



ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Όργανο μέτρησης ηλεκτρικών μεγεθών και ηλεκτρικών
στοιχείων (V-I-R-L-C)

Του φοιτητή
Χατζησταύρου Δημήτριου
Αρ. Μητρώου: 516160

Επιβλέπων
Χατζόπουλος Αργύριος
Βαθμίδα: Επίκουρος Καθηγητής

Σεπτέμβριος 2022

Τίτλος Π.Ε. : Όργανο μέτρησης ηλεκτρικών μεγεθών και ηλεκτρικών στοιχείων (V-I-R-L-C)

Κωδικός Π.Ε. : 16160

Όνοματεπώνυμο φοιτητή/των: Χατζησταύρου Δημήτριος

Όνοματεπώνυμο εισηγητή: Χατζόπουλος Αργύριος

Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε. : 22/02/2022

Ημερομηνία περάτωσης Π.Ε. 01/09/2022

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 Χατζησταύρου Δημήτριου που την εκτόνησε. 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 πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητα και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Πρόλογος

Το συγκεκριμένο θέμα πτυχιακής εργασίας το επέλεξα γιατί συνδυάζει δύο πολύ ενδιαφέροντα πεδία, κατά την γνώμη μου. Τα πεδία, αυτά, είναι τα αναλογικά ηλεκτρονικά και ο προγραμματισμός μικροελεγκτών. Για να επιτευχθεί ο στόχος της εργασίας, χρειάστηκε να χρησιμοποιήσω και να συνδέσω γνώσεις που είχα πάνω σε αυτούς τους δύο τομείς, ώστε στο τελικό αποτέλεσμα να συνυπάρχουν και να συνεργάζονται μεταξύ τους. Ο σκοπός μου σε αυτήν την εργασία, ήταν να χρησιμοποιήσω όσο γίνεται πιο απλά ηλεκτρονικά εξαρτήματα και συνδεσμολογίες και να κρατήσω το κόστος χαμηλά.

Περίληψη

Αυτή η πτυχιακή εργασία έχει ως στόχο την μελέτη, σχεδίαση και υλοποίηση ενός οργάνου, το οποίο θα μετράει τα πιο σημαντικά ηλεκτρονικά μεγέθη, τα οποία είναι η συνεχής τάση (V_{DC}), το συνεχές ρεύμα (I_{DC}), η αντίσταση (R), η χωρητικότητα (C) και η αυτεπαγωγή (L). Ως αποτέλεσμα, το όργανο αυτό, το οποίο δεν διαφέρει πολύ από ένα τυπικό πολύμετρο, θα μπορεί να μετράει βασικά ηλεκτρονικά στοιχεία και εξαρτήματα, όπως είναι οι αντιστάσεις, οι πυκνωτές και τα πηνία. Η δυνατότητα μέτρησης αυτών των μεγεθών και στοιχείων καθιστά αυτό το όργανο απαραίτητο για κάθε ηλεκτρονικό μηχανικό, καθώς η λήψη μετρήσεων είναι κρίσιμης σημασίας στο πεδίο των ηλεκτρονικών.

Το συγκεκριμένο όργανο απαρτίζεται από μια πλακέτα Arduino Nano, βασισμένο στον μικροελεγκτή ATmega328, σε συνδυασμό με διάφορα ηλεκτρονικά εξαρτήματα, όπως αντιστάσεις, πυκνωτές, διόδους, τρανζίστορ και ολοκληρωμένα κυκλώματα. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για τον προγραμματισμό είναι γραμμένος σε γλώσσα βασισμένη στην C. Το όργανο επικοινωνεί με τον χρήστη μέσω μιας οθόνης (LCD), η οποία επικοινωνεί με τον ελεγκτή με το πρωτόκολλο I²C, ενώ ταυτόχρονα, μπορεί να συνδεθεί με υπολογιστή μέσω της θύρας USB και τα αποτελέσματα των μετρήσεων να εμφανίζονται στο serial monitor της εφαρμογής Arduino IDE. Ο χρήστης επικοινωνεί με το όργανο μέσω ενός κουμπιού (push button), επιλέγοντας έτσι μία από τις πέντε λειτουργίες, δηλαδή ένα από τα πέντε διαθέσιμα μεγέθη μέτρησης. Η τροφοδοσία του μπορεί να γίνει είτε από υπολογιστή μέσω της θύρας USB, είτε από εξωτερικό τροφοδοτικό συνεχούς τάσης 6-20V.

Στην συνέχεια, θα εξηγηθούν απαραίτητες για την κατανόηση της εργασίας έννοιες, καθώς επίσης θα αναλυθούν τα κυκλώματα τα οποία αποτελούν αυτό το όργανο.

Electric quantities and electric components measuring instrument

(V-I-R-L-C)

Chatzistavrou Dimitrios

Abstract

This work's goal is the study, design and implementation of an instrument, which will measure the most important electric quantities, which are DC Voltage (V_{DC}), DC Current (I_{DC}), Resistance (R), Capacitance (C) and Inductance (L). This instrument is similar to a typical multimeter and it will be able to measure the values of basic electronic components, such as resistors, capacitors and inductors. The ability to measure these quantities and values of components means that this instrument is necessary for every electronic engineer, as measurements are very crucial in the field of electronics.

This instrument consists of an Arduino Nano board, which is based on the ATmega328 microcontroller, along with multiple electronic components, such as resistors, capacitors, diodes, transistors and integrated circuits (ICs). The microcontroller was programmed using a language which is based on C. The instrument communicates with the user through a Liquid Crystal Display (LCD), which communicates with the microcontroller using the I²C protocol, while also being capable of displaying measurement results on the serial monitor of the Arduino IDE application through a USB port of a computer. The user communicates with the instrument through a push button, which cycles through the five different measurement modes. The instrument can either be powered from a computer via the USB port, or from an external power supply which can vary from 6 to 20 Volts DC.

