς η Raspberry Pi παράγει τους ομώνυμους μικροϋπολογιστές. Ο RP2040 κυκλοφόρησε το 2020.



Εικόνα 5.1: OK μικροελεγκτή RP2040



Εικόνα 5.2: Η πλακέτα Raspberry Pi PICO

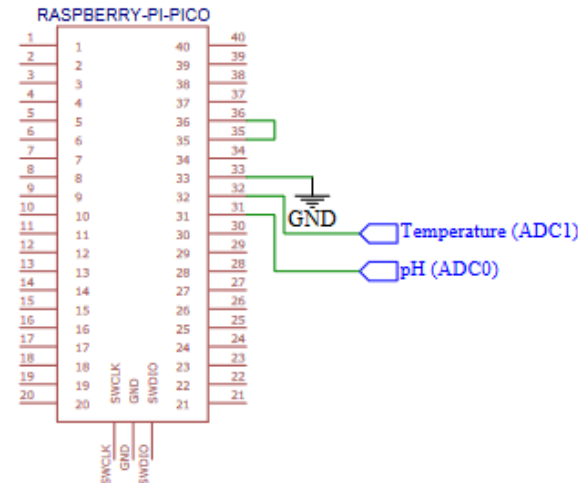
Τα χαρακτηριστικά του είναι:

- Χαμηλή κατανάλωση ισχύος και λειτουργία με τροφοδοσία 1.8V έως 5.5V
- Επεξεργαστή δύο πυρήνων με συχνότητα χρονισμού τα 133MHz
- 264kB ενσωματωμένη μνήμη SRAM
- 30 GPIO ακροδέκτες εισόδου/εξόδου με κάποιους από αυτούς να είναι
 - 4 κανάλια 12bit A/D μετατροπέα, με το 4ο δεσμευμένο για μέτρηση θερμοκρασίας της πλακέτας.
 - 16 ακροδέκτες PWM
 - 2 I2C κανάλια - 8 ακροδέκτες
 - 2 SPI κανάλια - 8 ακροδέκτες

Ο μικροελεγκτής μπορεί να προγραμματιστεί με τις γλώσσες C/C++ και Python από τα περιβάλλοντα, Arduino IDE, Platform IO, Thonny και άλλα. Για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή σε γλώσσα Python πρέπει να εγκατασταθεί compiler όπως είναι η MicroPython ή το CircuitPython. Για την ανάπτυξη του οργάνου ο μικροελεγκτής προγραμματίστηκε σε γλώσσα Python χρησιμοποιώντας το Thonny IDE με τον compiler MicroPython.

5.3 Διασύνδεση με τα αναλογικά ηλεκτρονικά

Για την διασύνδεση των αναλογικών ηλεκτρονικών με τον μικροελεγκτή χρησιμοποιούνται 2 κανάλια του A/D μετατροπέα και συγκεκριμένα, το ADC0 για το κύκλωμα του ηλεκτροδίου και το ADC1 για το κύκλωμα μέτρησης θερμοκρασίας. Επιπλέον για τον A/D μετατροπέα πρέπει να οριστεί η τάση αναφοράς του, δηλαδή η τάση που μέχρι εκεί θα κάνει μετρήσεις ο μετατροπέας, όπως επίσης και η γείωση του μετατροπέα. Στο παρακάτω σχηματικό παρουσιάζεται η παραπάνω περιγραφή, με την τάση αναφοράς του μικροελεγκτή να είναι 3.3V καθώς αυτή είναι η μέγιστη τάση που μπορεί να μετρηθεί.



Κύκλωμα 5.1: Συνδέσεις του A/D μετατροπέα

Για να ορίσουμε τα κανάλια ADC0 και ADC1 στον κώδικα, αρχικά πρέπει να γράψουμε την παρακάτω εντολή για την κλήση της κλάσης ADC από την βιβλιοθήκη machine.

```
from machine import ADC
```

Έπειτα ονομάζουμε τα κανάλια αναλόγως με το σήμα που μετράνε και τον ακροδέκτη στον οποίο λαμβάνεται το σήμα για μετατροπή.

```
analog_first = machine.ADC(26)
analog_second = machine.ADC(27)
```

Στις παραπάνω εντολές τα `analog_first` και `analog_second` είναι οι μεταβλητές στις οποίες θα αποθηκεύεται ο ακέραιος αριθμός που παράγεται από τον μετατροπέα. Οι εντολές `machine.ADC(26)` και `machine.ADC(27)` ορίζουν τους ακροδέκτες του μικροελεγκτή που θα χρησιμοποιηθούν, GPIO26 και GPIO27 αντίστοιχα.

Τέλος για να μετατρέψουμε την τιμή του μετατροπέα σε τιμή τάσης χρησιμοποιούμε τις παρακάτω εντολές.

```
VpH = (analog_first.read_u16()*3.3)/65535
Vtemp = (analog_second.read_u16()*3.3)/65535
```

Στο σημείο αυτό παρατηρείται πως υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ του τρόπου υπολογισμού της μετρούμενης τάσης του μετατροπέα και των χαρακτηριστικών του μικροελεγκτή. Συγκεκριμένα το γεγονός πως ο μετατροπέας είναι 12bit και η μετρούμενη τάση υπολογίζεται σαν να είναι ακέραιος αριθμός 16bit δηλαδή 65535 στάθμες κβαντισμού. Η διαφορά αυτή παρατηρήθηκε όταν η γλώσσα προγραμματισμού είναι η Python ενώ όταν η γλώσσα προγραμματισμού είναι η C/C++ η μετατροπή γίνεται κανονικά με 4096 στάθμες κβαντισμού.

5.4 Υπολογισμός pH και θερμοκρασίας στο μικροελεγκτή

Από τα μέχρι τώρα δεδομένα που έχουμε για το pH και τη θερμοκρασία γνωρίζουμε πως για να εξάγουμε τις τιμές τους πρέπει να λύσουμε αντίστροφα τις εξισώσεις που περιγράφουν τη λειτουργία των αντίστοιχων κυκλωμάτων. Ο υπολογισμός θα γίνει αρχικά για τη θερμοκρασία καθώς είναι απλούστερος και έπειτα για το pH που είναι πιο σύνθετος υπολογισμός.

5.4.1 Υπολογισμός θερμοκρασίας

Από το κεφάλαιο 4 γνωρίζουμε πως η τάση εξόδου του κυκλώματος μέτρησης θερμοκρασίας περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$V_0 = G \cdot \Delta V + V_{Ref}$$

Λύνοντας την εξίσωση ως προς την διαφορική τάση της γέφυρας ΔV έχουμε

$$\Delta V = \frac{(V_0 - V_{Ref})}{G} \quad (5.1)$$

Η διαφορική τάση της γέφυρας συναρτήσει της αντίστασης του Pt100 περιγράφεται από την εξίσωση

$$\Delta V = \frac{I \cdot RTD \cdot 1.1k - I \cdot RTD^2}{3.3k + RTD} \quad (5.2)$$

Λύνοντας τη ως προς την αντίσταση του Pt100 RTD είναι

$$RTD = \frac{4.3k \cdot \Delta V + 110k \cdot I_{ref}}{1.1k \cdot I_{ref} - \Delta V} \quad (5.3)$$

Τέλος, η θερμοκρασία συναρτήσει της αντίστασης του RTD περιγράφεται από την εξίσωση

$$R(T) = R(T_0) \cdot (1 + a \cdot \Delta T)$$

Στην εξίσωση αυτή έχουμε θέση $RTD = R(T)$, λύνοντας τη ως προς τη θερμοκρασία τελικά η θερμοκρασία υπολογίζεται

$$T = \frac{(RTD - R(T_0))}{a \cdot R(T_0)} \quad (5.4)$$

Ορίζοντας στον κώδικα τις σταθερές παραμέτρους των εξισώσεων

```
#Temperature parameters
```

```
a = 0.00385
```

```
Ro = 100 #pt100 Reference Resistance
```

```
I = 0.00304 #Bridge Reference Current
```

```
VrefTemp = 0.5 #Instrumentation Amplifier Voltage Reference (FOR TEMPERATURE)
```

```
Gain = 87.3515
```

Στον κώδικα ο υπολογισμός της θερμοκρασίας ορίστηκε σαν συνάρτηση στην οποία λύνονται οι παραπάνω εξισώσεις για τη θερμοκρασία. Τέλος η συνάρτηση έχει παράμετρο την τάση που

λαμβάνεται από το κύκλωμα μέτρησης θερμοκρασίας και δίνεται από το αντίστοιχο κανάλι του A/D μετατροπέα. Η συνάρτηση υπολογίζει τη θερμοκρασία σε °C. Για τον υπολογισμό σε °K έχει γραφτεί άλλη συνάρτηση. Με παράμετρο την τιμή που επιστρέφει η αρχική συνάρτηση.

```
def TEMP (Vtemp) :
    DV = (Vtemp - VrefTemp) / Gain
    RTD = (4300*DV + 110000*I) / (1100*I-DV)
    Temp = (RTD - Ro) / (a*Ro)
    return Temp

def ToKelvin(T) :
    return 274.15 + T
```

5.4.2 Υπολογισμός pH

Για τον υπολογισμό του pH τα πράγματα είναι πιο σύνθετα καθώς στην περίπτωση αυτή πρέπει να συλλογιστούμε και την μεταβολή του κέρδους λόγω της θερμοκρασίας. Η μεταβλητή αντίσταση κέρδους περιγράφεται από την εξίσωση που ορίσαμε στο κεφάλαιο 3

$$RG(trim) = 1 - \frac{100k}{\frac{3-V_{ref}}{E_0} - 1} - RG(min)$$

Επομένως το κέρδος του ενισχυτή στην προκειμένη περίπτωση είναι

$$G = 1 + \frac{100k}{RG(min)+RG(trim)}$$

Η τάση εξόδου του ενισχυτή περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση

$$V_0 = G \cdot E + V_{Ref}$$

Λύνοντας την εξίσωση ως προς την διαφορά δυναμικού του ηλεκτροδίου είναι

$$E = \frac{V_0 - V_{Ref}}{G} \quad (5.5)$$

Λύνοντας την εξίσωση Nernst ως προς την τιμή του pH τελικά είναι

$$pH = \frac{E - E_0}{-2.303 \frac{RT}{nF}} \quad (\text{Αναλυτική εξίσωση})$$

$$pH = \frac{E + 7 \cdot (-2.303 \frac{RT}{nF})}{-2.303 \frac{RT}{nF}} \quad (\text{Απλοποιημένη εξίσωση})$$

Στον κώδικα πλέον γνωρίζοντας την λύση της εξίσωσης Nernst ως προς το pH μπορούμε να ορίσουμε συνάρτηση που θα λύνει τις παραπάνω εξισώσεις. Αρχικά ορίζουμε τις σταθερές μεταβλητές του κυκλώματος ηλεκτροδίου και της εξίσωσης Nernst.

Κεφάλαιο 5

```
#pH Parameters
Rcon = 8.31446261815324 #Gas constant
F = 96485 #Faraday's constant
n = 1 #Rate of electron transfer
Kc = 16.1136 #Chemical equilibrium constant
RgC = 43000
Rg_pot_max = 25000
```

Η συνάρτηση υπολογισμού του pH παίρνει δύο ορίσματα, την τάση του κυκλώματος ηλεκτροδίου και την θερμοκρασία. Μέσω αυτών υπολογίζεται η τελική τιμή του pH.

```
def PH(VpH, temp):
    Eo = ((Rcon*ToKelvin(temp))/(n*F))*Kc
    m = ((3 - 1.75)/Eo)-1
    RGV = (((100000/m)-43000))
    GAIN = 1 + (100000/(RgC + RGV))
    slope = -ToKelvin(temp)*(2.303*(Rcon/(n*F)))
    pH = (((VpH-1.75)/GAIN))+7*slope/slope
    return pH
```

Από την παραπάνω συνάρτηση βλέπουμε πως το pH υπολογίζεται μέσω της απλοποιημένης εξίσωσης Nernst καθώς επίσης και την αυτόματη ρύθμιση του κέρδους στη συνάρτηση. Έχοντας το κέρδος στο κύκλωμα σταθερό δηλαδή θέτοντας την αντίσταση κέρδους ίση με RG(min), τότε κάθε φορά που θα καλείται η παραπάνω συνάρτηση το κέρδος του ενισχυτή θα υπολογίζεται με τη χρήση της θερμοκρασίας και θα εφαρμόζεται στην εξίσωση υπολογισμού του pH.

5.5 Βαθμονόμηση οργάνου

Σημαντικό κομμάτι στη λειτουργία ενός οργάνου μέτρησης pH είναι η βαθμονόμηση του καθώς πριν από κάθε χρήση πρέπει να γίνεται βαθμονόμηση. Το όργανο έως τώρα μπορεί να βαθμονομηθεί σε επίπεδο κυκλώματος (hardware) κάνοντας μικρορυθμίσεις στο κέρδος και την τάση αναφοράς του κυκλώματος του ηλεκτροδίου. Η βαθμονόμηση όμως μπορεί να γίνει και με τη χρήση software με τον παρακάτω τρόπο.

Η τιμή του pH υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση ευθείας σύμφωνα με τη μορφή της εξίσωσης Nernst

$$pH = -a \cdot V_0 + \beta \quad (5.6)$$

Όπου

V_0 : είναι η τάση εξόδου του κυκλώματος ηλεκτροδίου

a : η κλίση της ευθείας

β : σταθερός όρος

Για τη βαθμονόμηση πρέπει να γίνουν μετρήσεις για αλκαλικό αρχικά και έπειτα για όξινο διάλυμα. Επομένως θα έχουμε ένα σύστημα δύο γραμμικών εξισώσεων με δύο αγνώστους

$$\begin{aligned} pH_{(ALC)} &= -a \cdot V_{0(ALC)} + \beta \\ pH_{(ACID)} &= -a \cdot V_{0(ACID)} + \beta \end{aligned}$$

Λύνοντας τις εξισώσεις, η κλίση α και ο σταθερός όρος β περιγράφονται από τις παρακάτω σχέσεις

$$\alpha = \frac{pH_{(ACID)} - pH_{(ALC)}}{V_{0(ALC)} - V_{0(ACID)}} \quad (5.7)$$

$$\beta = pH_{(ALC)} + \alpha \cdot V_{0(ALC)} \quad (5.8)$$

Για να πετύχουμε τη βαθμονόμηση του οργάνου μέσω software πρέπει να γραφεί κώδικας στο μικροελεγκτή που θα αποθηκεύει τις τάσεις εξόδου του ενισχυτή για τις αντίστοιχες τιμές pH που μετράει το όργανο χωρίς τη software βαθμονόμηση. Έπειτα από τις τιμές αυτές να υπολογίζει την κλίση και το σταθερό όρο της εξίσωσης ευθείας και μετά να τις εφαρμόζει για να υπολογίσει το pH. Στο παρακάτω κομμάτι κώδικα αναπτύσσεται η παραπάνω περιγραφή

```
def calibratedOUT(A, B):
    global slp
    slp = (4-7) / (A-B)
    global offset
    offset = pH1 + slp*A
    return slp, offset
```

Στην παραπάνω συνάρτηση τα ορίσματα A και B είναι οι τάσεις εξόδου του ενισχυτή για αλκαλικό και όξινο pH αντίστοιχα. Οι global μεταβλητές slp και offset είναι η κλίση και ο σταθερός όρος της εξίσωσης. Χαρακτηρίζονται ως global ή αλλιώς καθολικές μεταβλητές καθώς έτσι τους δίνεται η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν σε οποιοδήποτε κομμάτι του κώδικα. Πλέον η τιμή του pH υπολογίζεται από την παρακάτω συνάρτηση.

```
def PHI(VpH):
    pH = -(VpH*slp)+offset
    return pH
```

Η ονομασία pHI δόθηκε καθώς είναι διαφορετικός τρόπος υπολογισμού του pH και η κλίση του γίνεται υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Συγκεκριμένα στο όργανο έχει τοποθετηθεί η δυνατότητα επιλογής του αν θα γίνει βαθμονόμηση ή όχι. Για τον λόγο αυτό υπάρχουν δύο push button το ένα ονομάζεται OK και το άλλο CAL (Calibrate). Όταν το OK πατηθεί μία φορά δίχως να έχει πατηθεί το CAL το όργανο κάνει μετρήσεις χωρίς software βαθμονόμηση, δηλαδή μετράει το pH μόνο με τις υπάρχουσες ρυθμίσεις στο hardware και την αυτόματη ρύθμιση του κέρδους. Σε αντίθετη περίπτωση όταν πατηθεί το CAL χωρίς να έχει πατηθεί το OK πριν, τότε το όργανο εισέρχεται σε λειτουργία βαθμονόμησης. Στη λειτουργία βαθμονόμησης αρχικά γίνεται μέτρηση και καταχώρηση των μεταβλητών για το αλκαλικό pH, όταν το pH γίνει το επιθυμητό τότε πατώντας το OK μία φορά το όργανο καταχωρεί την τάση για το αλκαλικό pH στην πρώτη θέση ενός πίνακα 1X2. Όταν γίνει αυτό η βαθμονόμηση περνά στο στάδιο μέτρησης του όξινου pH, πατώντας το OK μια φορά η τιμή αυτή αποθηκεύεται στην αντίστοιχη θέση του πίνακα και καλείται η συνάρτηση calibratedOUT για τον υπολογισμό των παραμέτρων της γραμμικής εξίσωσης που αναφέρθηκε παραπάνω και το πρόγραμμα εξέρχεται από το “βρόχο” βαθμονόμησης, τέλος αλλάζει η τιμή σε ένα δείκτη όπου αυτός ο δείκτης μας καθορίζει το μέρος του κυρίου προγράμματος που θα γίνουν οι μετρήσεις και η εμφάνισή τους.