In the following chapters, important concepts will be explained, in order to make this work easier to understand. Furthermore, the circuits that make up this instrument will be analyzed.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	4
Περίληψη.....	5
Abstract	6
Περιεχόμενα	7
Κατάλογος Σχημάτων	10
Εισαγωγή.....	12
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή στα πολύμετρα.....	13
1.1 Τι είναι τα πολύμετρα	13
1.2 Άλλα μεγέθη μέτρησης των πολυμέτρων	13
1.3 Άλλες δυνατότητες των πολυμέτρων.....	14
1.4 Ακρίβεια	14
1.5 Σημαντικές προϋποθέσεις για την ορθή λειτουργία ενός οργάνου μέτρησης	14
1.6 Το όργανο μέτρησης αυτής της εργασίας.....	15
Κεφάλαιο 2ο: Τα μεγέθη μέτρησης.....	16
2.1 Τάση (Voltage).....	16
2.2 Ρεύμα (Current).....	17
2.3 Αντίσταση (Resistance)	18
2.3.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή μιας αντίστασης	19
2.3.2 Σχέση τάσης, έντασης, αντίστασης και νόμος του Ωμ.....	20
2.3.3 Ο νόμος του Ωμ από άλλη οπτική γωνία	21
2.4 Πυκνωτές (capacitors) και χωρητικότητα (capacitance).....	21
2.4.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την χωρητικότητα ενός πυκνωτή.....	22
2.4.2 Ενέργεια ενός πυκνωτή.....	22
2.4.3 Τύποι πυκνωτών.....	23
2.5 Πηνία (inductors) και αυτεπαγωγή (inductance).....	24
Κεφάλαιο 3ο: Ανάλυση των κυκλωμάτων	26
3.1 Λίγα λόγια για το Arduino Nano	28
3.2 Κύκλωμα μέτρησης τάσης.....	29
3.2.1 Αντίσταση εισόδου βολτομέτρου	30

3.2.2 Αναστρέφων ενισχυτής (inverting amplifier)	31
3.2.3 Μη αναστρέφων ενισχυτής (non inverting amplifier)	32
3.2.4 Δίοδος.....	33
3.2.5 Ανάλυση του αναλογικού μέρους του κυκλώματος μέτρησης τάσης.....	34
3.2.6 Ανάλυση του ψηφιακού μέρους του κυκλώματος μέτρησης τάσης	35
3.3 Κύκλωμα μέτρησης έντασης του ρεύματος.....	36
3.3.1 Αντίσταση αμπερομέτρου.....	37
3.3.2 Ενισχυτές οργανολογίας	37
3.3.3 Ακόλουθος τάσης (buffer).....	39
3.3.4 Δίοδος Zener	39
3.3.5 Τάση αναφοράς.....	39
3.3.6 Ανάλυση του αναλογικού μέρους του κυκλώματος μέτρησης έντασης του ρεύματος.....	40
3.3.7 Ανάλυση του ψηφιακού μέρους του κυκλώματος μέτρησης έντασης του ρεύματος	41
3.4 Κύκλωμα μέτρησης αντίστασης.....	42
3.4.1 Τρανζίστορ (Transistor)	42
3.4.2 Διαιρέτης τάσης	43
3.4.3 Ανάλυση του αναλογικού μέρους του κυκλώματος μέτρησης αντίστασης	44
3.4.4 Ανάλυση του ψηφιακού μέρους του κυκλώματος μέτρησης αντίστασης	45
3.5 Κύκλωμα μέτρησης χωρητικότητας.....	46
3.5.1 Πηγή ρεύματος.....	46
3.5.2 Εκθετική φόρτιση πυκνωτή.....	47
3.5.3 Νόμος του Ωμ για πυκνωτές και γραμμική φόρτιση	48
3.5.4 Ανάλυση του αναλογικού μέρους του κυκλώματος μέτρησης χωρητικότητας	49
3.5.5 Ανάλυση του ψηφιακού μέρους του κυκλώματος μέτρησης χωρητικότητας	51
3.6 Κύκλωμα μέτρησης αυτεπαγωγής.....	53
3.6.1 Ταλαντώσεις και κυκλώματα LC	53
3.6.2 Συγκριτές τάσης.....	55
3.6.3 Ανάλυση του αναλογικού μέρους του κυκλώματος μέτρησης αυτεπαγωγής	56
3.6.4 Ανάλυση του ψηφιακού μέρους του κυκλώματος μέτρησης αυτεπαγωγής	57
3.7 Κύκλωμα αλλαγής λειτουργίας.....	58
Κεφάλαιο 4ο: Μετρήσεις και σύγκριση αποτελεσμάτων με όργανα του εμπορίου.....	59
4.1 Μέτρηση τάσης	59
4.2 Μέτρηση έντασης ρεύματος.....	62
4.3 Μέτρηση αντίστασης	66

4.4 Μέτρηση χωρητικότητας	68
4.5 Μέτρηση αυτεπαγωγής	72
Βιβλιογραφία.....	74
Βιβλιογραφία εικόνων.....	75
Παράρτημα Α: Κώδικας που χρησιμοποιήθηκε.....	76

Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 1.1: Ένα ψηφιακό φορητό πολύμετρο [1].....	13
Εικόνα 1.2: Τρόπος μέτρησης τάσης και ρεύματος [2].....	15
Εικόνα 2.1: Συμβατική και πραγματική φορά του ρεύματος σε ηλεκτρικό πεδίο [3].....	17
Εικόνα 2.2: Διάφορες αντιστάσεις [4].....	18
Εικόνα 2.3: Χρωματικός κώδικας αντιστάσεων [5].....	19
Εικόνα 2.4: Απεικόνιση ενός αντικειμένου που παρουσιάζει αντίσταση [6].....	20
Εικόνα 2.5: Μαθηματικό τρίγωνο του νόμου του Ωμ [7]	20
Εικόνα 2.6: Σύγκριση τάσης, έντασης, αντίστασης με ιδιότητες του νερού [8]	21
Εικόνα 2.7: Διάφορα είδη πυκνωτών [9]	23
Εικόνα 2.8: Πηνίο με πυρήνα [10]	24
Εικόνα 3.1: Πλήρες κύκλωμα, έτσι όπως απεικονίζεται στο Eagle	26
Εικόνα 3.2: Η πλακέτα της εργασίας, έτσι όπως απεικονίζεται στο Eagle	27
Εικόνα 3.3: Arduino Nano [11].....	28
Εικόνα 3.4: Κύκλωμα μέτρησης τάσης, όπως απεικονίζεται στο Spice	29
Εικόνα 3.5: Αντιστάσεις πλήθους n σε σειρά [3].....	30
Εικόνα 3.6: Αντιστάσεις πλήθους n παράλληλα [3]	30
Εικόνα 3.7: Αναστρέφων ενισχυτής [3]	32
Εικόνα 3.8: Μη αναστρέφων ενισχυτής [3]	32
Εικόνα 3.9: Καμπύλη V - I για μια τυπική δίοδο [13]	33
Εικόνα 3.10: Τάση εξόδου των δύο ενισχυτών για τάση μέτρησης από -35V έως 35V, όπως απεικονίζεται στο Spice	34
Εικόνα 3.11: Τάση στην μη αναστρέφουσα είσοδο του U4A με χρήση διόδου, όπως απεικονίζεται στο Spice	35
Εικόνα 3.12: Κύκλωμα μέτρησης έντασης του ρεύματος, όπως απεικονίζεται στο Spice	36
Εικόνα 3.13: Διάγραμμα ενός τυπικού ενισχυτή οργανολογίας [3].....	38
Εικόνα 3.14: Διάγραμμα του AD623 [12]	38
Εικόνα 3.15: Διάγραμμα buffer [3].....	39
Εικόνα 3.16: Τάση εξόδου U1, U2, για τιμές εισόδου από -25mV ως 25mV, όπως απεικονίζεται στο Spice	40
Εικόνα 3.17: Κύκλωμα μέτρησης αντίστασης, όπως απεικονίζεται στο Spice.....	42
Εικόνα 3.18: Σύμβολο και εικόνα ενός BJT [14].....	43
Εικόνα 3.19: Διαίρετης τάσης με δύο αντιστάσεις [3].....	44
Εικόνα 3.20: Κύκλωμα μέτρησης χωρητικότητας, όπως απεικονίζεται στο Spice.....	46
Εικόνα 3.21: Κύκλωμα φόρτισης RC [15].....	47
Εικόνα 3.22: Διαγράμματα V-t και I-t εκθετικής φόρτισης πυκνωτή σε κύκλωμα RC [15].....	48
Εικόνα 3.23: Φόρτιση πυκνωτή τιμής 56 pF, όπως απεικονίζεται στο Spice	50
Εικόνα 3.24: Φόρτιση πυκνωτή τιμής 1 μF, όπως απεικονίζεται στο Spice	51
Εικόνα 3.25: Κύκλωμα μέτρησης αυτεπαγωγής, όπως απεικονίζεται στο Spice.....	53

Εικόνα 3.26: Κύκλωμα LC [3].....	54
Εικόνα 3.27: Ημίτονο που παρουσιάζει μείωση του πλάτους με την πάροδο του χρόνου [16].....	54
Εικόνα 3.28: Καθυστέρηση διάδοσης (propagation delay) [17]	55
Εικόνα 3.29: Διάγραμμα του LM339 [18]	56
Εικόνα 3.30: Έξοδος και είσοδος U1A, όπως απεικονίζεται στο Spice.....	57
Εικόνα 3.31: Κύκλωμα ενεργοποίησης διακοπών, όπως απεικονίζεται στο Spice.....	58
Εικόνα 4.1: Σύγκριση τιμών τάσης (1...30V).....	59
Εικόνα 4.2: Απόκλιση τιμών οργάνου μέτρησης σε σχέση με αυτές του πολυμέτρου πάγκου (1...30V)	60
Εικόνα 4.3: Ποσοστό σφάλματος σε σχέση με το πολύμετρο πάγκου (1...30V)	60
Εικόνα 4.4: Σύγκριση τιμών τάσης (-1...-30V)	61
Εικόνα 4.5: Απόκλιση τιμών οργάνου μέτρησης σε σχέση με αυτές του πολυμέτρου πάγκου (-1...- 30V).....	61
Εικόνα 4.6: Ποσοστό σφάλματος σε σχέση με το πολύμετρο πάγκου (-1...-30V)	62
Εικόνα 4.7: Σύγκριση τιμών έντασης (1...20mA)	63
Εικόνα 4.8: Απόκλιση τιμών οργάνου μέτρησης σε σχέση με αυτές του πολυμέτρου πάγκου (1...20mA)	63
Εικόνα 4.9: Ποσοστό σφάλματος σε σχέση με το πολύμετρο πάγκου (1...20mA).....	64
Εικόνα 4.10: Σύγκριση τιμών έντασης (-1...-20mA).....	64
Εικόνα 4.11: Απόκλιση τιμών οργάνου μέτρησης σε σχέση με αυτές του πολυμέτρου πάγκου (-1...- 20mA).....	65
Εικόνα 4.12: Ποσοστό σφάλματος σε σχέση με το πολύμετρο πάγκου (-1...-20mA)	65
Εικόνα 4.13: Σύγκριση τιμών αντίστασης (1Ω...1,8ΜΩ)	66
Εικόνα 4.14: Απόκλιση τιμών οργάνου μέτρησης σε σχέση με αυτές του πολυμέτρου πάγκου (1Ω...1,8ΜΩ).....	67
Εικόνα 4.15: Ποσοστό σφάλματος σε σχέση με το πολύμετρο πάγκου (1Ω...1,8ΜΩ)	67
Εικόνα 4.16: Σύγκριση τιμών χωρητικότητας (41pF...4,5nF).....	69
Εικόνα 4.17: Απόκλιση τιμών οργάνου μέτρησης σε σχέση με αυτές του οργάνου LCR (41pF...4,5nF)	69
Εικόνα 4.18: Ποσοστό σφάλματος σε σχέση με το όργανο LCR (41pF...4,5nF)	70
Εικόνα 4.19: Σύγκριση τιμών χωρητικότητας (103nF...1,53μF)	70
Εικόνα 4.20: Απόκλιση τιμών οργάνου μέτρησης σε σχέση με αυτές του οργάνου LCR (103nF...1,53μF).....	71
Εικόνα 4.21: Ποσοστό σφάλματος σε σχέση με το όργανο LCR (103nF...1,53μF)	71
Εικόνα 4.22: Σύγκριση τιμών χωρητικότητας (97μH...470μH)	72
Εικόνα 4.23: Απόκλιση τιμών οργάνου μέτρησης σε σχέση με αυτές του οργάνου LCR (97μH...470μH)	73
Εικόνα 4.24: Ποσοστό σφάλματος σε σχέση με το όργανο LCR (97μH...470μH).....	73