Κεφάλαιο 5

```
while ext == True:
    OKbutton()
    CALbutton()
    while cal == False and okCount == 1:
        sleep(0.3)
        ext = False
        runFlag = 1
        break
    while cal == True and okCount == 0:
        calibrationParameters[0] = pHVoltage()
        sleep(0.5)
        OKbutton()
    while cal == True and okCount == 1:
        calibrationParameters[1]=pHVoltage()
        sleep(0.5)
        OKbutton()
    if cal == True and okCount == 2:
        calibratedOUT(calibrationParameters[0],calibrationParameters[1])
        sleep(0.5)
        ext = False
        runFlag = 2
        OKbutton()
```

Για το παραπάνω κομμάτι κώδικα ισχύουν τα εξής. Αρχικά η συνάρτηση `Debounce(pin)` είναι η συνάρτηση όπου χρησιμοποιώντας τη αποφεύγουμε το φαινόμενο αναπήδησης του push button. Το `ext` είναι ο δείκτης που μας κρατάει μέσα στο βρόχο βαθμονόμησης. Ο δείκτης `cal` είναι μας δείχνει αν έχει πατηθεί το CAL button, όταν είναι `True` έχει πατηθεί, σε διαφορετική περίπτωση ο δείκτης είναι `False`. Ο δείκτης `runFlag` μας δείχνει ποιο κομμάτι του κυρίως προγράμματος θα εκτελεστεί, αν `runFlag=1` τότε στο κύριο πρόγραμμα γίνεται η κλήση των συναρτήσεων για τη μέτρηση pH δίχως software calibration. Όταν `runFlag=2`, στο κύριο πρόγραμμα γίνεται η κλήση των συναρτήσεων για τη μέτρηση pH με software calibration.

5.6 Απεικόνιση δεδομένων

Η απεικόνιση των δεδομένων, δηλαδή pH και θερμοκρασία, μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Για το όργανο το οποίο μελετάμε η απεικόνιση δεδομένων γίνεται με τη χρήση μια οθόνης LCD 16X2, όμως ταυτόχρονα έχει προστεθεί η δυνατότητα να αποστέλλονται τα δεδομένα ενσύρματα και ασύρματα με τη χρήση USB και Bluetooth αντίστοιχα.

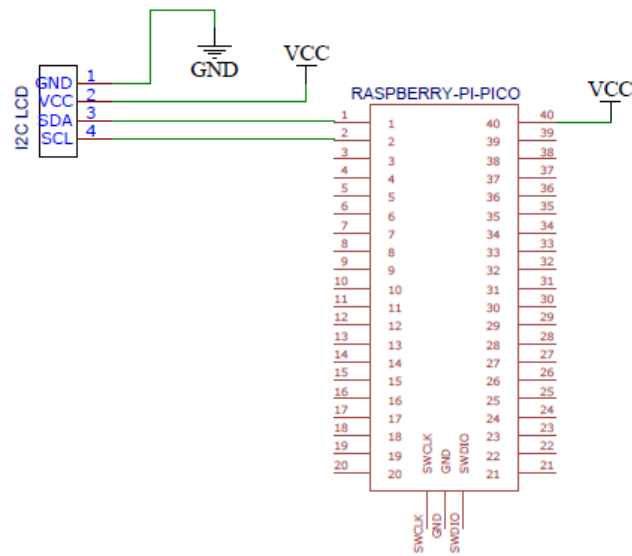
5.6.1 Οθόνη LCD

Η επικοινωνία μεταξύ της οθόνης και του μικροελεγκτή γίνεται με τη χρήση του πρωτοκόλλου I2C και αυτό γιατί σε διαφορετική περίπτωση θα χρειαζόντουσαν περισσότερες συνδέσεις και περισσότερες γραμμές κώδικα έτσι ώστε να λειτουργήσει η οθόνη. Για το λόγο αυτό στην οθόνη ενσωματώθηκε μια πλακέτα I2C driver έτσι ώστε η επικοινωνία με το μικροελεγκτή να γίνεται με τη χρήση δύο ακροδεκτών ενώ η τροφοδοσία της οθόνης να γίνεται με δύο ακροδέκτες, συνολικά τέσσερις ακροδέκτες. Για τον προγραμματισμό της οθόνης και κατ'επέκταση της επικοινωνίας πρέπει να ενσωματωθούν οι βιβλιοθήκες `pico_i2c_lcd` και `lcd_api`. Οι βιβλιοθήκες αυτές μας παρέχουν τις απαραίτητες εντολές για τον έλεγχο της οθόνης καθώς και τον ορισμό των παραμέτρων της I2C επικοινωνίας. Στο πρόγραμμα ο ορισμός των παραμέτρων της επικοινωνίας αλλά και της οθόνης γίνονται με τις παρακάτω εντολές.

```
i2c = I2C(0, sda=Pin(0), scl=Pin(1), freq=100000)
```

```
I2C_ADDR = i2c.scan()[0]
lcd = I2cLcd(i2c, I2C_ADDR, 2, 16)
```

Στην πρώτη εντολή δημιουργείται το αντικείμενο `i2c` και ορίζονται ως χαρακτηριστικά του, ο δίαυλος της I2C επικοινωνίας, δηλαδή ο πρώτος δίαυλος, οι ακροδέκτες του μικροελεγκτή που θα είναι υπεύθυνοι για τα σειριακά δεδομένα και το σήμα χρονισμού καθώς και η συχνότητα επικοινωνίας 100kHz. Έπειτα στη μεταβλητή `I2C_ADDR` καταχωρείται η διεύθυνση της οθόνης στο δίαυλο. Τέλος δημιουργείται το αντικείμενο `lcd` της κλάσης `I2cLcd` με χαρακτηριστικά το αντικείμενο `i2c`, την διεύθυνση της οθόνης, τις γραμμές και τις στήλες της οθόνης.



Κύκλωμα 5.2: Σύνδεση I2C οθόνης με το μικροελεγκτή

Παράδειγμα της χρήσης της οθόνης με το πρωτόκολλο I2C είναι τα παρακάτω εισαγωγικά μηνύματα όταν ξεκινά η λειτουργία του οργάνου αλλά και όταν τυπώνεται το pH και η θερμοκρασία.

```
lcd.move_to(0,0)
lcd.putstr("PH meter device IEE IHU 2022")
sleep(2.5)
lcd.clear()
lcd.putstr("Designed by Mimidakis Spiros")
sleep(2.5)
lcd.clear()
```

Στο παραπάνω κομμάτι κώδικα η εντολή `lcd.move_to(0,0)` θέτει τον κέρσορα στην θέση (0,0), η εντολή `lcd.putstr("PH meter device IEE IHU 2022")` τυπώνει το μήνυμα στην οθόνη ενώ η εντολή `sleep(2.5)` επιβάλλει καθυστέρηση 2.5 δευτερολέπτων πριν ακολουθήσει η εντολή `lcd.clear()` για να καθαριστεί η οθόνη για να τυπωθεί το επόμενο μήνυμα. Για το επόμενο εισαγωγικό μήνυμα δεν υπάρχει εντολή για τη θέση του κέρσορα, αντ' αυτού το μήνυμα τυπώνεται απευθείας με ένα μεγάλο κενό στη μέση, η σημασία αυτού είναι πως όταν εξαντληθούν οι θέσεις για τους χαρακτήρες στην πρώτη γραμμή τότε αυτόματα οι χαρακτήρες τυπώνονται στη δεύτερη γραμμή. Όταν τυπωθεί το μήνυμα ακολουθείται η ίδια διαδικασία με πριν, καθυστέρηση 2.5 δευτερολέπτων και καθαρισμός της οθόνης.



α)

β)

Εικόνα 5.3: α) Πρώτο εισαγωγικό μήνυμα, β) δεύτερο εισαγωγικό μήνυμα

Για την εκτύπωση των μετρήσεων ο κώδικας είναι ο παρακάτω

```
lcd.clear()
lcd.move_to(0, 0)
lcd.putstr("Temp: "+"{: .1f}").format(TEMP(tempVoltage()))+" °C")
lcd.move_to(0,1)
lcd.putstr("PH:"+"{: .1f}").format(PH(pHVoltage()),TEMP(tempVoltage()
))))
```

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση ορίζεται η θέση του κέρσορα στην οθόνη `lcd.move_to(0, 0)` και τυπώνεται τη τιμή της θερμοκρασίας για αρχή και έπειτα ορίζοντας ξανά τη θέση του κέρσορα `lcd.move_to(0,1)` τυπώνεται και η τιμή του pH. Στις εντολές `lcd.putstr()` η χρήση του `{: .1f}").format(TEMP(tempVoltage()))` και `{: .1f}").format(PH(pHVoltage()),TEMP(tempVoltage()))` μας βοηθά να εκτυπώσουμε τις μετρήσεις σαν float αριθμούς με ένα δεκαδικό ψηφίο. Επίσης στις εντολές εκτύπωσης τα σταθερά μέρη των μηνυμάτων "Temp: ", " °C" και "PH:" είναι strings και χρησιμοποιούνται για να υποδείξουν στο χρήστη τις μετρήσεις και μεταξύ του χωρίζονται με "+".



Εικόνα 5.4: Απεικόνιση μετρήσεων στην οθόνη

5.6.2 USB επικοινωνία με serial terminal εφαρμογές

Η μεταφορά δεδομένων μεταξύ του RP2040 και του υπολογιστή και αντίστροφα γίνεται με USB, στην πλακέτα Raspberry pi Pico δεν υπάρχει κάποιος UART to USB μετατροπέας όπως σε άλλες πλακέτες, η επικοινωνία επομένως γίνεται απευθείας χωρίς κάποιο μεσάζοντα. Επίσης στον Python κώδικα δεν ορίστηκε ρυθμός baud. Θέλοντας να πετύχουμε την ενσύρματη επικοινωνία μεταξύ οργάνου και μικροελεγκτή με τη χρήση ενός καλωδίου micro USB σε USB μπορούμε να στείλουμε τα δεδομένα με τη χρήση μιας εντολής μόνο. Με τη χρήση της εντολής print() τα δεδομένα στέλνονται σειριακά από το μικροελεγκτή στον υπολογιστή. Για την ακρίβεια το όργανο στέλνει τα δεδομένα με την εντολή

```
print("PH:
"+"{: .1f} ".format(PH(pHVoltage()), TEMP(tempVoltage()))+" @Temp:
"+"{: .1f} ".format(TEMP(tempVoltage()))+" °C")
```

Δεν χρειάζεται να οριστεί κάποια άλλη παράμετρος για την επικοινωνία ούτε και baud ρυθμός. Τα δεδομένα μπορούν να γίνουν ορατά από οποιοδήποτε πρόγραμμα διαθέτει σειριακή οθόνη όπως το Thonny, το Arduino IDE, το PuTTY, το GNU OCTAVE, το MATLAB ή το LabView. Η μόνη ρύθμιση που χρειάζεται να γίνει κυρίως για το Arduino IDE είναι να οριστεί η θύρα επικοινωνίας (COM), για το Thonny η θύρα επικοινωνίας ανιχνεύεται αυτόματα όταν συνδεθεί ο μικροελεγκτής. Παρακάτω δίνονται τα μηνύματα του μικροελεγκτή προς τον υπολογιστή.

5.6.2.1 Επικοινωνία οργάνου μέτρησης με την εφαρμογή Thonny μέσω USB

Η χρήση του Thonny εκτός από το να μας προσφέρει ένα περιβάλλον προγραμματισμού για το μικροελεγκτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως σειριακή οθόνη για την εκτύπωση των δεδομένων από τον μικροελεγκτή στον υπολογιστή. Στην περίπτωση του Thonny δεν χρειάζεται να οριστεί κάποια θύρα επικοινωνίας καθώς αυτή ανιχνεύεται αυτόματα.

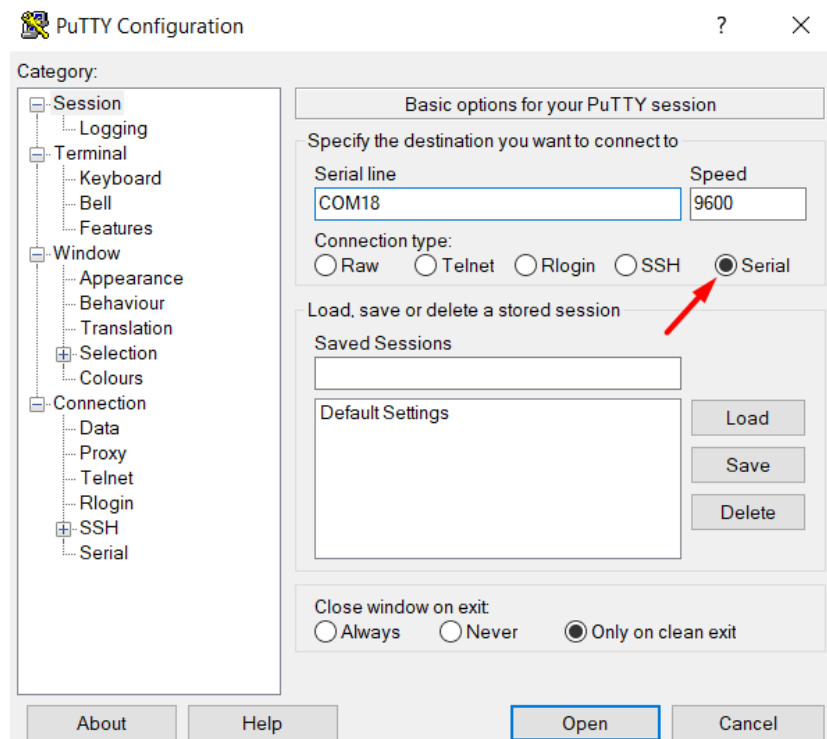
```

Shell × Exception × Program tree ×
PH: 7.2 @Temp: 17.1°C
PH: 7.2 @Temp: 17.2°C
PH: 7.1 @Temp: 17.4°C
PH: 7.2 @Temp: 17.4°C
PH: 7.2 @Temp: 17.2°C
PH: 7.2 @Temp: 17.1°C
PH: 7.2 @Temp: 17.2°C
PH: 7.2 @Temp: 17.2°C
PH: 7.2 @Temp: 17.2°C
PH: 7.2 @Temp: 17.1°C
PH: 7.2 @Temp: 17.2°C
    
```

Εικόνα 5.5: Μετρήσεις στο Thonny μέσω USB

5.6.2.2 Επικοινωνία οργάνου μέτρησης με την εφαρμογή PuTTY μέσω USB

Γενικά η εφαρμογή PuTTY χρησιμοποιείται συνήθως για απομακρυσμένη σύνδεση σε συστήματα με το λειτουργικό σύστημα UNIX μέσω SSH ή Telnet. Όμως υπάρχει δυνατότητα σειριακής επικοινωνίας με κάποια άλλη συσκευή. Στην περίπτωση του οργάνου θέλουμε να δούμε τα σειριακά δεδομένα που λαμβάνει ο υπολογιστής. Στο εισαγωγικό παράθυρο του PuTTY διαλέγουμε την επιλογή Serial. Με την επιλογή αυτή εμφανίζεται ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων, που είναι ίσος με 9600 bits/sec, και η σειριακή θύρα που πρέπει να οριστεί. Μόλις οριστεί η θύρα και πατηθεί το πλήκτρο Open τότε εμφανίζεται η σειριακή οθόνη με τις μετρήσεις του οργάνου.



Εικόνα 5.6: Εισαγωγικό παράθυρο στο PuTTY

```

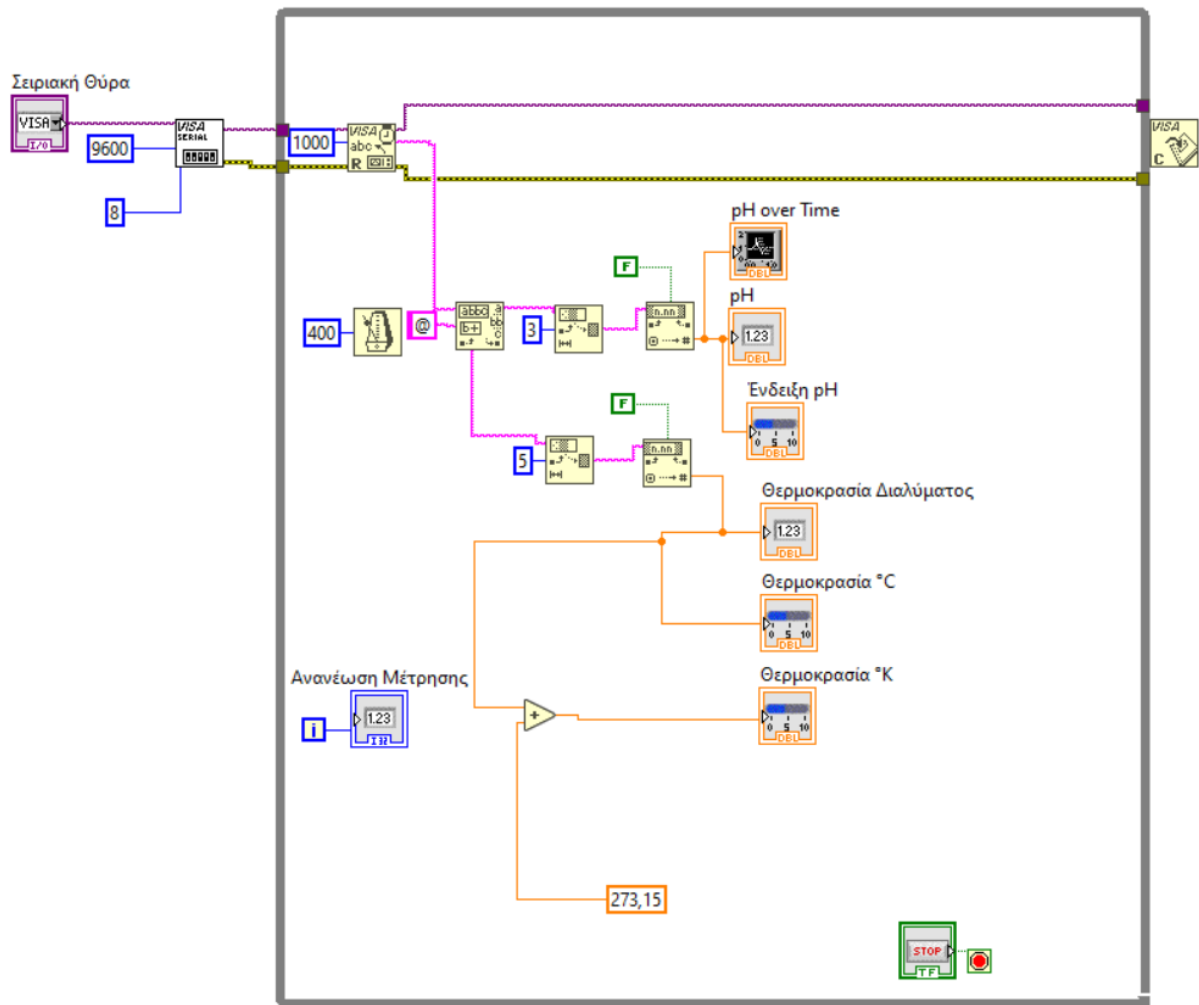
COM18 - PuTTY
pH: 7.1 @Temp: 17.0°C
pH: 7.1 @Temp: 17.1°C
pH: 7.1 @Temp: 16.8°C
pH: 7.1 @Temp: 16.8°C
pH: 7.1 @Temp: 17.2°C
pH: 7.1 @Temp: 17.1°C
pH: 7.1 @Temp: 16.6°C
pH: 7.1 @Temp: 17.1°C
pH: 7.1 @Temp: 17.1°C
pH: 7.1 @Temp: 16.7°C
pH: 7.1 @Temp: 16.9°C
pH: 7.1 @Temp: 17.3°C
pH: 7.1 @Temp: 17.0°C
pH: 7.1 @Temp: 16.7°C
pH: 7.1 @Temp: 17.3°C
pH: 7.1 @Temp: 17.1°C
pH: 7.1 @Temp: 16.6°C
pH: 7.1 @Temp: 17.0°C
pH: 7.1 @Temp: 17.0°C