Εισαγωγή

Ο σκοπός αυτής της πτυχιακής εργασίας είναι η κατασκευή ενός οργάνου με την δυνατότητα μέτρησης πέντε ηλεκτρονικών μεγεθών, τα οποία είναι η συνεχής τάση, το συνεχές ρεύμα, η αντίσταση, η χωρητικότητα και η αυτεπαγωγή. Το κάθε μέγεθος χρειάζεται ένα διαφορετικό κύκλωμα και τελικά, αυτά τα πέντε αυτόνομα κυκλώματα καταλήγουν στον «εγκέφαλο» του οργάνου, που είναι η μονάδα Arduino Nano, η οποία εκτελεί μαθηματικές και λογικές πράξεις και εμφανίζει τα αποτελέσματα μέτρησης στην οθόνη. Οι γνώσεις που απαιτούνται για την υλοποίηση της εργασίας δεν περιορίζονται στα ψηφιακά και στον προγραμματισμό, καθώς μεγάλο μέρος της αποτελείται από αναλογικά ηλεκτρονικά και η προσαρμογή (conditioning) μεταξύ του αναλογικού κυκλώματος και του ψηφιακού μικροελεγκτή είναι κρίσιμη. Στα επόμενα κεφάλαια, θα αναλυθεί η λογική και η μεθοδολογία που υπάρχει πίσω από το αναλογικό αλλά και το ψηφιακό μέρος, κάθε ενός από τα πέντε ξεχωριστά κυκλώματα μέτρησης, καθώς και θα εξεταστούν οι διαφορές στα αποτελέσματα που έχει το συγκεκριμένο όργανο από ένα αντίστοιχο του εμπορίου.

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή στα πολύμετρα

Στο κεφάλαιο αυτό, θα εξηγηθούν οι δυνατότητες και οι ιδιότητες των πολυμέτρων και γενικότερα των οργάνων μέτρησης. Θα αναφερθούν βασικές αρχές και προϋποθέσεις που έχουν σχέση με τα όργανα αυτά, καθώς επίσης θα δοθεί μια συνοπτική περιγραφή του οργάνου μέτρησης αυτής της εργασίας.

1.1 Τι είναι τα πολύμετρα

Τα πολύμετρα είναι όργανα μέτρησης που μπορούν να είναι φορητά ή πάγκου, αναλογικά ή (πλέον κυρίως) ψηφιακά και είναι απαραίτητα για έναν ηλεκτρονικό ή ηλεκτρολόγο μηχανικό. Τα πιο απλά πολύμετρα ανήκουν στην κατηγορία VOM (Volt - Ohm - Milliammeter) [1], δηλαδή έχουν την δυνατότητα μέτρησης τάσης, αντίστασης και ρεύματος.



Εικόνα 1.1: Ένα ψηφιακό φορητό πολύμετρο [1]

1.2 Άλλα μεγέθη μέτρησης των πολυμέτρων

Πολλά, πιο προηγμένα πολύμετρα, μπορούν να έχουν περισσότερες δυνατότητες μέτρησης. Για παράδειγμα, μπορούν να μετρήσουν χωρητικότητα (σε F), αγωγιμότητα (σε S), ντεσιμπέλ (dB), κύκλο εργασίας (Duty Cycle που μετριέται σε ποσοστό), συχνότητα (σε Hz), αυτεπαγωγή (σε H) ή ακόμα και θερμοκρασία (σε βαθμούς C ή F) [2].

1.3 Άλλες δυνατότητες των πολυμέτρων

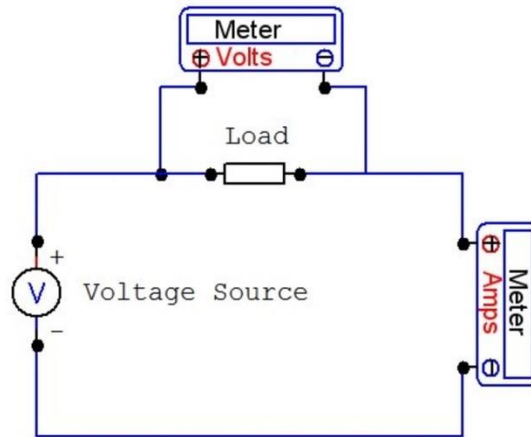
Εκτός από τις δυνατότητες μέτρησης, τα πολύμετρα παρέχουν άλλες βοηθητικές λειτουργίες, όπως η αναγνώριση της ύπαρξης ή μη, ηλεκτρικής συνέχειας. Δηλαδή, το πολύμετρο παράγει έναν ήχο όταν τα δύο άκρα του συνδέονται, ή πρακτικά αν δύο σημεία σε ένα κύκλωμα ταυτίζονται. Επίσης, τα περισσότερα πολύμετρα έχουν την δυνατότητα μέτρησης της τάσης πόλωσης μιας διόδου, δηλαδή την τάση που κρατάει μια ορθά πολωμένη διόδος στα άκρα της, όταν αυτή άγει. Τέλος, ορισμένα πολύμετρα μπορούν να ελέγχουν την κατάσταση στην οποία βρίσκονται απλές μπαταρίες των 1,5V και 9V [2].

1.4 Ακρίβεια

Η ακρίβεια ενός πολυμέτρου ή γενικότερα ενός οργάνου μέτρησης, δηλώνει το πόσο κοντά βρίσκεται η τιμή ένδειξης του οργάνου στην πραγματική τιμή μιας ποσότητας. Προφανώς, όσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια, τόσο πιο αποτελεσματικό είναι το όργανο μέτρησης. Πρακτικά, όμως, η απεριόριστη ακρίβεια στον πραγματικό κόσμο δεν έχει νόημα, αφενός γιατί υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν την ορθότητα της κάθε μέτρησης, αφετέρου γιατί συχνά δεν μας ενδιαφέρει η μέτρηση να είναι τέλεια. Για αυτό, το κάθε όργανο έχει μια ακρίβεια που θεωρείται αποδεκτή. Γενικά, τα ψηφιακά πολύμετρα είναι πιο ακριβή σε σχέση με τα αντίστοιχα, αναλογικά. Τα βασικά αναλογικά πολύμετρα συνήθως έχουν μια αποδεκτή απόκλιση της τάξης του 3%, και τα αντίστοιχα ψηφιακά φορητά πολύμετρα περιορίζουν την απόκλισή τους στο 0,5%, ενώ πολλά πολύμετρα πάγκου έχουν ακρίβεια καλύτερη από 0,01% [2].

1.5 Σημαντικές προϋποθέσεις για την ορθή λειτουργία ενός οργάνου μέτρησης

Ένας σημαντικός παράγοντας που θα επηρεάσει την μέτρηση, είναι η αντίσταση του ίδιου του οργάνου μέτρησης που θα παρεμβάλει σε ένα κύκλωμα. Για παράδειγμα, ένα βολτόμετρο, που παρεμβάλει παράλληλα σε ένα κύκλωμα, πρέπει ιδανικά να έχει άπειρη αντίσταση ώστε να επηρεάσει σε μηδενικό βαθμό την ορθότητα της μέτρησης. Στην πράξη, η αντίσταση εισόδου του βολτομέτρου δεν μπορεί να είναι άπειρη και πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερη από τις αντιστάσεις του κυκλώματος. Αντίστοιχα, ένα αμπερόμετρο, που βρίσκεται σε σειρά με το κύκλωμα, πρέπει να έχει ιδανικά μηδενική αντίσταση. Πρακτικά αυτό δεν γίνεται, έτσι χρησιμοποιούνται πολύ μικρές αλλά μεγάλης ακρίβειας αντιστάσεις (shunt resistor) που συχνά βρίσκονται στην κλίμακα των mΩ ή ακόμα και μΩ. Η επιλογή του κατάλληλου shunt γίνεται έτσι ώστε η επιρροή του πάνω στο κύκλωμα να είναι αμελητέα.



Εικόνα 1.2: Τρόπος μέτρησης τάσης και ρεύματος [2]

1.6 Το όργανο μέτρησης αυτής της εργασίας

Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία είναι αφιερωμένη σε ένα όργανο μέτρησης το οποίο έχει τα χαρακτηριστικά της κατηγορίας VOM, χωρίς όμως την δυνατότητα μέτρησης AC μεγεθών. Επιπλέον, υπάρχει και η δυνατότητα μέτρησης της χωρητικότητας ενός πυκνωτή και της αυτεπαγωγής ενός πηνίου. Πιο αναλυτικά, το όργανο μπορεί να μετρήσει συνεχή τάση από -30V έως 30V , συνεχές ρεύμα από -20mA έως 20mA , αντιστάσεις της τάξης των Ω μέχρι τάξης $\text{M}\Omega$, πυκνωτές που βρίσκονται στις δεκάδες pF μέχρι πυκνωτές που ξεπερνούν τα μF , και πηνία που η τιμή τους ξεκινάει στις δεκάδες μH και φτάνει τις λίγες δεκάδες mH . Ο στόχος για την ακρίβεια ήταν περίπου το 10%, όμως σε πολλές περιπτώσεις υπάρχει αρκετά καλύτερη ακρίβεια. Στα επόμενα κεφάλαια, θα εξεταστούν τα επί μέρους κυκλώματα μέτρησης με περισσότερες λεπτομέρειες.

Κεφάλαιο 2ο: Τα μεγέθη μέτρησης

Στο κεφάλαιο αυτό, θα γίνει αναφορά στα μεγέθη και στα υλικά που το όργανο της εργασίας θα έχει την δυνατότητα να μετρήσει. Θα εξηγηθούν οι ιδιότητες του κάθε μεγέθους, θα εξεταστούν οι τύποι που τις επιβεβαιώνουν και θα δοθούν παραδείγματα.

2.1 Τάση (Voltage)

Η ηλεκτρική τάση, ή αλλιώς διαφορά δυναμικού, ανάμεσα σε δύο σημεία που βρίσκονται σε ένα ηλεκτρικό πεδίο ορίζεται ως το πηλίκο της ενέργειας που απαιτείται ανά μονάδα φορτίου για να μετακινηθεί αυτό το φορτίο από το ένα σημείο στο άλλο. Η μονάδα μέτρησης στο διεθνές σύστημα μονάδων είναι το Volt και συμβολίζεται με V [1].

Το δυναμικό ενός σημείου Γ που βρίσκεται σε ηλεκτρικό πεδίο, ορίζεται ως το έργο που παράγεται κατά την μετακίνηση ηλεκτρικού φορτίου από το σημείο Γ ως το άπειρο, δηλαδή εκτός του πεδίου, προς την τιμή του φορτίου αυτού. Δηλαδή ισχύει ότι:

$$V_{\Gamma} = \frac{W_{\Gamma \rightarrow \infty}}{q} = \frac{U_{\Gamma}}{q} \quad (2.1)$$

Όπου:

- V_{Γ} είναι το δυναμικό στην θέση Γ ,
- $W_{\Gamma \rightarrow \infty}$ είναι το έργο της μετακίνησης του φορτίου από το σημείο Γ στο άπειρο,
- q είναι το φορτίο,
- U_{Γ} είναι η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια στο σημείο Γ , που ορίζεται ως η ενέργεια που χρειάστηκε για να βρεθεί ένα ηλεκτρικό φορτίο στο σημείο Γ , αν πριν βρισκόταν εκτός πεδίου.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η τάση αναφέρεται πάντα σε διαφορά δύο σημείων. Είναι προφανές πως δεν έχει νόημα η μέτρηση του δυναμικού ενός μόνο σημείου. Μια τάση ενός σημείου εννοείται πως έχει αναφορά την γείωση ενός κυκλώματος, δηλαδή το 0 που εμείς ορίσαμε. Επομένως, μια τάση V_{ab} ανάμεσα σε δύο σημεία a και b , ορίζεται ως η διαφορά των δυναμικών σε αυτά τα δύο σημεία, V_a και V_b , δηλαδή ισχύει ότι:

$$V_{ab} = V_a - V_b \quad (2.2)$$

2.2 Ρεύμα (Current)

Το ηλεκτρικό ρεύμα ορίζεται ως η προσανατολισμένη κίνηση ηλεκτρικών φορτίων κατά μήκος ενός ηλεκτρικού αγωγού. Στα ηλεκτρικά κυκλώματα, τα φορτία αυτά είναι συνήθως ηλεκτρόνια που κινούνται μέσα στους αγωγούς, ενώ παράλληλα στους ημιαγωγούς, τα φορτία μπορούν να είναι είτε ηλεκτρόνια, είτε οπές. Σύμφωνα με τον ορισμό του ηλεκτρικού ρεύματος, είναι προφανές ότι αφενός πρέπει να υπάρχουν φορείς ηλεκτρικού φορτίου με ελευθερία κίνησης και αφετέρου πρέπει να υπάρχει κάποιο αίτιο για την προσανατολισμένη κίνηση των φορτίων αυτών. Το αίτιο αυτό είναι η διαφορά δυναμικού που ευθύνεται στην ύπαρξη ενός ηλεκτρικού πεδίου [1].