```

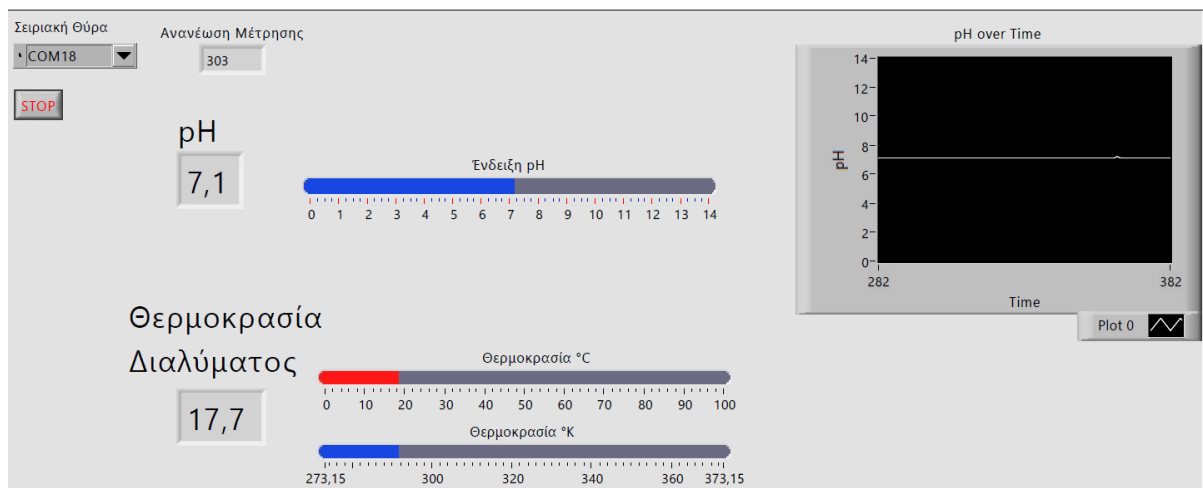
Εικόνα 5.7: Μετρήσεις στο PuTTY μέσω USB

5.6.2.3 Επικοινωνία οργάνου μέτρησης με το LabVIEW μέσω USB

Το LabVIEW είναι λογισμικό που χρησιμοποιείται για την οπτικοποίηση μετρήσεων και δεδομένων καθώς και τον έλεγχο μηχανημάτων μέσω υπολογιστή. Η απεικόνιση και ο έλεγχος γίνεται μέσω γραφικών διεπαφών στο Front Panel. Για να επιτευχθεί ο έλεγχος και οι μετρήσεις πρέπει ο χρήστης να δημιουργήσει το κατάλληλο πρόγραμμα. Ο προγραμματισμός στο LabVIEW γίνεται μέσω Block διαγραμμάτων όπου το κάθε block αντιπροσωπεύει κάποια διεργασία που γίνεται ή κάποια μεταβλητή. Για την απεικόνιση των δεδομένων αρχικά ορίστηκε η σειριακή θύρα επικοινωνίας, στην περίπτωση αυτή στο Front Panel εμφανίζονται σε λίστα οι διαθέσιμες θύρες σειριακής επικοινωνίας. Κατά την αρχή της επικοινωνίας ορίζονται ο ρυθμός μετάδοσης baud που είναι 9600, τα bits πληροφορίας, 8bits και οι χαρακτήρες του μηνύματος που λαμβάνεται, ορίστηκε σαν 1000 χαρακτήρες. Έπειτα το μήνυμα που λαμβάνει το LabVIEW διαχωρίζεται σε δύο String το ένα περιλαμβάνει τη μέτρηση pH και το άλλο τη μέτρηση θερμοκρασίας έχοντας ως διαχωριστικό μεταξύ των δύο μετρήσεων το σύμβολο @. Αυτά τα δύο String έπειτα επεξεργάζονται έτσι ώστε στο Front Panel να εμφανίζεται μόνο το αριθμητικό μέρος της μέτρησης ως float αριθμός με ένα δεκαδικό ψηφίο. Για τη μέτρηση pH χρησιμοποιείται ένα TextBox έτσι ώστε να τυπώνεται η μέτρηση σαν αριθμός, επιπλέον προστέθηκαν ένα slide bar έτσι ώστε να δείχνει τη μέτρηση σε σχέση με την κλίμακα pH όπως επίσης και η δυνατότητα αποτύπωσης της μέτρησης pH σε διάγραμμα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της οξύτητας ενός διαλύματος και του πως αλλάζει αυτή σε σχέση με το χρόνο. Για τη θερμοκρασία έχει τοποθετηθεί ένα TextBox που εκτυπώνεται η μέτρηση σε βαθμούς °C ενώ ταυτόχρονα έχουν τοποθετηθεί δυο slide bars για την αποτύπωση της μέτρησης σε βαθμούς °C και βαθμούς °K αντίστοιχα. Η μέτρηση ανανεώνεται κάθε 400ms ενώ έχει τοποθετηθεί και ένας μετρητής που αυξάνεται κατά ένα κάθε φορά που ολοκληρώνεται επιτυχώς ο βρόχος. Τέλος για τον τερματισμό του προγράμματος / μέτρησης έχει τοποθετηθεί ένα πλήκτρο με το όνομα STOP όπου όταν πατηθεί θα σταματήσει το πρόγραμμα. Το πρόγραμμα συνολικά εκτελείται σε έναν βρόχο while. Με την παραπάνω διαδικασία έχουμε δημιουργήσει ένα εικονικό όργανο που προβάλλει τις μετρήσεις που γίνονται από το πραγματικό όργανο.



Διάγραμμα 5.2: Πρόγραμμα LabVIEW



Εικόνα 5.8: Εικονικό όργανο στο LabVIEW

5.6.3 Bluetooth επικοινωνία

Για την ασύρματη επικοινωνία του οργάνου με κάποια άλλη συσκευή χρησιμοποιείται η πλακέτα επέκτασης HC-05. Η πλακέτα αυτή επικοινωνεί με το μικροελεγκτή με τη χρήση του πρωτοκόλλου UART. Η τροφοδοσία του μπορεί να έχει τιμές από 3.6V έως 5.5V. Η πλακέτα έχει 6 ακροδέκτες

- STATE: Αποστέλλονται πληροφορίες στον μικροελεγκτή για τη συνδεσιμότητα.
- RX: Δεδομένα που αποστέλλονται από το μικροελεγκτή, για αποστολή μέσω Bluetooth.
- TX: Δα ληφθέντα δεδομένα αποστέλλονται στον μικροελεγκτή.
- GND: Γείωση.
- +5V: Τάση τροφοδοσίας.
- EN: Ένδειξη για data ή command mode

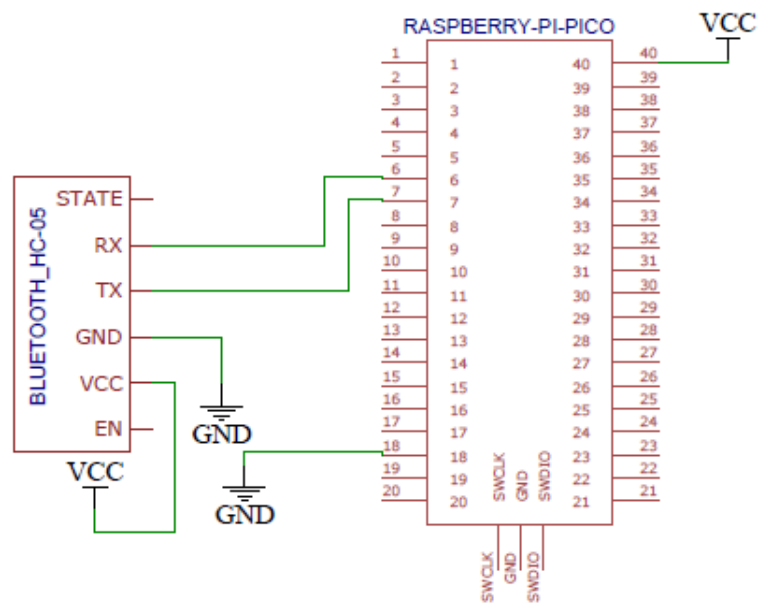
Οι ακροδέκτες που μας ενδιαφέρουν είναι οι ακροδέκτες τροφοδοσίας +5V, GND και οι ακροδέκτες λήψης RX και αποστολής TX δεδομένων με το μικροελεγκτή. Οι ακροδέκτες RX και TX συνδέονται με τους GPIO ακροδέκτες 5 και 4 αντίστοιχα. Για να ορίσουμε τις παραμέτρους της επικοινωνίας στον κώδικα πρέπει αρχικά να ενσωματώσουμε την κλάση UART από τη βιβλιοθήκη machine. Για να αποστείλουμε τα δεδομένα από το μικροελεγκτή σε μία άλλη συσκευή που είναι συνδεδεμένη με bluetooth μπορούμε να το πετύχουμε με την εντολή `uart.write(message)` όπου `message` είναι το μήνυμα που θέλουμε να μεταδώσουμε. Για την λήψη δεδομένων από μια άλλη συσκευή μπορούμε να το πετύχουμε με την εντολή `uart.readline()`. Για το όργανο χρειαζόμαστε μόνο τη λειτουργία της αποστολής μηνύματος, επομένως στον κώδικα έχουμε δημιουργήσει την παρακάτω συνάρτηση.

```
def bluetoothCom(forOUT):
    uart.write(forOUT)
```

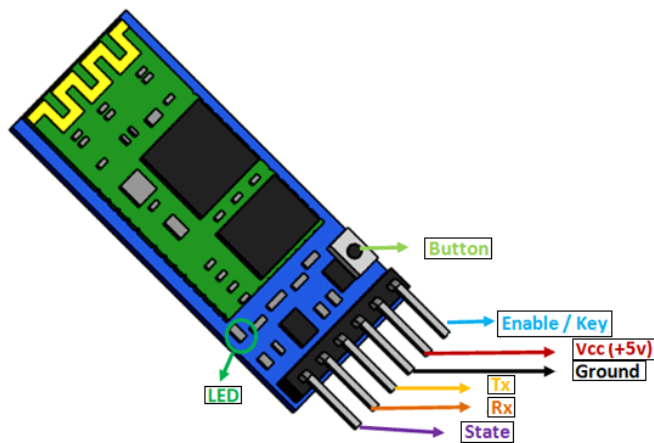
Η παραπάνω συνάρτηση λαμβάνει ως όρισμα το μήνυμα που δρομολογείται για αποστολή και με την εντολή `uart.write(forOUT)` το μήνυμα αποστέλλεται μέσω του οργάνου στη συνδεδεμένη συσκευή. Η κλήση της συνάρτησης γίνεται με τον παρακάτω τρόπο.

```
bluetoothCom("PH:
"+"{: .1f} ".format(PH(pHVoltage()), TEMP(tempVoltage())))+"@Temp:
"+"{: .1f} ".format(TEMP(tempVoltage()))+"°C ")
```

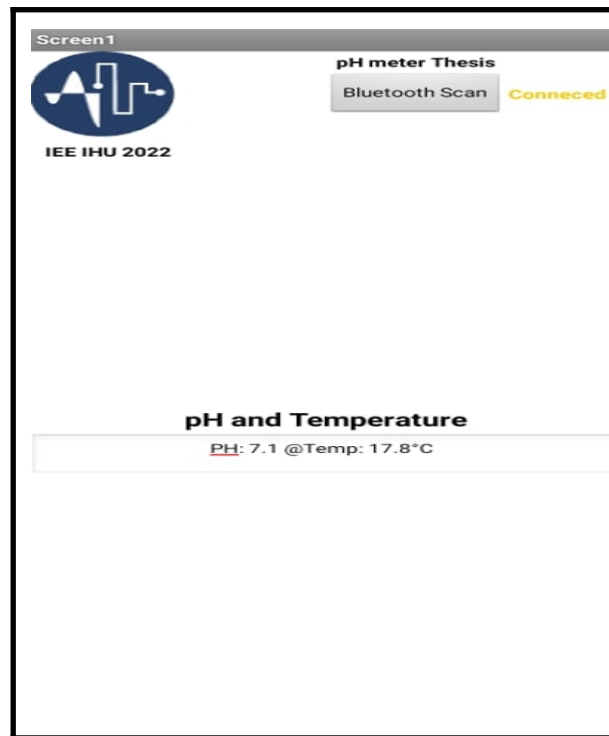
Είναι φανερό πως το μήνυμα που δίνεται στη συνάρτηση ως όρισμα, γράφεται με τον ίδιο τρόπο όπως και στην περίπτωση της οθόνης LCD. Επίσης η αρχικοποίηση της πλακέτας bluetooth γίνεται με την εντολή `uart = UART(1, 9600)` όπου ορίζεται ο UART διάλογος και ο ρυθμός μετάδοσης baud.



Κύκλωμα 5.3: Συνδεσμολογία μικροελεγκτή με την πλακέτα HC-05



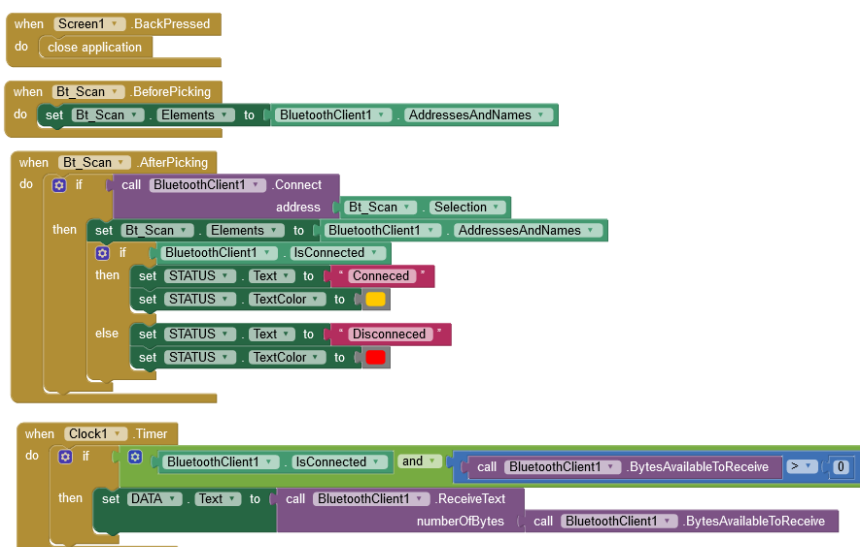
Εικόνα 5.9: Η πλακέτα HC-05



Εικόνα 5.10: Λήψη δεδομένων μέσω bluetooth σε Android εφαρμογή.

5.6.4 Android εφαρμογή για την Bluetooth επικοινωνία

Η εφαρμογή είναι ένα απλό πρόγραμμα που εκτυπώνει τα ληφθέντα δεδομένα σε ένα πλαίσιο κειμένου, με δυνατότητα επιλογής της bluetooth συσκευής στην οποία θα συνδεθεί. Η εφαρμογή δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας το online εργαλείο appinventor.mit.edu. Στην Εικόνα 5.12 εικονίζεται η εφαρμογή. Ο σχεδιασμός της εφαρμογής γίνεται με τη χρήση blocks ενώ ο προγραμματισμός γίνεται με παρόμοιο τρόπο που συναντάται σε εφαρμογές προγραμματισμού όπως το Scratch. Το πρόγραμμα της εφαρμογής είναι το παρακάτω.



Διάγραμμα 5.3: Πρόγραμμα Android εφαρμογής.

Κεφάλαιο 6 - Τροφοδοσία οργάνου και τελική κατασκευή

6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η μελέτη του τελευταίου βήματος της σχεδίασης, της τροφοδοσίας του οργάνου αλλά και της τελικής κατασκευής. Η τελική κατασκευή παρουσιάζεται σε τρεις μορφές σχηματικό, πλακέτα και πρωτότυπο σε διάτρητη πλακέτα (perfboard).