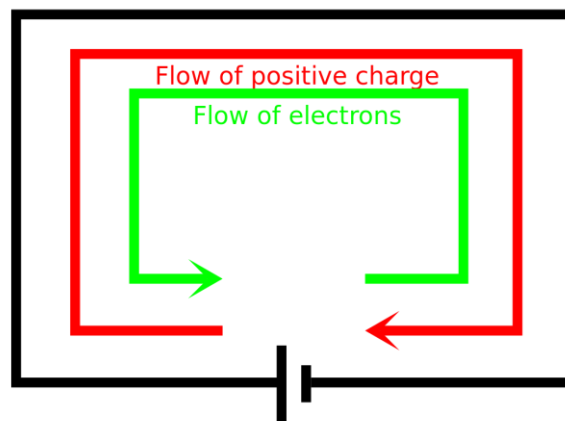
Το μέγεθος που μετράει το ρεύμα λέγεται ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, συμβολίζεται με I , μονάδα μέτρησης στο διεθνές σύστημα μονάδων είναι το Ampere, το οποίο συμβολίζεται με A. Η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος ορίζεται ως το μέγεθος του φορτίου που περνάει από την διατομή ενός αγωγού σε μια συγκεκριμένη χρονική διάρκεια, δηλαδή ισχύει ότι:

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (2.3)$$

Όπου:

- dQ είναι η διαφορά φορτίου στο τέλος και στην αρχή της χρονικής διάρκειας,
- dt είναι η χρονική διάρκεια.

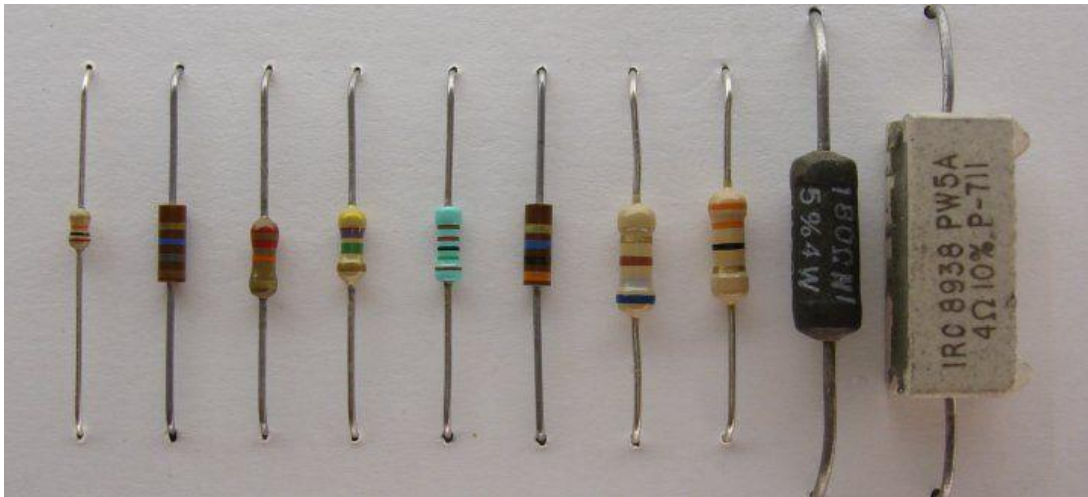
Το ηλεκτρικό ρεύμα έχει φορά κίνησης και στην επιστήμη αυτή είναι η συμβατική φορά. Δηλαδή θεωρούμε πως το ρεύμα κινείται από τα υψηλά δυναμικά προς τα χαμηλά. Στην πράξη, τις περισσότερες φορές, οι φορείς των ηλεκτρικών φορτίων είναι τα ηλεκτρόνια, τα οποία είναι αρνητικά φορτισμένα και έτσι κινούνται αντίστροφα από την συμβατική φορά. Επομένως, «η συμβατική φορά της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος είναι ταυτόσημη με τη φορά κίνησης των ηλεκτρικών φορτίων, όταν το ηλεκτρικό ρεύμα οφείλεται αποκλειστικά στην κίνηση θετικών φορτίων στον αγωγό» [1].



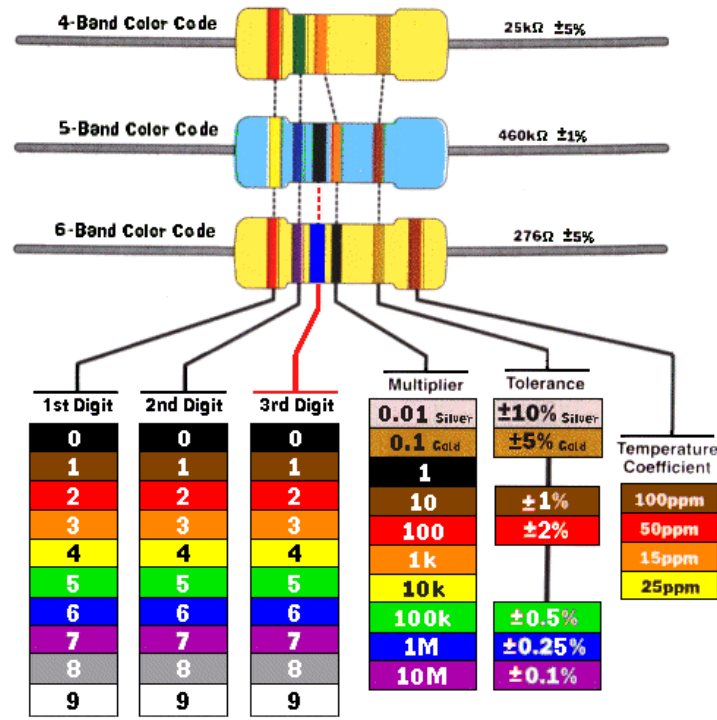
Εικόνα 2.1: Συμβατική και πραγματική φορά του ρεύματος σε ηλεκτρικό πεδίο [3]