6.2 Τροφοδοσία οργάνου

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια η τροφοδοσία του οργάνου είναι μονοπολική και ίση με 5V. Η τροφοδοσία μπορεί να ληφθεί με διάφορους τρόπους, όπως για παράδειγμα ένα τροφοδοτικό που μετατρέπει την τάση δικτύου σε 5V DC. Για το όργανο που μελετάμε η τροφοδοσία επιλέχθηκε να λαμβάνεται από μπαταρίες καθώς με τη χρήση μπαταριών μπορούμε να έχουμε σταθερότερη τάση τροφοδοσίας χωρίς να επηρεάζεται η λειτουργία από τυχόν διακυμάνσεις της τάσης του δικτύου. Έτσι λοιπόν για την παροχή ενέργειας επιλέχθηκαν δύο μπαταρίες ιόντων λιθίου τύπου 18650 της εταιρείας XTAR με ενσωματωμένα συστήματα προστασίας. Τα χαρακτηριστικά των μπαταριών είναι

- Ονομαστική τάση 3.7V
- Χωρητικότητα 2600mAh
- 4.5A μέγιστο παρεχόμενο ρεύμα

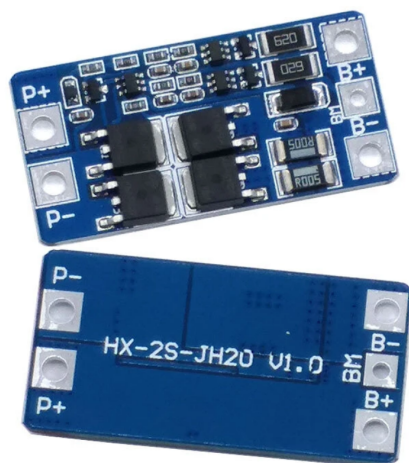
Το ενσωματωμένο σύστημα προστασίας της κάθε μπαταρίας προστατεύει τη μπαταρία από υπερφόρτωση, βραχυκύκλωμα, υπερφόρτιση και υπεραποφόρτιση.

Οι μπαταρίες συνδέονται σε ένα Battery Management System (BMS) και συγκεκριμένα στην πλακέτα HX-2S-JH20 2S V1.0 , η πλακέτα έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά

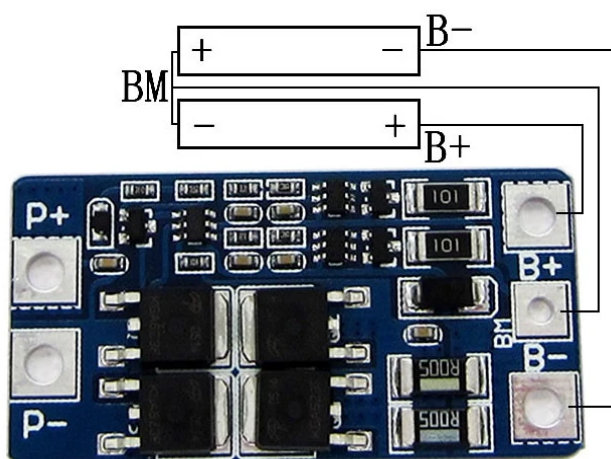
- Μέγιστο ρεύμα που μπορεί να παρέχει 10A
- Τάση φόρτισης 8.4V με 9V
- Δυνατότητα φόρτισης της κάθε μπαταρίας έως 4.25V
- Δυνατότητα υπεραποφόρτισης έως 2.5V έως 3V



Εικόνα 6.1: Επαναφορτιζόμενη μπαταρία 18650 3.7V -2600mAh XTAR



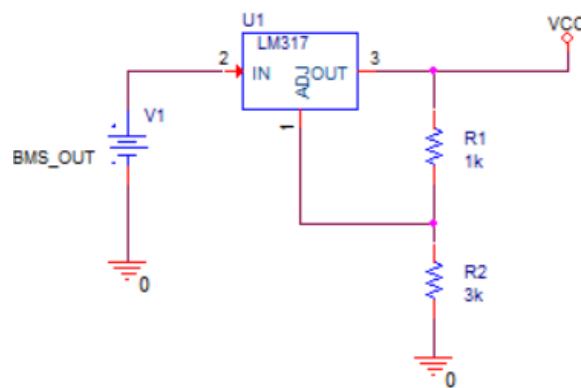
Εικόνα 6.2: Πλακέτα BMS HX-2S-JH20 V1.0



Εικόνα 6.3: Συνδεσμολογία μπαταριών με το BMS

Όπως φαίνεται και στο σχηματικό τα άκρα των μπαταριών B+ και B- συνδέονται με τα αντίστοιχα σημεία στην πλακέτα ενώ το κοινό άκρο συνδέεται με το BM. Τα τρία αυτά άκρα εκτός από τη χρήση τους που μας δίνει την τάση εξόδου χρησιμοποιούνται και για τη φόρτιση μέσω του BMS. Το BM χρησιμοποιείται και για τη φόρτιση κυρίως για να σταματήσει την παροχή ενέργειας στην μπαταρία που έχει φορτιστεί και να συνεχιστεί η φόρτιση της άλλης. Η τάση εξόδου του BMS λαμβάνεται από τους ακροδέκτες P+ και P-, οι ίδιοι ακροδέκτες χρησιμοποιούνται για τη φόρτιση των μπαταριών.

Με τις μπαταρίες να έχουν ονομαστική τάση 3.7V το BMS θα δώσει τάση εξόδου ίση με 7.4V ενώ αν είναι πλήρως φορτισμένες σε τάση 4.2V το BMS θα δώσει τάση εξόδου ίση με 8.4V. Γνωρίζοντας αυτό το γεγονός το επόμενο βήμα είναι η σχεδίαση ενός κυκλώματος που θα υποβιβάζει την τάση στα 5V. Για την επίτευξη αυτού του στόχου χρησιμοποιήθηκε το ολοκληρωμένο κύκλωμα voltage regulator LM317.



Κύκλωμα 6.1: Κύκλωμα τροφοδοσίας με το LM317

Η τάση εξόδου V_{cc} περιγράφεται από την εξίσωση

$$V_{cc} = 1.25 \cdot \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \quad (6.1)$$

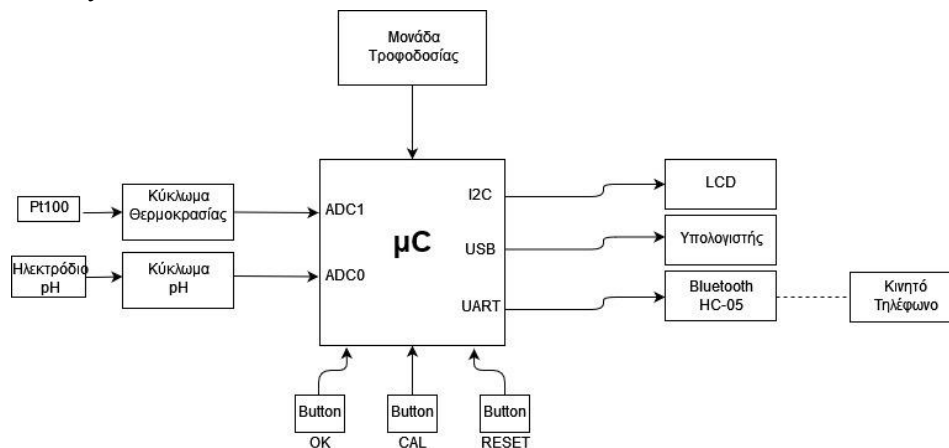
Θέτοντας την τάση εξόδου ίση με 5V και λύνοντας την εξίσωση, δημιουργείται η παρακάτω σχέση μεταξύ των αντιστάσεων $R1$ και $R2$.

$$R2 = 3 \cdot R1$$

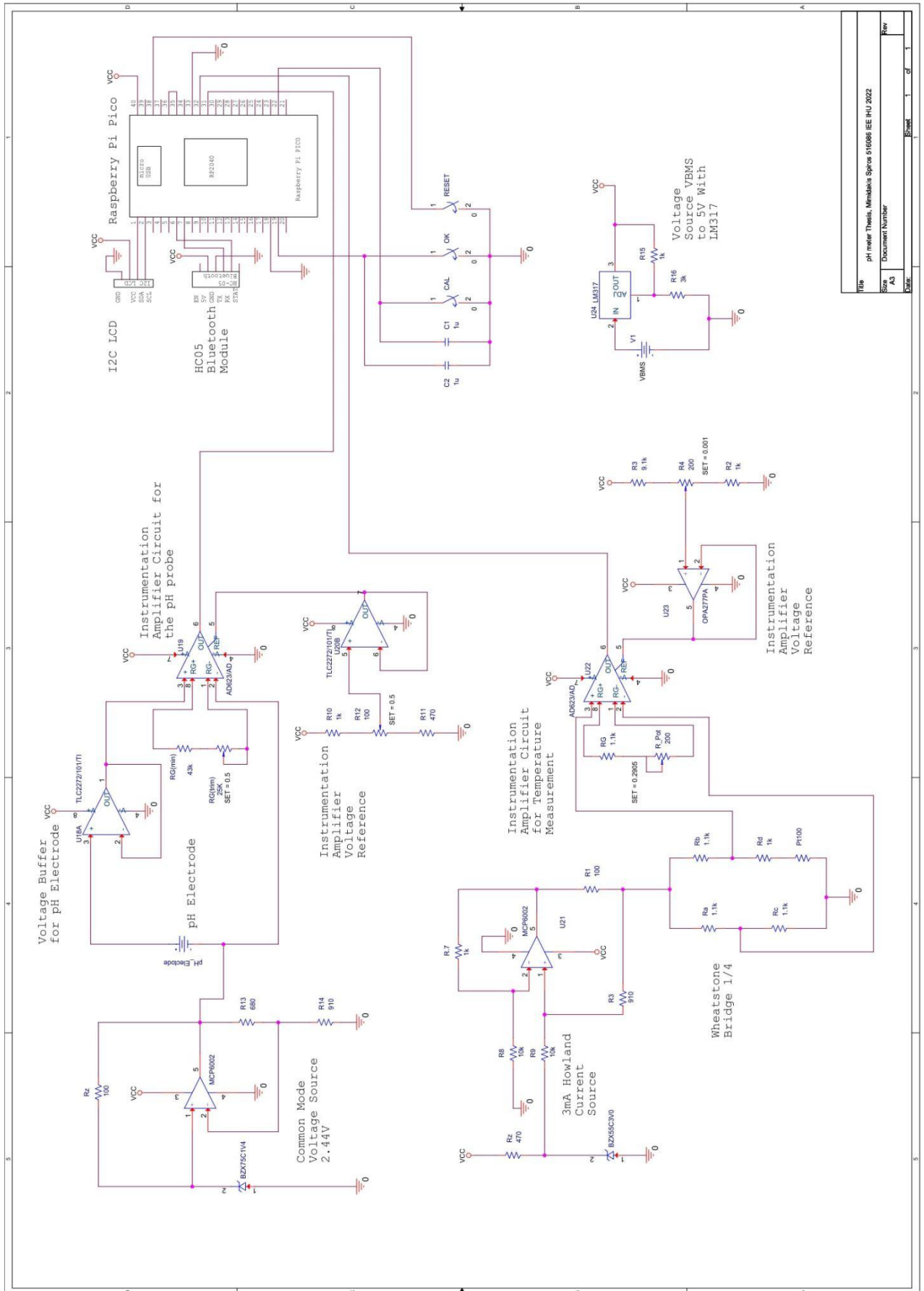
Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση επιλέχθηκαν οι αντιστάσεις $R1$ και $R2$, επιπλέον από την εξίσωση τάσης εξόδου βλέπουμε πως η ελάχιστη διαφορά τάσης μεταξύ εισόδου και εξόδου είναι 1.25V. Πειραματικά λοιπόν είδαμε πως η τάση εξόδου του κυκλώματος γίνεται ίση με 5V όταν η τάση εισόδου είναι ίση με 6V. Πρακτικά αυτό σημαίνει πως το όργανο μπορεί να λειτουργήσει και με πολύ μικρή τάση μπαταριών, σχεδόν στο όριο της πλήρους αποφόρτισης. Τέλος όσον αφορά το κύκλωμα με τις μπαταρίες και το BMS δεν έχει προστεθεί η δυνατότητα φόρτισης στο σύστημα, για τη φόρτιση των μπαταριών επομένως χρησιμοποιείται εξωτερικός φορτιστής.

6.3 Τελικό σχηματικό

Το τελικό σχηματικό μαζί με το μικροελεγκτή τα push button καθώς και την οθόνη LCD και την πλακέτα bluetooth είναι το παρακάτω, σχεδιασμένο σαν διάγραμμα βαθμίδων, block diagram, σχηματικό στο PSpice και σχηματικό στο online πρόγραμμα σχεδίασης πλακετών και ηλεκτρονικών κυκλωμάτων EasyEDA.

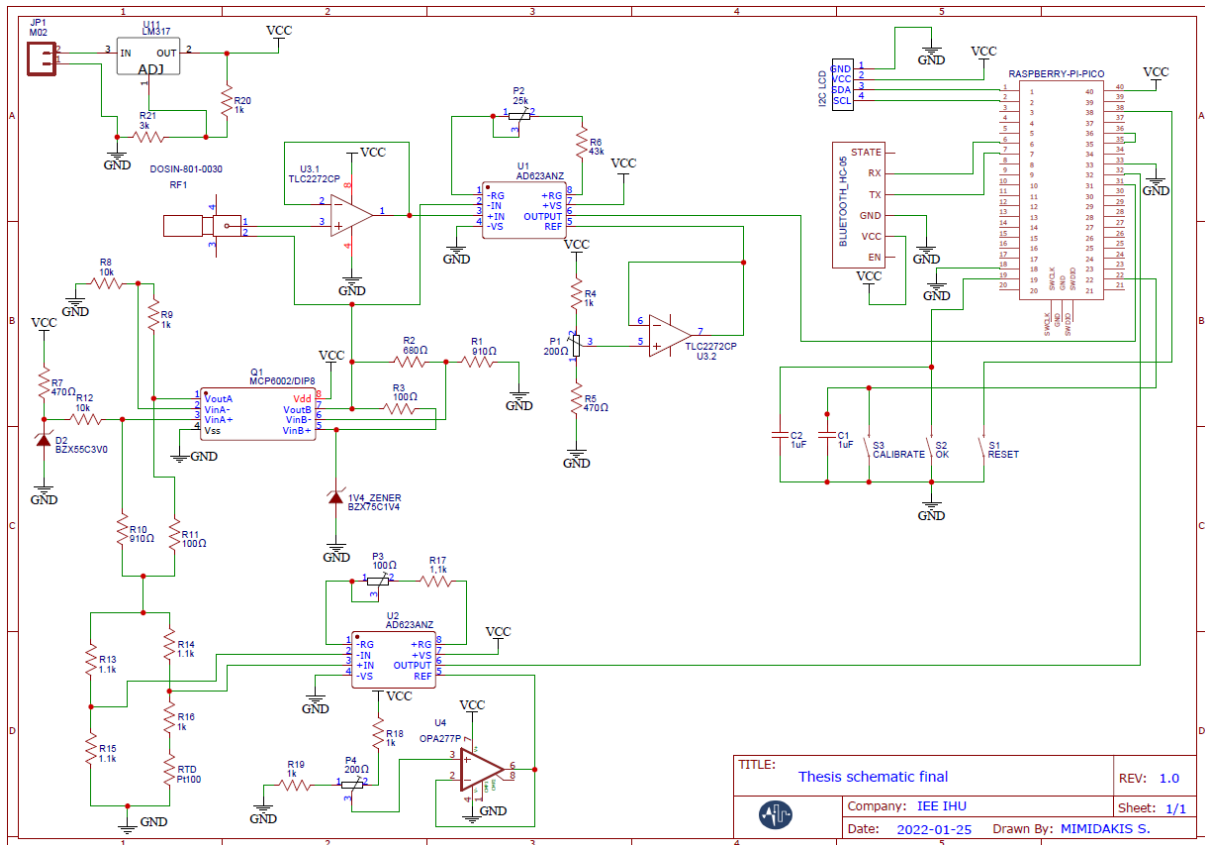


Διάγραμμα 6.1: Block διάγραμμα οργάνου μέτρησης



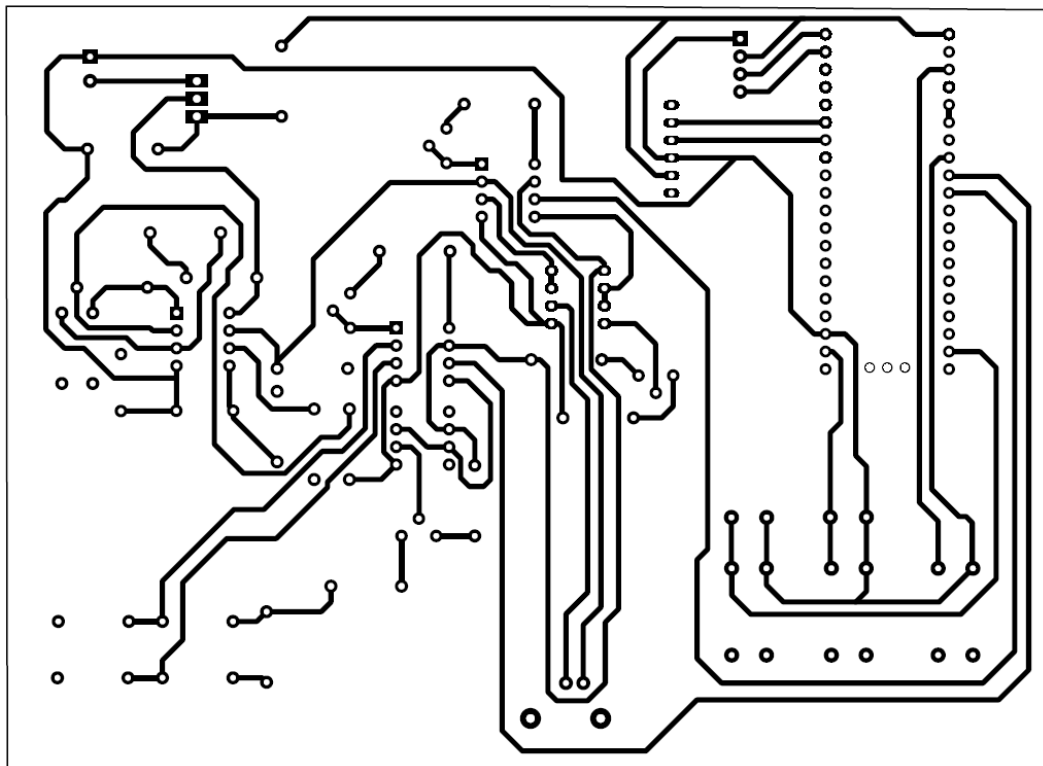
Κύκλωμα 6.2: Συνολικό κύκλωμα στο PSpice

Κεφάλαιο 6

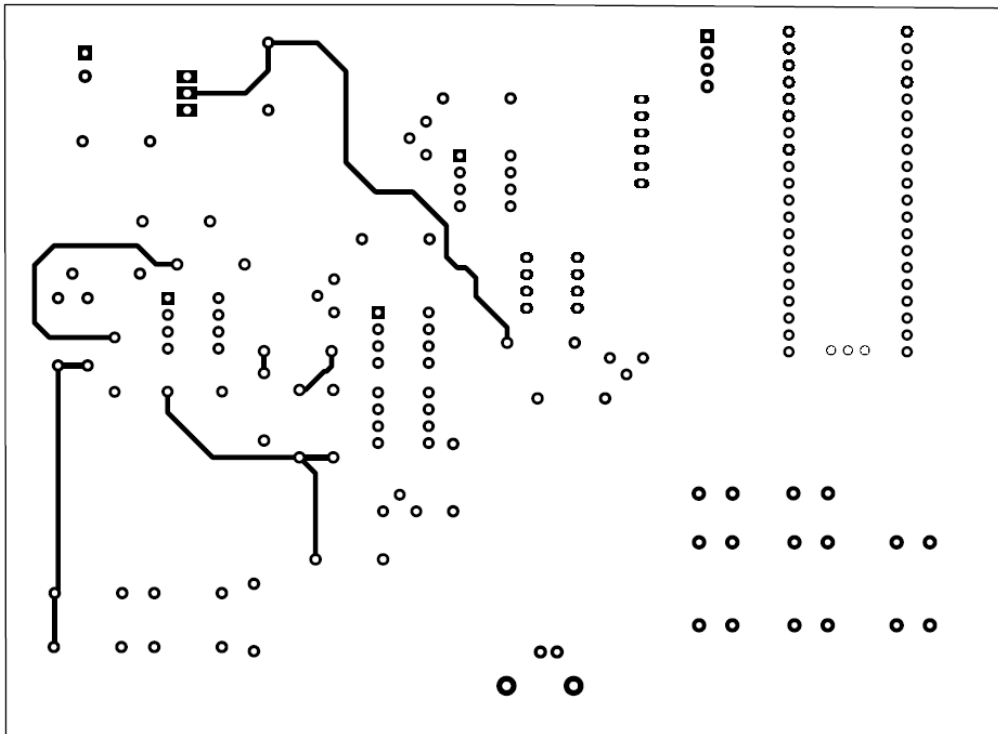


Κύκλωμα 6.3: Τελικό σχηματικό στο EasyEDA

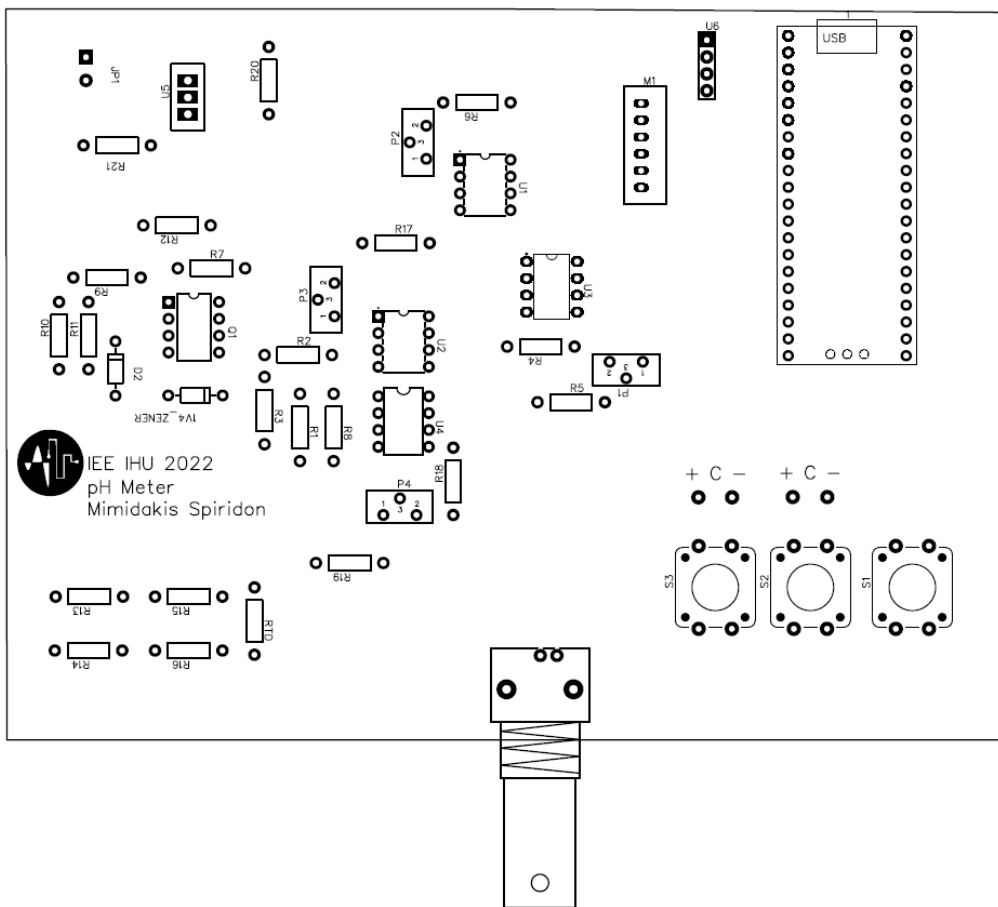
Σχεδιάζοντας την πλακέτα με χαρακτηριστικά μήκος 150mm, πλάτος 110mm με δύο όψεις και πάχος αγωγού 0.75 χιλιοστά. Οι όψεις της πλακέτας είναι.



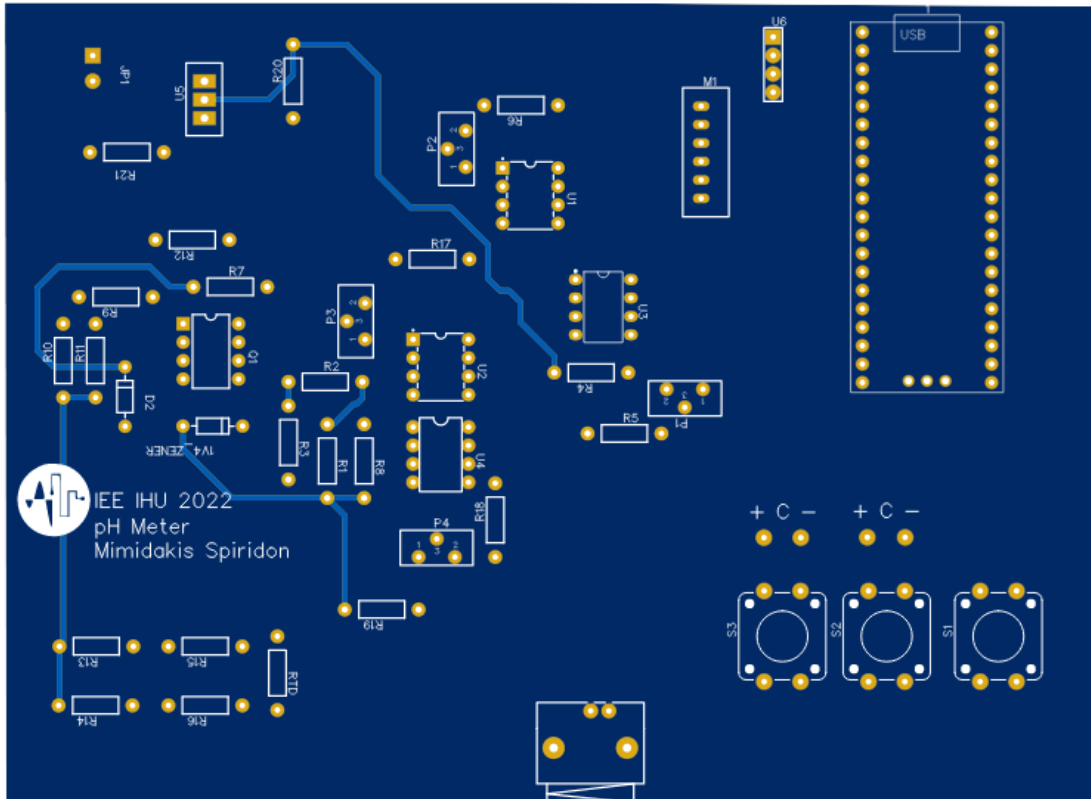
Εικόνα 6.4: Κάτω όψη πλακέτας



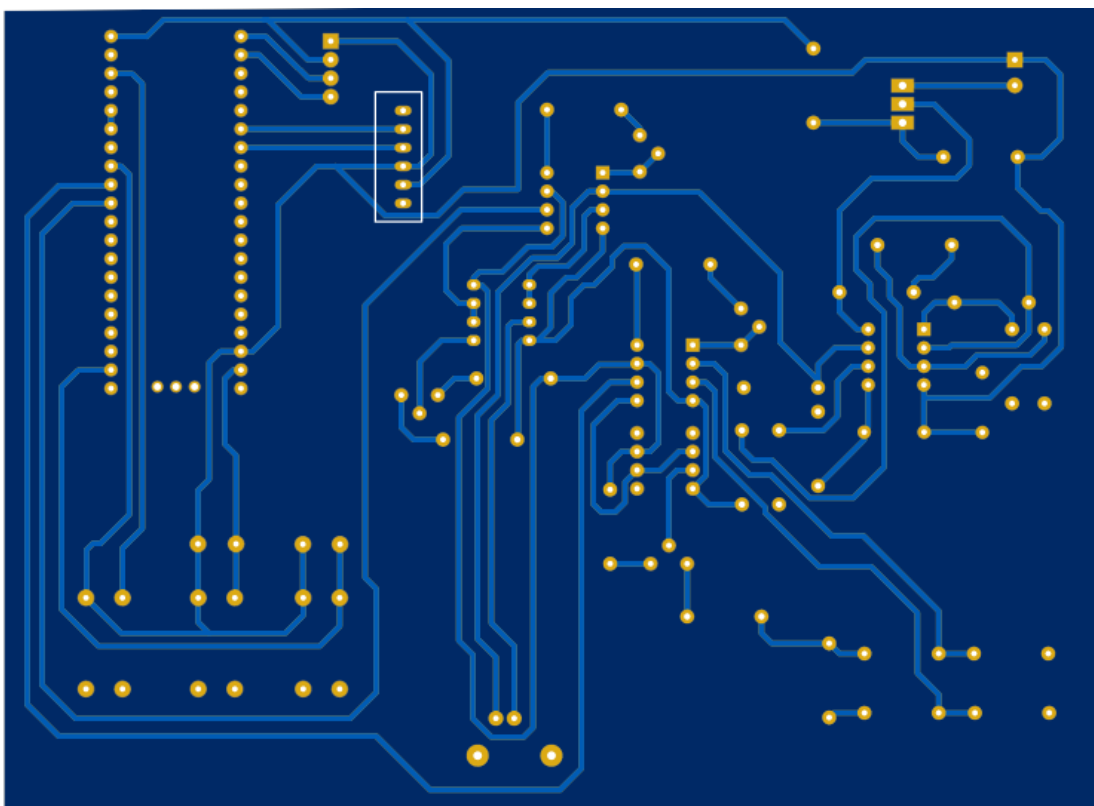
Εικόνα 6.5: Πάνω όψη πλακέτας



Εικόνα 6.6: Silk Screen πλακέτας



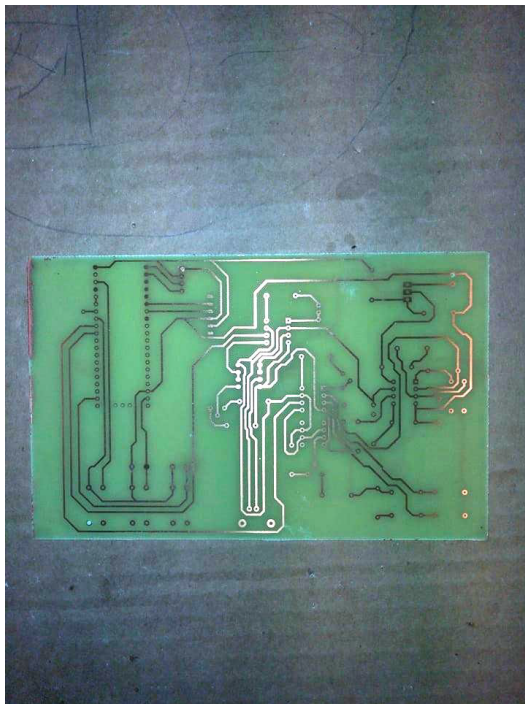
Εικόνα 6.7: Πάνω όψη πλακέτας 2D εικόνα



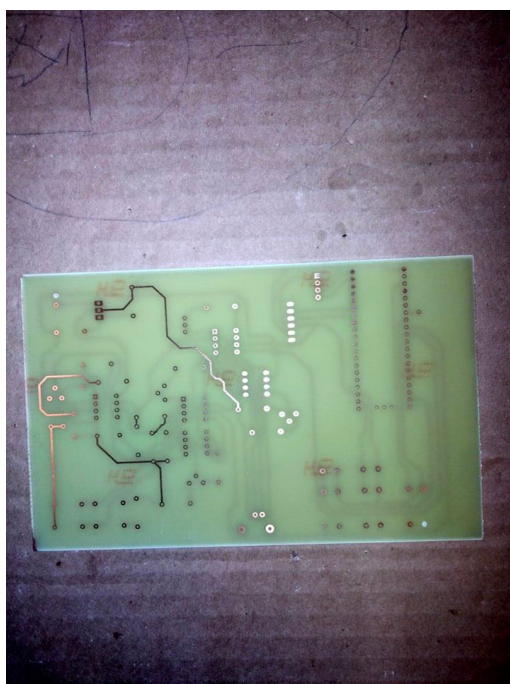
Εικόνα 6.8: Κάτω όψη πλακέτας 2D εικόνα

6.4 Κατασκευή σε πλακέτα και κουτί

Η τελική κατασκευή της πλακέτας έγινε με φωτοευαίσθητη πλακέτα διπλής όψης διαστάσεων 160mm x 100mm. Η χάραξη έγινε με τη χρήση χημικών για την εμφάνιση των αγωγών του κυκλώματος και την αποχάλκωση. Η πλακέτα όπως επίσης οι μπαταρίες το BMS και τα περιφερειακά του μικροελεγκτή τοποθετήθηκαν σε πλαστικό κουτί.



Εικόνα 6.9: Κάτω όψη πλακέτας



Εικόνα 6.10: Πάνω όψη πλακέτας



Εικόνα 6.11: Τελική κατασκευή [1]



Εικόνα 6.12: Τελική κατασκευή [2]

Κεφάλαιο 7 - Προτάσεις χρήσης και μετρήσεις δειγμάτων

7.1 Εισαγωγή

Στο τελευταίο αυτό κεφάλαιο δίνονται προτάσεις για τη χρήση του οργάνου, καθώς και τους τρόπους αποθήκευσης και συντήρησης του ηλεκτροδίου. Επίσης παρουσιάζονται μετρήσεις pH σε διάφορα διαλύματα με τις δύο μεθόδους βαθμονόμησης.

7.2 Χρήση του οργάνου

Πριν από κάθε μέτρηση το όργανο πρέπει να βαθμονομηθεί, για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται ρυθμιστικά διαλύματα με τιμές pH 7 και 4. Η βαθμονόμηση γίνεται βυθίζοντας το ηλεκτρόδιο στο ρυθμιστικό διάλυμα με pH 7 και περιμένουμε έως ότου σταθεροποιηθεί η ένδειξη, όταν σταθεροποιηθεί η ένδειξη προχωράμε στο επόμενο βήμα βυθίζοντας το ηλεκτρόδιο στο ρυθμιστικό διάλυμα με pH 4, όταν σταθεροποιηθεί και σ' αυτή την περίπτωση η ένδειξη ξανα βυθίζουμε το ηλεκτρόδιο στο ρυθμιστικό διάλυμα με pH 7 για να διαπιστώσουμε πως η βαθμονόμηση έχει γίνει σωστά. Λόγω της δυνατότητας βαθμονόμησης με hardware και software για την κάθε περίπτωση η βαθμονόμηση θα είναι διαφορετική.