2.3 Αντίσταση (Resistance)

Η ηλεκτρική αντίσταση ενός αντικειμένου είναι ένα μέγεθος που μας δείχνει το πόσο, αυτό το αντικείμενο, αντιστέκεται στην διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος, δηλαδή το πόσο πολύ δυσκολεύεται το ηλεκτρικό ρεύμα να περάσει δια μέσου αυτού του αντικειμένου. Το μέγεθος αυτό, συμβολίζεται με R και η μονάδα μέτρησής του στο διεθνές σύστημα μονάδων είναι το Ω (Ohm), που συμβολίζεται με Ω . Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (electrical conductance) είναι το αντίστροφο μέγεθος, δηλαδή ορίζει το πόσο εύκολη κάνει την διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος, συμβολίζεται με το γράμμα G και μονάδα της είναι το Siemens που συμβολίζεται με S και ισούται με Ω^{-1} . Γενικά, όλα τα υλικά παρουσιάζουν κάποια αντίσταση (με εξαίρεση τους υπεραγωγούς, των οποίων η αντίσταση είναι μηδενική κάτω από προϋποθέσεις)[1], αλλά στα ηλεκτρικά κυκλώματα χρησιμοποιούνται εξαρτήματα, γνωστά ως αντιστάσεις, τα οποία έχουν προκαθορισμένες τιμές αντίστασης. Οι τιμές αυτές, είτε αναγράφονται πάνω στο εξάρτημα, είτε δηλώνονται μέσω του χρωματικού κώδικα.



Εικόνα 2.2: Διάφορες αντιστάσεις [4]



Εικόνα 2.3: Χρωματικός κώδικας αντιστάσεων [5]

2.3.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή μιας αντίστασης

Η τιμή της αντίστασης ενός αντικειμένου εξαρτάται από δυο παράγοντες, οι οποίοι είναι:

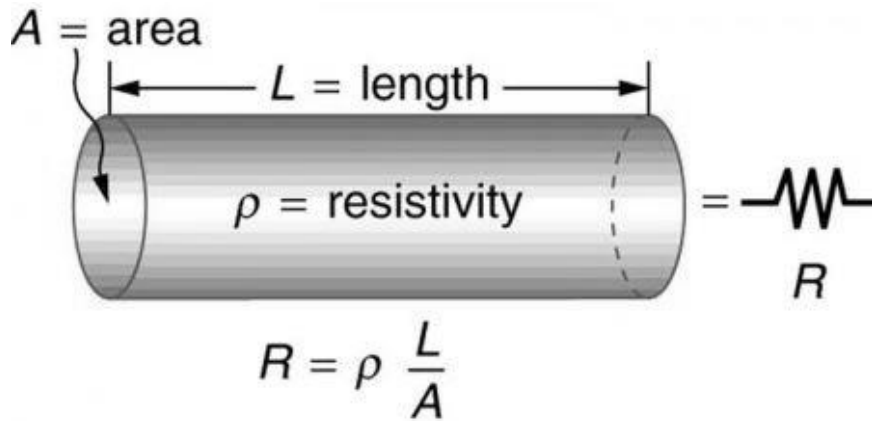
- το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένο το συγκεκριμένο αντικείμενο,
- το σχήμα του αντικειμένου, το οποίο με την σειρά του εξαρτάται από το μήκος και το εμβαδό.

Η αντίσταση ενός αντικειμένου είναι αντιστρόφως ανάλογη από το εμβαδό αυτού το αντικειμένου, για παράδειγμα ένα παχύ καλώδιο χαλκού έχει μικρότερη αντίσταση από ένα λεπτό καλώδιο χαλκού ίδιου μήκους. Επίσης, η αντίσταση ενός αντικειμένου είναι ανάλογη με το μήκος αυτού, για παράδειγμα ένα μακρύ καλώδιο χαλκού παρουσιάζει μεγαλύτερη συνολική αντίσταση από ένα λεπτό αλλά ίδιου πάχους καλώδιο χαλκού [1]. Τέλος, η αντίσταση ενός αντικειμένου, εξαρτάται από και είναι ανάλογη με ένα μέγεθος που ονομάζεται ειδική ηλεκτρική αντίσταση ή αντιστασιμότητα, το οποίο συμβολίζεται με το γράμμα ρ και μετριέται σε ohm-meters ($\Omega \cdot m$). Η ειδική αντίσταση είναι ανεξάρτητη από το σχήμα και τις διαστάσεις, εξαρτάται μόνο από το υλικό. Η αντίσταση και η αγωγιμότητα ενός αγωγού υπολογίζονται από τους τύπους:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.4)$$

$$G = \sigma \frac{A}{l} \quad (2.5)$$

Όπου, R είναι η αντίσταση, ρ είναι η ειδική αντίσταση, l είναι το μήκος του αγωγού, A είναι το εμβαδό της διατομής του, G είναι η αγωγιμότητα, σ είναι η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, είναι το αντίστροφο μέγεθος του ρ και μετριέται σε $S \cdot m^{-1}$.



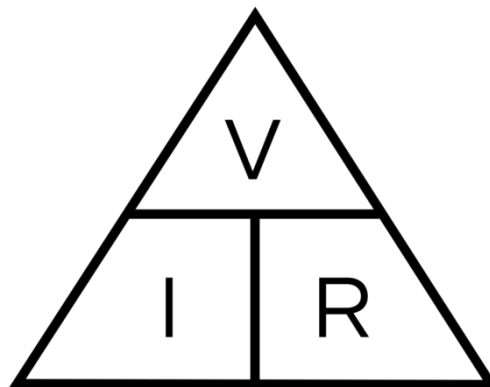
Εικόνα 2.4: Απεικόνιση ενός αντικειμένου που παρουσιάζει αντίσταση [6]

2.3.2 Σχέση τάσης, έντασης, αντίστασης και νόμος του Ωμ

Ο νόμος του Ωμ, συνδέει μαθηματικά τα μεγέθη της τάσης, της έντασης του ρεύματος και της αντίστασης.