7.2.1 Βαθμονόμηση Hardware

Για να βαθμονομηθεί το όργανο μέσω hardware δεν χρειάζεται να εισαχθεί κάποια ρουτίνα βαθμονόμησης. Ο τρόπος διόρθωσης των μετρήσεων είναι μικτός δηλαδή αναλογικός και ψηφιακός ταυτόχρονα. Αρχικά η αναλογική διόρθωση, γίνεται αποκλειστικά με τα ποτενσιόμετρα και αφορά την τάση αναφοράς του ενισχυτή οργανολογίας και το κέρδος του κυκλώματος. Η ρύθμιση αυτή γίνεται μία φορά κατά την κατασκευή του οργάνου και την πρώτη φορά που θα χρησιμοποιηθεί το ηλεκτρόδιο. Επίσης σε περίπτωση που κάποιο μέρος του κυκλώματος καταστραφεί, με την αντικατάστασή του είναι αναγκαία πάλι η βαθμονόμηση μέσω hardware. Ταυτόχρονα το ψηφιακό μέρος της βαθμονόμησης υπολογίζει το κέρδος του ενισχυτή συναρτήσει της θερμοκρασίας όπως φαίνεται και στις παρακάτω εξισώσεις.

$$RG(trim) = 1 - \frac{100k}{\frac{3-V_{ref}}{E_0} - 1} - RG(min) \quad (7.1)$$

$$G = 1 + \frac{100k}{RG(min)+RG(trim)} \quad (7.2)$$

Ο μικροελεγκτής μετρώντας τη θερμοκρασία ταυτόχρονα υπολογίζει το κέρδος που πρέπει να έχει το κύκλωμα του ηλεκτροδίου στη μετρούμενη θερμοκρασία. Αμέσως μετά τον υπολογισμό του κέρδους λύνεται η εξίσωση της τάσης εξόδου του κυκλώματος ως προς τη διαφορά δυναμικού του ηλεκτροδίου με τελικό βήμα την επίλυση της εξίσωσης Nernst ως προς το pH.

$$E = \frac{V_0 - V_{Ref}}{G} \quad (7.3)$$

$$pH = \frac{E - E_0}{-2.303 \frac{RT}{nF}} \quad (7.4)$$

Σημαντικό σε αυτή τη διαδικασία είναι το γεγονός πως το φυσικό κέρδος του ενισχυτή οργανολογίας είναι αμετάβλητο και συγκεκριμένα η τιμή του κέρδους είναι η μέγιστη που έχει υπολογιστεί δηλαδή 3.296. Ο συλλογισμός πίσω από αυτή την απόφαση είναι πως είναι αδύνατο για το χρήστη σε κάθε μέτρηση να ρυθμίζει συνεχώς το κέρδος του ενισχυτή, η θερμοκρασία ενδέχεται να μην είναι σταθερή από δείγμα σε δείγμα επομένως ορίζοντας το κέρδος στο κύκλωμα σε μία σταθερή τιμή ο μικροελεγκτής υπολογίζει αυτόματα το κέρδος και το pH χωρίς να υπάρχει παρέμβαση στο κύκλωμα. Ανάλογη μέτρηση μπορεί να γίνει αν το κέρδος του ενισχυτή έχει οριστεί στη μικρότερη τιμή που έχουμε υπολογίσει.

7.2.2 Βαθμονόμηση Software

Για τη βαθμονόμηση μέσω software αρχικά πρέπει να εισαχθεί το πρόγραμμα σε μια ρουτίνα βαθμονόμησης. Στην περίπτωση αυτή όπως είδαμε και στο κεφάλαιο 5 για το πρώτο δείγμα το πρόγραμμα αποθηκεύει την τάση του κυκλώματος του ηλεκτροδίου για pH 7 ενώ για το δεύτερο δείγμα αποθηκεύεται η τάση του ηλεκτροδίου για pH 4. Όταν ολοκληρωθεί η βαθμονόμηση καλείται η κατάλληλη συνάρτηση και το πρόγραμμα εκτελείται για βαθμονόμηση μέσω software. Στον τρόπο αυτό βαθμονόμησης μπορεί να γίνει επέμβαση στο hardware του οργάνου, πάλι με ρύθμιση των ποτενσιομέτρων, έτσι ώστε οι τιμές pH που μετρώνται να είναι προσεγγιστικά ταυτόσημες με τις ονομαστικές τιμές pH των ρυθμιστικών διαλυμάτων. Όμως το σημαντικό στην βαθμονόμηση αυτή είναι πως το όργανο μπορεί να βαθμονομηθεί και χωρίς επέμβαση στο hardware καθώς οι τάσεις που μετρώνται από το μικροελεγκτή αντιστοιχίζονται στις τιμές pH 7 και 4. Η βαθμονόμηση και με τους δύο τρόπους καθώς και οι διαφορές τους παρουσιάζονται παρακάτω καθώς με το τελικό όργανο έγιναν μετρήσεις pH για τέσσερα διαφορετικά διαλύματα.

7.3 Αποθήκευση και συντήρηση του ηλεκτροδίου

Το ηλεκτρόδιο είναι το σημαντικότερο εξάρτημα του οργάνου και αυτό γιατί όλη η λειτουργία του οργάνου βασίζεται γύρω από το ηλεκτρόδιο. Επίσης λόγω του ότι έχουμε ηλεκτρόδιο γυαλιού πρέπει να ακολουθούνται κάποια συγκεκριμένα βήματα για την συντήρηση και την αποθήκευσή του, καθώς και κατά τις μετρήσεις.

- Το ηλεκτρόδιο πρέπει να είναι αποθηκευμένο μέσα σε ρυθμιστικό διάλυμα, συνήθως αποθηκεύονται σε διαλύματα με pH 7, με τον τρόπο αυτό ο γυάλινος “γλόμπος” είναι αφυδατωμένος και το ηλεκτρόδιο έτοιμο για χρήση.
- Το εσωτερικό διάλυμα πρέπει να είναι χλωριούχο κάλιο και συγκεκριμένα 3N KCl, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την αποθήκευση του ηλεκτροδίου.
- Πριν, μετά και μεταξύ των μετρήσεων το ηλεκτρόδιο πρέπει να πλένεται με απιονισμένο νερό.
- Πριν βυθιστεί σε διάλυμα για μέτρηση πρέπει να σκουπίζεται προσεκτικά το ηλεκτρόδιο με πανί υφασμάτινο ή χάρτινο, χωρίς να μείνουν υπολείμματα στο γυαλί.
- Αν υπάρξει ρωγμή ή σπάσιμο στο γυαλί το ηλεκτρόδιο πρέπει να αντικατασταθεί.

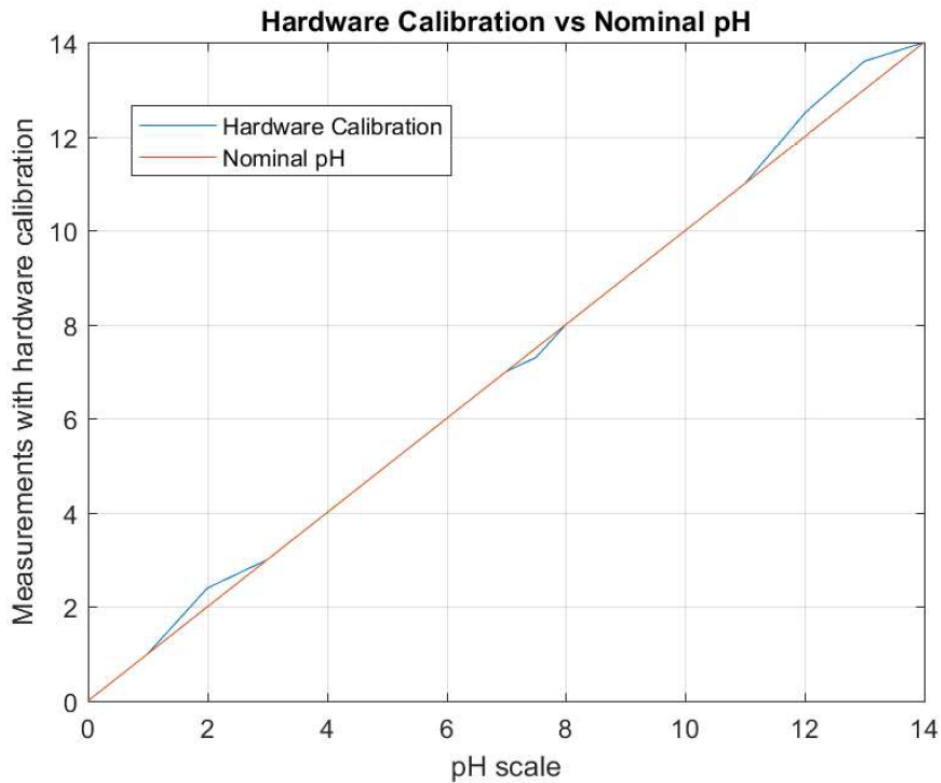
7.4 Μετρήσεις διαλυμάτων

Για να διαπιστωθεί η σωστή λειτουργία του οργάνου, έγιναν μετρήσεις pH σε τέσσερα διαλύματα με διάφορες τιμές pH. Χυμός λεμόνι, εμφιαλωμένο νερό, υδατικό διάλυμα καθαριστικής χλωρίνης, υδατικό διάλυμα καυστικής σόδας. Για να εξακριβωθούν οι τιμές pH των διαλυμάτων χρησιμοποιήθηκε πεχαμετρικό χαρτί και οι ενδείξεις στις συσκευασίες των διαλυμάτων. Για το χυμό

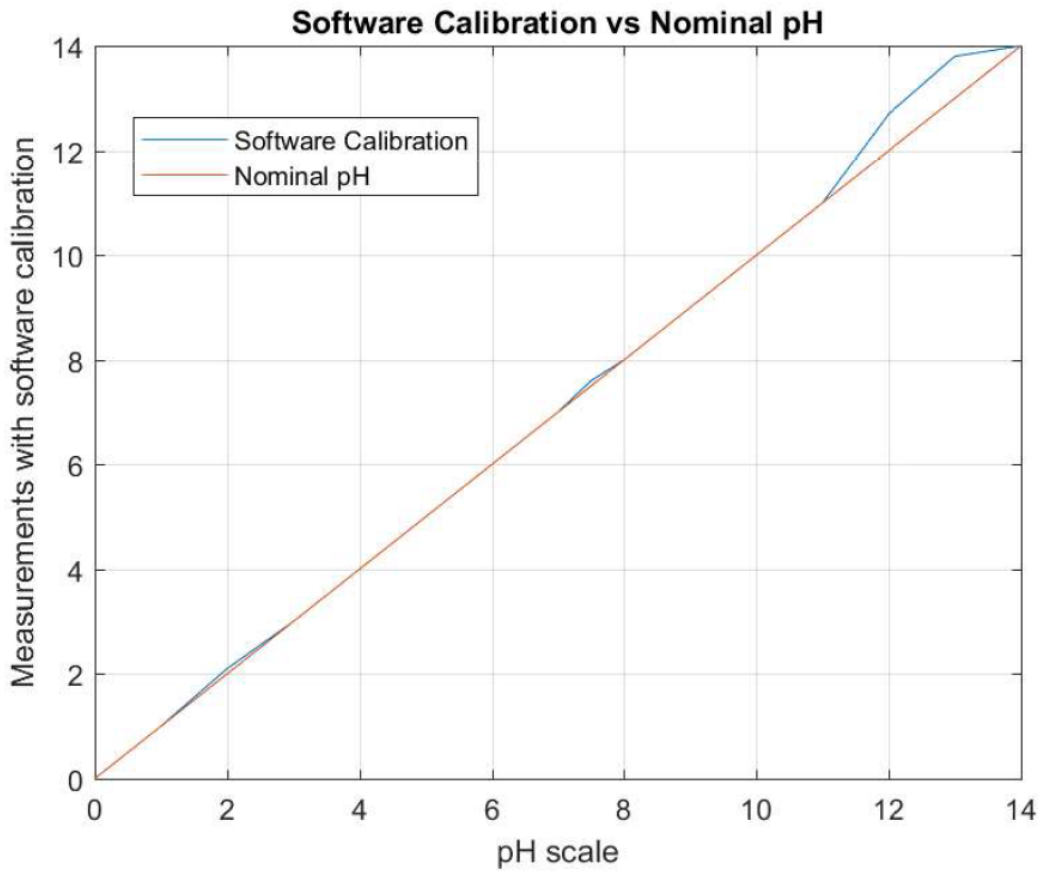
λεμόνι με τη χρήση του χαρτιού το pH μετρήθηκε μεταξύ 2 και 3, ενώ για το υδατικό διάλυμα καυστικής σόδας μετρήθηκε μεταξύ 13 με 14. Για το εμφιαλωμένο νερό μετρήθηκε μεταξύ 7 με 8 όμως στη φιάλη αναγράφεται ενδεικτική τιμή pH 7.5 . Η μέτρηση της χλωρίνης δεν μπόρεσε να γίνει με το χαρτί καθώς με το που βυθίζεται το χαρτί αποχρωματίζεται έτσι μέσω των τιμών που δίνονται από διάφορες μετρήσεις που αναγράφονται σε βιβλία χημείας καθορίστηκε pH με τιμή περίπου 12. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι μετρήσεις του οργάνου με τους δύο τρόπους βαθμονόμησης σε σχέση με τα παραπάνω δεδομένα.

Πίνακας 7.1: Μετρούμενες τιμές pH με δύο τρόπους βαθμονόμησης

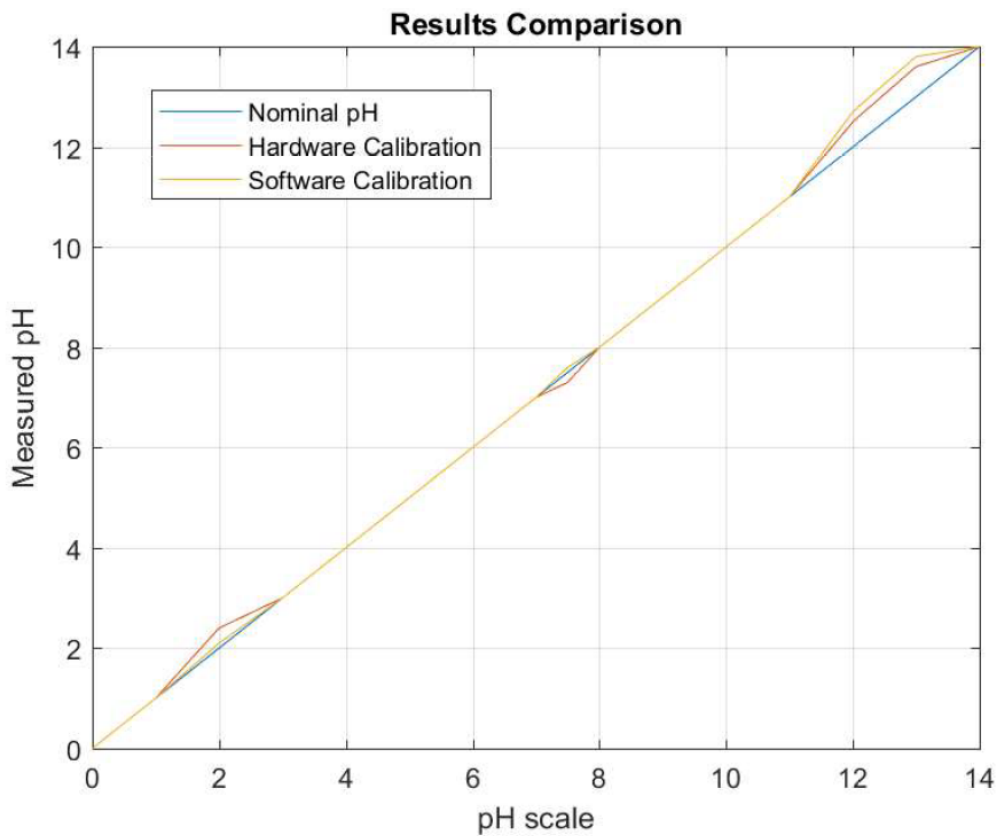
	Χυμός Λεμόνι	Εμφ. Νερό	Χλωρίνη	Καυσ. Σόδα
pH	2	7.5	~12	13-14
pH(hardwareCal)	2.4	7.3	12.5	13.6
pH(softwareCal)	2.1	7.6	12.7	13.8



Διάγραμμα 7.1: Μετρούμενες τιμές pH με hardware βαθμονόμηση (γραφικά)

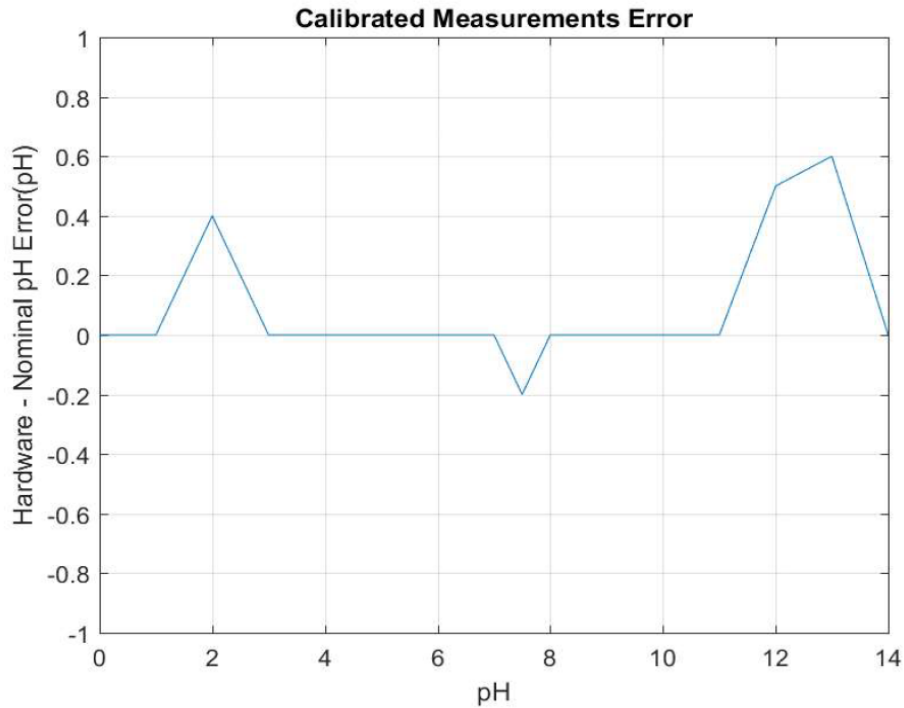


Διάγραμμα 7.2: Μετρούμενες τιμές pH με software βαθμονόμηση (γραφικά)

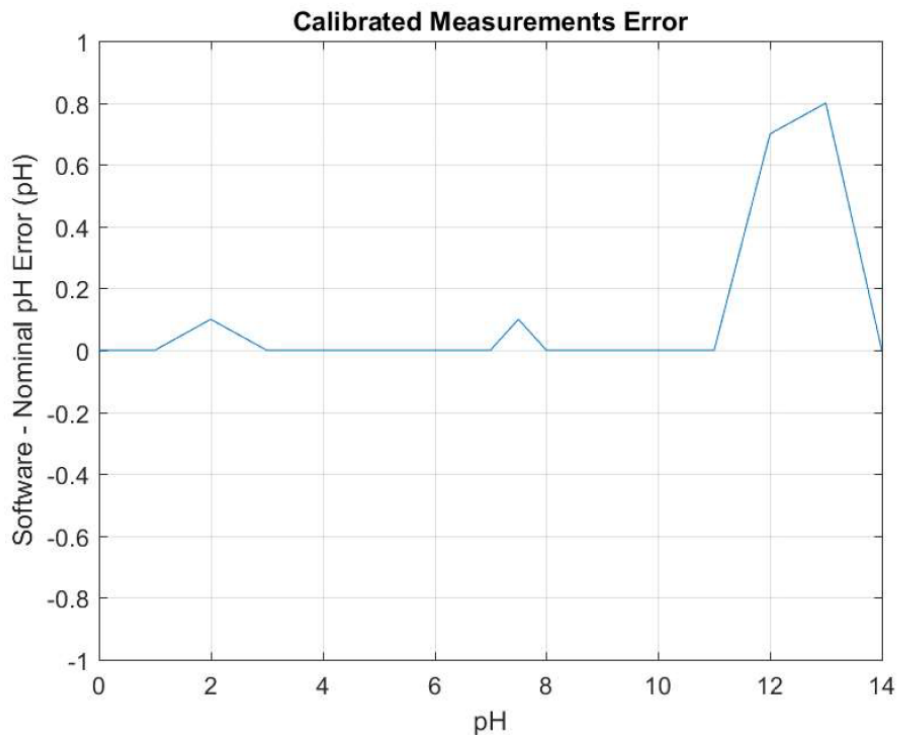


Διάγραμμα 7.3: Μετρούμενες τιμές pH με βαθμονόμηση σε σχέση με την ονομαστική τιμή pH (γραφικά)

Όπως φαίνεται και στα παραπάνω γραφήματα οι μετρήσεις με hardware και software βαθμονόμηση διαφέρουν με τη μέτρηση που έγινε με το πεχαμετρικό χαρτί και αυτό γιατί οι μετρήσεις αυτές έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με το χαρτί, όμως και μεταξύ τους διαφέρουν με τη software βαθμονόμηση να είναι πιο ακριβής από τη hardware με χαρακτηριστικό παράδειγμα τη μέτρηση στο εμφιαλωμένο νερό.



Διάγραμμα 7.4: Σφάλμα μεταξύ hardware βαθμονόμησης και ονομαστικής τιμής pH



Διάγραμμα 7.5: Σφάλμα μεταξύ software βαθμονόμησης και ονομαστικής τιμής pH

Πίνακας 7.2: Σφάλματα βαθμονομήσεων

pH	2	7.5	12	13-14
Hardware Error	0.4	-0.2	0.5	0.6
Software Error	0.1	0.1	0.7	0.8

Το σφάλμα των μετρήσεων με software βαθμονόμηση με τις ονομαστικές τιμές pH είναι σταθερή στο εύρος pH 2 - 7.5 αυτό συμβαίνει γιατί λόγω της βαθμονόμησης το σφάλμα μεταξύ μετρούμενης και ονομαστικής τιμής τείνει να ελαχιστοποιηθεί για τιμές pH κοντά σε αυτές που έχουμε χρησιμοποιήσει για τη βαθμονόμηση. Επιπλέον για τιμές pH πολύ μεγαλύτερες από 7 βλέπουμε πως υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ μέτρησης και ονομαστικής τιμής pH, αυτό οφείλεται πρώτον στο γεγονός πως με το πεχαμετρικό χαρτί οι τιμές pH 13 και 14 έχουν σχεδόν το ίδιο χρώμα με αποτέλεσμα να είναι δύσκολη η διάκρισή τους όπως επίσης και στη μέτρηση της χλωρίνης που το χαρτί αποχρωματίζεται και έχουμε βασιστεί για τη μέτρησή της στο γεγονός πως έχει pH γύρω στο 12. Δεύτερον η αβεβαιότητα οφείλεται στο γεγονός πως η βαθμονόμηση του οργάνου είναι βαθμονόμηση δύο σημείων, με τη μέθοδο αυτή οι μετρήσεις που γίνονται ανάμεσα και κοντά στα σημεία βαθμονόμησης τείνουν να είναι περισσότερο ακριβείς από αυτές που γίνονται σε σημεία με μεγαλύτερη διαφορά από τα σημεία βαθμονόμησης. Για να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα αυτό πρέπει να γίνεται βαθμονόμηση τριών σημείων πράγμα που σημαίνει πως θα χρειαστούν τρία ρυθμιστικά διαλύματα με pH < 7, pH = 7 και pH > 7 καθώς και αλλαγή στο πρόγραμμα του μικροελεγκτή που είναι υπεύθυνο για τη βαθμονόμηση.

Κεφάλαιο 8 - Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης

8.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της μελέτης και της χρήσης του οργάνου όπως και προτάσεις βελτίωσης.

8.2 Συμπεράσματα

Από τη μελέτη και τη σχεδίαση των συστημάτων του οργάνου βλέπουμε πως η θεωρητική με την πειραματική μελέτη στα μετρούμενα δεδομένα ταυτίζονται. Επομένως τα κυκλώματα λειτουργούν ορθά. Όπως και τα συστήματα που συνδέονται με το μικροελεγκτή. Στα πλαίσια της μέτρησης pH οι μετρήσεις παρουσιάζουν κάποιες διαφορές, αυτό γίνεται λόγω της βαθμονόμησης και των δύο μεθόδων που χρησιμοποιούνται. Μέσω των δύο μεθόδων βαθμονόμησης βλέπουμε και τη διαφορά μεταξύ της μέτρησης απευθείας από τα ηλεκτρονικά κυκλώματα σε σχέση με τη μέτρηση από βαθμονομημένο όργανο. Επιπλέον έχουμε τη δυνατότητα να λάβουμε τα δεδομένα των μετρήσεων ασύρματα και ενσύρματα, πράγμα που σημαίνει πως υπάρχει η δυνατότητα επικοινωνίας του οργάνου με άλλα συστήματα για τη μεταφορά των δεδομένων. Εν κατακλείδι βλέπουμε πως το όργανο λειτουργεί ικανοποιητικά και η ακρίβεια των μετρήσεων pH είναι μεγάλη.

8.3 Προτάσεις Βελτίωσης

Μια σημαντική βελτίωση για το όργανο είναι η ανάπτυξη ενός συστήματος ένδειξης της ενέργειας που έχουν αποθηκευμένες οι μπαταρίες και η δυνατότητα της ένδειξης να δίνεται από το μικροελεγκτή με τη χρήση ενός πλήκτρου. Επίσης σημαντική είναι η προσθήκη ενός συστήματος φόρτισης των μπαταριών έτσι ώστε να μην χρειάζεται η αφαίρεσή τους από το όργανο. Να σημειωθεί πως με το υπάρχον BMS μπορεί να επιτευχθεί φόρτιση όμως οι ακροδέκτες που μας παρέχουν την τάση των μπαταριών χρησιμοποιούνται και ως ακροδέκτες φόρτισης. Επιπρόσθετα στο όργανο μπορεί να προστεθεί η δυνατότητα αποστολής των δεδομένων μέσω WiFi και η διασύνδεσή του με άλλα συστήματα μετρήσεων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλία

[1] Χημεία Α' ΓΕΝΙΚΟΥ ΛΥΚΕΙΟΥ, Σ.Λιοδάκης, Δ.Γάκης, Δ.Θεοδωρόπουλος, Π.Θεωδορόπουλος, Α.Κάλλης, ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΕΚΔΟΣΕΩΝ <<ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ>>.

[2] Χημεία Γ' Γυμνασίου, Π.Θεοδωρόπουλος Π.Παπαθεοφάνους Φ.Σιδέρη, ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΕΚΔΟΣΕΩΝ <<ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ>>.

[3] Electrochemistry - Theory and Practice, Dr.Axel Bier, HACH, 12/2018, Edition 3.

[4] Essentials of pH Measurement, Tim Meirose, ThermoFisher SCIENTIFIC.

[6] ΤΑ ΛΥΜΑΤΑ ΩΣ ΠΗΓΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΥΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΟΝ ΤΡΟΠΟ ΖΩΗΣ ΤΗΣ ΚΟΙΝΟΤΗΤΑΣ - ΕΠΙΔΗΜΙΟΛΟΓΙΑ ΛΥΜΑΤΩΝ, ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, ΗΛΙΑΝΑ ΤΣΟΛΙΟΥ, ΕΑΠ ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ, ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ.

[7] pH Measurement Electrode Basics, OMEGA™

[8] pH Composite Electrode Specification, Datasheet Ηλεκτροδίου.

[9] Robert B. Northrop, Introduction to INSTRUMENTATION AND MEASUREMENTS Second Edition, Taylor & Francis Group

[10] "Αναλογική επεξεργασία σημάτων αισθητηρίων", Σπάσος Μ., Εκδόσεις Αιβάζη

[11] Get started with MicroPython on Raspberry Pi Pico, Gareth Halfacree, Ben Everald, Raspberry Pi PRESS.

Application Notes

[1] Analysis of Improved Howland Current Pump Configurations, Texas Instruments, Copyright 2020

Internet Sites

[1] Ion Sensitive Field-Effect Transistor-ISFET Working Principle, elprocus.com. Available: <https://www.elprocus.com/ion-sensitive-field-effect-transistor-isfet-working-principle/>

[2] pH measurements - Potentiometric pH measurement, Inst Tools. Available: <https://instrumentationtools.com/ph-measurement/>

[3] Nernst equation, pH-meter.info. Available: <http://www.ph-meter.info/pH-Nernst-equation>

- [4] Relation to the chemical equilibrium, Nernst equation. Available:
https://en.wikipedia.org/wiki/Nernst_equation#Relation_to_the_chemical_equilibrium
- [5] pH Calibration Procedure and sample pH measurement, MONASH Scientific. Available:
<http://www.monashscientific.com.au/pHCalibrationProceedure.htm#ThreePointCalibration>
- [6] Interfacing 16x2 LCD Display with Raspberry Pi Pico, How to Electronics.
Available:<https://how2electronics.com/interfacing-16x2-lcd-display-with-raspberry-pi-pico/>
- [7] Programming Raspberry Pi Pico with MicroPython | A Beginner's Guide, Electronics Hub.
Available: <https://www.electronicshub.org/raspberry-pi-pico-micropython-tutorial/>
- [8] How to Interface UART Communication Using MicroPython. Available:
<https://www.iottrends.tech/blog/how-to-interface-uart-communication-using-micropython/>

Data Sheet

- [1] RP2040 Datasheet A microcontroller by Raspberry Pi, Raspberry Pi Trading Ltd.
- [2] AD623, Single and Dual-Supply, Rail-to-Rail, Low Cost Instrumentation Amplifier, Analog Devices.
- [3] MCP6001/1R/1U/2/4, 1MHz, Low-Power Op Amp, Microchip
- [4] OPA277, High Precision OPERATIONAL AMPLIFIERS, Burr-Brown Products from Texas Instruments
- [5] TLC227x, TLC227xA: Advanced LinCMOS Rail-to-Rail Operational Amplifiers, Texas Instruments

Πηγές Εικόνων

Εικόνα 1.1:

<https://blog.farmacon.gr/katigories/tekniki-arthrografia/kalliergitikes-praktikes/item/2043-ti-einai-to-p-h-kai-me-poio-tropo-epireazei-ta-kalliergoymena-fyta>

Εικόνα 1.2: Χημεία Γ' ΓΕΝΙΚΟΥ ΛΥΚΕΙΟΥ, Ομάδας Προσανατολισμού Θετικών Σπουδών & Σπουδών Υγείας

Εικόνα 1.3: <https://el.wikipedia.org/wiki/PH>

Εικόνα 1.4: HACH Electrochemistry - Theory and Practice

Εικόνα 1.5.1: ThermoFisher Scientific Essentials of pH Measurements

Εικόνα 1.5.2: ThermoFisher Scientific Essentials of pH Measurements

Εικόνα 1.6:

https://www.researchgate.net/figure/Difference-between-metal-oxide-semiconductor-field-effect-transistor-MOSFET-and_fig2_318413759

Εικόνα 1.7:

<https://www.endress.com/en/media-center/news-and-press-releases/pH-ISFET-sensor-Memosens-CPS77D>

Εικόνα 2.1: <https://www.takealot.com/dfrobot-gravity-analog-ph-sensor-meter-kit-v2/PLID70902463>

Εικόνα 5.2: <https://gr.mouser.com/new/raspberry-pi/raspberry-pi-rp2040-chip/>

Εικόνα 5.3: <https://www.electroschematics.com/raspberry-pi-pico-first-look-part-1/>

Εικόνα5.8:

<https://microcontrollerslab.com/hc-05-bluetooth-module-pinout-examples-arduino-applications/?fbclid=IwAR0bzK0qvaihSh3GhgukrzDXTZR-0luddBnjcj3Ctse1Xc4zh2M0byzww68>

Εικόνα 6.1: <https://grobotronics.com/battery-rechargeable-18650-3.7v-2600mah-xtar.html>

Εικόνα6.2:

<https://www.cableworks.gr/ilektronika/arduino-and-microcontrollers/modules/charging/10a-8.4v-18650-lithium-battery-protection-board-bms-hx-2s-jh20/>

Εικόνα6.3:

<https://jh-electronics-sourcing.com/products/2s-10a-74v-18650-lithium-battery-protection-board>

Εικόνα ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: <https://laptrinhx.com/pi-pico-pinout-and-power-pins-3837190980/>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Προγράμματα για το μικροελεγκτή

main.py

```
from machine import I2C, Pin, UART, ADC
from time import sleep
from pico_i2c_lcd import I2cLcd
from array import*
import utime

SAMPLES = 25
calibrationValues = 2
i2c = I2C(0, sda=Pin(0), scl=Pin(1), freq=100000)
I2C_ADDR = i2c.scan()[0]
lcd = I2cLcd(i2c, I2C_ADDR, 2, 16)
analog_first = machine.ADC(26) #Analog port for pH measurement
analog_second = machine.ADC(27) #Analog port for temperature
measurement
HC05 = UART(1,9600)

pressed = False
ext = True
okCount = 0
cal = False
runFlag = 0

calBUT = machine.Pin(17, machine.Pin.IN,machine.Pin.PULL_UP)
okBUT = machine.Pin(14, machine.Pin.IN, machine.Pin.PULL_UP)

ar1 = [0 for i in range(SAMPLES)]
ar2 = [0 for i in range(SAMPLES)]
calibrationParameters = [0 for i in range(calibrationValues)]
```

```

#Temperature parameters
a = 0.00385
Ro = 100 #pt100 Reference Resistance
I = 0.00302 #Bridge Reference Current
VrefTemp = 0.5 #Instrumentation Amplifier Voltage Reference (FOR
TEMPERATURE)
Gain = 87.3515 #Instrumentation Amplifier Gain (FOR TEMPERATURE)

#pH Parameters
Rcon = 8.31446261815324
F = 96485 #Faraday's constant
n = 1 #Rate of electron transfer
Kc = 16.1136 #Chemical equilibrium constant
RgC = 43000
Rg_pot_max = 25000

def ok_handler(IRQ):
    global okCount
    okCount = okCount+1
    ok = False
    return okCount

def cal_handler(IRQ):
    global cal
    cal = True
    return cal

lcd.move_to(0,0)
lcd.putstr("PH meter device IEE IHU 2022")
sleep(2.5)
lcd.clear()
lcd.putstr("Designed by Mimidakis Spiros")

```

```

sleep(2.5)
lcd.clear()

lcd.putstr("Ok for exit, cal for calibration")
sleep(2.5)
lcd.clear()

def pHVoltage():
    for i in range(SAMPLES):
        ar1[i] = (analog_first.read_u16()*3.3)/65535
        utime.sleep_ms(10)
    return averageCalc(ar1)

def tempVoltage():
    for i in range(SAMPLES):
        ar2[i] = (analog_second.read_u16()*3.3)/65535
        utime.sleep_ms(10)
    return averageCalc(ar2)

def averageCalc(array):
    return sum(array)/len(array)

def PH(VpH, temp):
    Eo = ((Rcon*ToKelvin(temp))/(n*F))*Kc
    a = ((3 - 1.75)/Eo)-1
    RGV = (((100000/a)-43000)/Rg_pot_max)*Rg_pot_max
    GAIN = 1 + (100000/(RgC + RGV))
    slope = -ToKelvin(temp)*(2.303*(Rcon/(n*F)))
    pH = (((VpH-1.75)/3.3719))+7*slope/slope
    return pH

def PHI(VpH):
    pHI = -(VpH*slp)+offset

```

```

    return pHI

def TEMP(Vtemp):
    DV = (Vtemp - VrefTemp) / Gain
    RTD = (4300*DV + 110000*I)/(1100*I-DV)
    Temp = (RTD - 100)/(a*100)
    return Temp

def ToKelvin(T):
    return 274.15 + T

def calibratedOUT(A, B):
    global slp
    slp = (4-7)/(A-B)
    global offset
    offset = 7 + slp*A
    return slp, offset

def bluetoothCom(forOUT):
    HC05.write(forOUT+"\n")

def OKbutton():
    for i in range(50):
        if okBUT.value() == True:
            i = i+1
            utime.sleep_ms(1)
        elif okBUT.value() != True:
            i = 0
    okBUT.irq(trigger=machine.Pin.IRQ_RISING, handler=ok_handler)

def CALbutton():
    for i in range(50):
        if calBUT.value() == True:

```

```

        i = i+1
        utime.sleep_ms(1)
    elif calBUT.value() != True:
        i = 0

    calBUT.irq(trigger=machine.Pin.IRQ_RISING,
handler=cal_handler)

while ext == True:
    OKbutton()
    CALbutton()
    while cal == False and okCount == 1:
        lcd.move_to(0,0)
        lcd.putstr("Exiting")
        lcd.move_to(0,1)
        lcd.putstr( "Calibration")
        sleep(0.3)
        lcd.clear()
        ext = False
        runFlag = 1
        break
    while cal == True and okCount == 0:
        lcd.putstr("ALC:
"+"{: .1f}".format(PH(pHVoltage()),TEMP(tempVoltage()))))
        calibrationParameters[0] = pHVoltage()
        sleep(0.5)
        lcd.clear()
        OKbutton()
    while cal == True and okCount == 1:
        lcd.putstr("ACID:
"+"{: .1f}".format(PH(pHVoltage()),TEMP(tempVoltage()))))
        calibrationParameters[1] = pHVoltage()
        sleep(0.5)
        lcd.clear()

```

```

        OKbutton()
    if cal == True and okCount == 2:
        lcd.move_to(0,0)
        lcd.putstr("Device")
        lcd.move_to(0,1)
        lcd.putstr("Calibrated")
        calibratedOUT(calibrationParameters[0],
calibrationParameters[1])
        sleep(0.5)
        lcd.clear()
        ext = False
        runFlag = 2

while True:

    while runFlag == 1 :
        lcd.clear()
        lcd.move_to(0, 0)
        lcd.putstr("Temp:      "+"{: .1f}".format(TEMP(tempVoltage()))+"
oC")
        lcd.move_to(0,1)
        lcd.putstr("                                PH:
"+"{: .1f}".format(PH(pHVoltage()),TEMP(tempVoltage()))))
        bluetoothCom("                                PH:
"+"{: .1f}".format(PH(pHVoltage()),TEMP(tempVoltage()))+"      @Temp:
"+"{: .1f}".format(TEMP(tempVoltage())) + "°C ")
        print("PH:
"+"{: .1f}".format(PH(pHVoltage()),TEMP(tempVoltage()))+"      @Temp:
"+"{: .1f}".format(TEMP(tempVoltage())) + "°C")

    while runFlag == 2:
        lcd.clear()
        lcd.move_to(0, 0)

```

```

    lcd.putstr("Temp:      "+"{: .1f}".format(TEMP(tempVoltage()))+"
oC")

    lcd.move_to(0,1)

    lcd.putstr("                                PH:
"+"{: .1f}".format(PHI(pHVoltage()),TEMP(tempVoltage()))))

    bluetoothCom("                                PH:
"+"{: .1f}".format(PHI(pHVoltage()),TEMP(tempVoltage()))+" @Temp:
"+"{: .1f}".format(TEMP(tempVoltage())) +"°C ")

    print("PH:
"+"{: .1f}".format(PHI(pHVoltage()),TEMP(tempVoltage()))+" @Temp:
"+"{: .1f}".format(TEMP(tempVoltage())) +"°C")

```

lcd_api.py

```
import time

class LcdApi:

    LCD_CLR = 0x01          # DB0: clear display
    LCD_HOME = 0x02        # DB1: return to home position

    LCD_ENTRY_MODE = 0x04  # DB2: set entry mode
    LCD_ENTRY_INC = 0x02   # --DB1: increment
    LCD_ENTRY_SHIFT = 0x01 # --DB0: shift

    LCD_ON_CTRL = 0x08     # DB3: turn lcd/cursor on
    LCD_ON_DISPLAY = 0x04  # --DB2: turn display on
    LCD_ON_CURSOR = 0x02   # --DB1: turn cursor on
    LCD_ON_BLINK = 0x01    # --DB0: blinking cursor

    LCD_MOVE = 0x10        # DB4: move cursor/display
    LCD_MOVE_DISP = 0x08   # --DB3: move display (0-> move
cursor)
    LCD_MOVE_RIGHT = 0x04  # --DB2: move right (0-> left)

    LCD_FUNCTION = 0x20    # DB5: function set
    LCD_FUNCTION_8BIT = 0x10 # --DB4: set 8BIT mode (0->4BIT
mode)
    LCD_FUNCTION_2LINES = 0x08 # --DB3: two lines (0->one line)
    LCD_FUNCTION_10DOTS = 0x04 # --DB2: 5x10 font (0->5x7 font)
    LCD_FUNCTION_RESET = 0x30 # See "Initializing by
Instruction" section

    LCD_CGRAM = 0x40       # DB6: set CG RAM address
    LCD_DDRAM = 0x80       # DB7: set DD RAM address

    LCD_RS_CMD = 0
```

```

LCD_RS_DATA = 1

LCD_RW_WRITE = 0
LCD_RW_READ = 1

def __init__(self, num_lines, num_columns):
    self.num_lines = num_lines
    if self.num_lines > 4:
        self.num_lines = 4
    self.num_columns = num_columns
    if self.num_columns > 40:
        self.num_columns = 40
    self.cursor_x = 0
    self.cursor_y = 0
    self.implicit_newline = False
    self.backlight = True
    self.display_off()
    self.backlight_on()
    self.clear()
    self.hal_write_command(self.LCD_ENTRY_MODE
self.LCD_ENTRY_INC)
    self.hide_cursor()
    self.display_on()

def clear(self):
    """Clears the LCD display and moves the cursor to the top
left
corner.
"""
    self.hal_write_command(self.LCD_CLR)
    self.hal_write_command(self.LCD_HOME)
    self.cursor_x = 0
    self.cursor_y = 0

```

```

def show_cursor(self):
    """Causes the cursor to be made visible."""
    self.hal_write_command(self.LCD_ON_CTRL | self.LCD_ON_DISPLAY
|
                                self.LCD_ON_CURSOR)

def hide_cursor(self):
    """Causes the cursor to be hidden."""
    self.hal_write_command(self.LCD_ON_CTRL |
self.LCD_ON_DISPLAY)

def blink_cursor_on(self):
    """Turns on the cursor, and makes it blink."""
    self.hal_write_command(self.LCD_ON_CTRL | self.LCD_ON_DISPLAY
|
                                self.LCD_ON_CURSOR |
self.LCD_ON_BLINK)

def blink_cursor_off(self):
    """Turns on the cursor, and makes it no blink (i.e. be
solid)."""
    self.hal_write_command(self.LCD_ON_CTRL | self.LCD_ON_DISPLAY
|
                                self.LCD_ON_CURSOR)

def display_on(self):
    """Turns on (i.e. unblanks) the LCD."""
    self.hal_write_command(self.LCD_ON_CTRL |
self.LCD_ON_DISPLAY)

def display_off(self):
    """Turns off (i.e. blanks) the LCD."""
    self.hal_write_command(self.LCD_ON_CTRL)

def backlight_on(self):

```

```

    """Turns the backlight on.

    This isn't really an LCD command, but some modules have
backlight
    controls, so this allows the hal to pass through the command.
    """
    self.backlight = True
    self.hal_backlight_on()

    def backlight_off(self):
        """Turns the backlight off.

        This isn't really an LCD command, but some modules have
backlight
        controls, so this allows the hal to pass through the command.
        """
        self.backlight = False
        self.hal_backlight_off()

    def move_to(self, cursor_x, cursor_y):
        """Moves the cursor position to the indicated position. The
cursor
        position is zero based (i.e. cursor_x == 0 indicates first
column).
        """
        self.cursor_x = cursor_x
        self.cursor_y = cursor_y
        addr = cursor_x & 0x3f
        if cursor_y & 1:
            addr += 0x40    # Lines 1 & 3 add 0x40
        if cursor_y & 2:    # Lines 2 & 3 add number of columns
            addr += self.num_columns
        self.hal_write_command(self.LCD_DDRAM | addr)

    def putchar(self, char):
        """Writes the indicated character to the LCD at the current
cursor

```

```

position, and advances the cursor by one position.
"""
if char == '\n':
    if self.implicit_newline:
        # self.implicit_newline means we advanced due to a
wraparound,
        # so if we get a newline right after that we ignore
it.

        pass
    else:
        self.cursor_x = self.num_columns
else:
    self.hal_write_data(ord(char))
    self.cursor_x += 1
if self.cursor_x >= self.num_columns:
    self.cursor_x = 0
    self.cursor_y += 1
    self.implicit_newline = (char != '\n')
if self.cursor_y >= self.num_lines:
    self.cursor_y = 0
self.move_to(self.cursor_x, self.cursor_y)

def putstr(self, string):
    """Write the indicated string to the LCD at the current
cursor
position and advances the cursor position appropriately.
"""
    for char in string:
        self.putchar(char)

def custom_char(self, location, charmap):
    """Write a character to one of the 8 CGRAM locations,
available
as chr(0) through chr(7).

```

```

"""
location &= 0x7
self.hal_write_command(self.LCD_CGRAM | (location << 3))
self.hal_sleep_us(40)
for i in range(8):
    self.hal_write_data(charmap[i])
    self.hal_sleep_us(40)
self.move_to(self.cursor_x, self.cursor_y)

def hal_backlight_on(self):
    """Allows the hal layer to turn the backlight on.
    If desired, a derived HAL class will implement this function.
    """
    pass

def hal_backlight_off(self):
    """Allows the hal layer to turn the backlight off.
    If desired, a derived HAL class will implement this function.
    """
    pass

def hal_write_command(self, cmd):
    """Write a command to the LCD.
    It is expected that a derived HAL class will implement this
    function.
    """
    raise NotImplementedError

def hal_write_data(self, data):
    """Write data to the LCD.
    It is expected that a derived HAL class will implement this
    function.
    """

```

```

raise NotImplementedError

def hal_sleep_us(self, usecs):
    """Sleep for some time (given in microseconds)."""
    time.sleep_us(usecs)

```

pico_i2c_lcd.py

```

from lcd_api import LcdApi
from machine import I2C
from time import sleep_ms

DEFAULT_I2C_ADDR = 0x27

# Defines shifts or masks for the various LCD line attached to the
PCF8574

MASK_RS = 0x01
MASK_RW = 0x02
MASK_E = 0x04
SHIFT_BACKLIGHT = 3
SHIFT_DATA = 4

class I2cLcd(LcdApi):
    """Implements a character based lcd connected via PCF8574 on
i2c."""

    def __init__(self, i2c, i2c_addr, num_lines, num_columns):
        self.i2c = i2c
        self.i2c_addr = i2c_addr
        self.i2c.writeto(self.i2c_addr, bytearray([0]))
        sleep_ms(20)    # Allow LCD time to powerup

```

```

# Send reset 3 times
self.hal_write_init_nibble(self.LCD_FUNCTION_RESET)
sleep_ms(5)      # need to delay at least 4.1 msec
self.hal_write_init_nibble(self.LCD_FUNCTION_RESET)
sleep_ms(1)
self.hal_write_init_nibble(self.LCD_FUNCTION_RESET)
sleep_ms(1)
# Put LCD into 4 bit mode
self.hal_write_init_nibble(self.LCD_FUNCTION)
sleep_ms(1)
LcdApi.__init__(self, num_lines, num_columns)
cmd = self.LCD_FUNCTION
if num_lines > 1:
    cmd |= self.LCD_FUNCTION_2LINES
self.hal_write_command(cmd)

def hal_write_init_nibble(self, nibble):
    """Writes an initialization nibble to the LCD.
    This particular function is only used during initialization.
    """
    byte = ((nibble >> 4) & 0x0f) << SHIFT_DATA
    self.i2c.writeto(self.i2c_addr, bytearray([byte | MASK_E]))
    self.i2c.writeto(self.i2c_addr, bytearray([byte]))

def hal_backlight_on(self):
    """Allows the hal layer to turn the backlight on."""
    self.i2c.writeto(self.i2c_addr, bytearray([1 <<
SHIFT_BACKLIGHT]))

def hal_backlight_off(self):
    """Allows the hal layer to turn the backlight off."""
    self.i2c.writeto(self.i2c_addr, bytearray([0]))

def hal_write_command(self, cmd):

```

```

    """Writes a command to the LCD.
    Data is latched on the falling edge of E.
    """
    byte = ((self.backlight << SHIFT_BACKLIGHT) | (((cmd >> 4) &
0x0f) << SHIFT_DATA))
    self.i2c.writeto(self.i2c_addr, bytearray([byte | MASK_E]))
    self.i2c.writeto(self.i2c_addr, bytearray([byte]))
    byte = ((self.backlight << SHIFT_BACKLIGHT) | ((cmd & 0x0f)
<< SHIFT_DATA))
    self.i2c.writeto(self.i2c_addr, bytearray([byte | MASK_E]))
    self.i2c.writeto(self.i2c_addr, bytearray([byte]))
    if cmd <= 3:
        # The home and clear commands require a worst case delay
of 4.1 msec
        sleep_ms(5)

    def hal_write_data(self, data):
        """Write data to the LCD."""
        byte = (MASK_RS | (self.backlight << SHIFT_BACKLIGHT) |
(((data >> 4) & 0x0f) << SHIFT_DATA))
        self.i2c.writeto(self.i2c_addr, bytearray([byte | MASK_E]))
        self.i2c.writeto(self.i2c_addr, bytearray([byte]))
        byte = (MASK_RS | (self.backlight << SHIFT_BACKLIGHT) |
((data & 0x0f) << SHIFT_DATA))
        self.i2c.writeto(self.i2c_addr, bytearray([byte | MASK_E]))
        self.i2c.writeto(self.i2c_addr, bytearray([byte]))

```

PH Composite Electrode Specification

A. Introduction

This is a measuring component of pH sensor. It is compounded of glass electrode and Ag/AgCl electrode, and it can be used to measure the pH value in the solution.

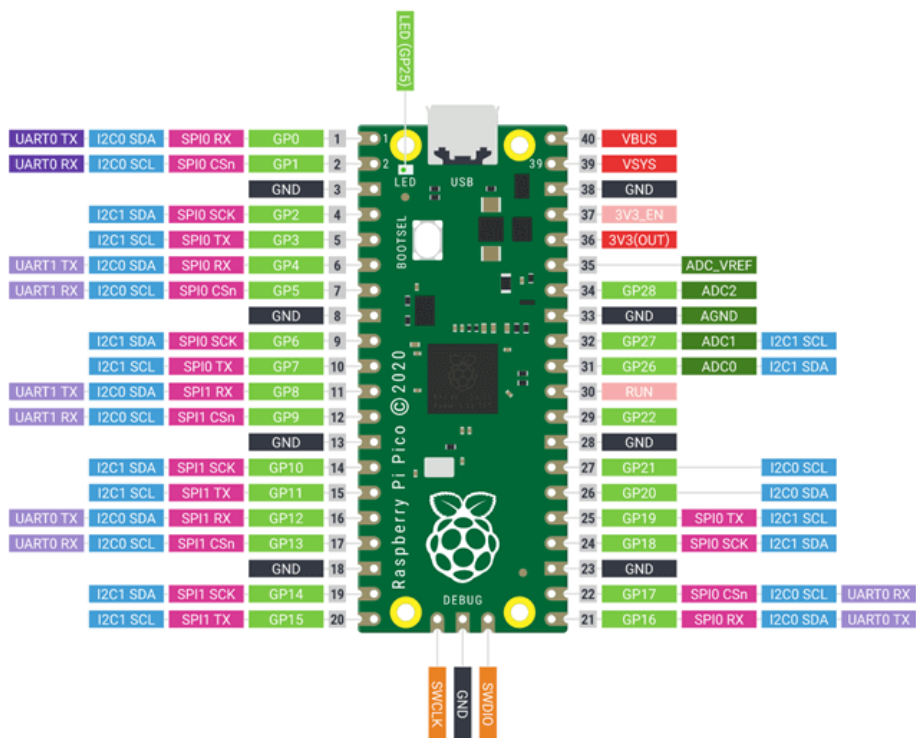
B. Type and Key Technical Specification

Type	Measuring Range	Temperature Range	Zero Point	Alkalinity Error	PTS	Responding Time	Internal resistance	Repeatability	Noise
	pH	°C	pH	mV		Min.	MΩ	<0.017	mV
65-1	0~14	0~80	7±1	<15	>98	<2	<250	<0.017	
BX-5	0~14	0~80	7x ± 11	<15	>98	<2	<250	<0.017	
E-201	0~14	0~80	7 ± 0.5	<15	>98	<2	<250	<0.017	<0.5
E-201-C	0~14	0~80	7x ± 0.5	<15	>98	<2	<250	<0.017	<0.5
95-1	0~14	0~80	7x ± 0.5	<15	>98	<2	<250	<0.017	<0.5
E-900	0~14	0~80	7x ± 0.5	<15	>98	<2	<250	<0.017	<0.5

C. Precautions

1. In the first usage or re-use after a long time, please immerse the glass electrode bulb and sand core in the 3NKCL solution for 8 hours.
2. The electrode plug should be kept clean and dry.
3. The reference solution of electrode is 3NKCL.
4. Please avoid the cross contamination in the measurement stage.
5. Once the electrode bulb or the sand core is defiled, it will make PTS decline and response slowly. Please clean them with the corresponding solution according to the pollutant characteristics.
6. The electrode should not be immersed in the acid chloride solution for a long time.
7. When it is in use, the outlet rubber ring should be removed so that the salt bridge solution could maintain a certain flow velocity.

: Pinout Raspberry Pi Pico



■ Power	■ Ground	■ UART / UART (default)	■ GPIO, PIO, and PWM	■ ADC	■ SPI	■ I2C	■ System Control	■ Debugging
------------------------------------------	---------------------------------------------	-------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------	----------------------------------------------	--------------------------------------------	-----------------------------------------	----------------------------------------------------	-------------------------------------------------