Σύμφωνα με αυτόν, η ένταση του ρεύματος I που διαρρέει έναν αντιστάτη αντίστασης R είναι ευθέως ανάλογη με την διαφορά δυναμικού V που ασκείται στα άκρα αυτού του αντιστάτη, και ο λόγος της τάσης προς την ένταση ισούται με την τιμή της αντίστασης. Δηλαδή ισχύει:

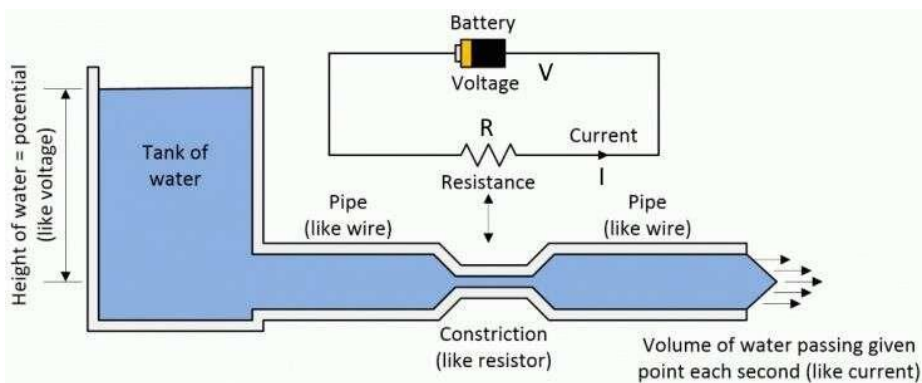
$$R = \frac{V}{I} \quad (2.6)$$



Εικόνα 2.5: Μαθηματικό τρίγωνο του νόμου του Ωμ [7]

2.3.3 Ο νόμος του Ωμ από άλλη οπτική γωνία

Για να γίνει πιο εύκολα κατανοητός ο νόμος του Ωμ, καθώς και τα μεγέθη της ηλεκτρικής τάσης, της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος και της ηλεκτρικής αντίστασης, ένας ηλεκτρικός αγωγός που διαρρέεται από ρεύμα μπορεί να παρομοιαστεί με έναν αγωγό νερού που διαρρέεται από νερό. Για παράδειγμα, το ισοδύναμο της ηλεκτρικής τάσης είναι η πίεση που επικρατεί μέσα στον αγωγό του νερού, η οποία είναι ανάλογη της ταχύτητας του νερού μέσα σε αυτόν. Όσο πιο παχύς είναι ο αγωγός του νερού και όσο μεγαλύτερη πίεση επικρατεί στο εσωτερικό του, τόσο μεγαλύτερος θα είναι ο όγκος του νερού που τον διαρρέει σε κάθε στιγμή, έτσι το ισοδύναμο της έντασης είναι η ποσότητα του νερού που διαρρέει τον αγωγό ανά μονάδα του χρόνου. Τέλος, η ηλεκτρική αντίσταση είναι ισοδύναμη με την αντίσταση του αγωγού λόγω της διατομής του, η οποία είτε δυσκολεύει, είτε διευκολύνει την διέλευση του νερού.



Εικόνα 2.6: Σύγκριση τάσης, έντασης, αντίστασης με ιδιότητες του νερού [8]

2.4 Πυκνωτές (capacitors) και χωρητικότητα (capacitance)

Ο πυκνωτής (capacitor) είναι ένα παθητικό ηλεκτρονικό στοιχείο που αποθηκεύει ενέργεια με την μορφή ηλεκτρικού πεδίου. Ο πρώτος πυκνωτής κατασκευάστηκε στο πανεπιστήμιο του Λέιντεν στην Ολλανδία το 1745 [1]. Αποτελείται από δύο γειτονικούς αγωγούς, οι οποίοι ονομάζονται οπλισμοί, ενώ ανάμεσά τους υπάρχει ένα μονωτικό υλικό, το οποίο ονομάζεται διηλεκτρικό, που μπορεί να είναι αέρας, πλαστικό, μίκα, γυαλί, κεραμικό, μεταξύ άλλων. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλά ηλεκτρικά κυκλώματα, και υπάρχουν μέσα σε πολλές συσκευές. Οι ιδανικοί πυκνωτές, σε αντίθεση με τις αντιστάσεις, δεν καταναλώνουν ενέργεια γιατί δεν παρουσιάζουν αντίσταση. Στην πράξη όμως, κάτι τέτοιο δεν ισχύει, γιατί όπως έχει ήδη αναφερθεί, όλα τα υλικά παρουσιάζουν κάποια αντίσταση.

Όταν ένας πυκνωτής φορτίζεται, οι οπλισμοί του αποκτούν ίσα (σε απόλυτη τιμή) και αντίθετα (σε πρόσημο) φορτία. Η απόλυτη τιμή του φορτίου, δηλαδή στην πράξη το φορτίο που παρουσιάζει ο θετικά φορτισμένος οπλισμός, ονομάζεται φορτίο του πυκνωτή και συμβολίζεται ως Q_c . Η διαφορά δυναμικού που υπάρχει ανάμεσα στους οπλισμούς ενός φορτισμένου πυκνωτή, ονομάζεται τάση του πυκνωτή και συμβολίζεται ως V_c . Η ιδιότητα ενός πυκνωτή να αποθηκεύει ενέργεια, ονομάζεται

χωρητικότητα (capacitance) και συμβολίζεται ως C . Η μονάδα μέτρησης της χωρητικότητας στο διεθνές σύστημα μονάδων, είναι το Farad (F). Το πηλίκο του φορτίου του πυκνωτή προς την τάση του πυκνωτή, ισούται με την χωρητικότητα, δηλαδή ισχύει [1]:

$$C = \frac{Q_C}{V_C} \quad (2.7)$$

2.4.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την χωρητικότητα ενός πυκνωτή

Η τιμή της χωρητικότητας ενός πυκνωτή, δεν εξαρτάται από την τάση ή το φορτίο του. Όπως και στην περίπτωση της αντίστασης, η τιμή της είναι σταθερή, δεδομένη, και εξαρτάται από το σχήμα και τα υλικά του εξαρτήματος, με εξαίρεση το υλικό των οπλισμών του. Για έναν επίπεδο πυκνωτή ισχύει ότι [1]:

$$C = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \frac{A}{d} \quad (2.8)$$

Όπου:

- C είναι η χωρητικότητα του πυκνωτή
- ε είναι η σχετική διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού και εξαρτάται από την φύση του
- ε_0 είναι η απόλυτη διηλεκτρική σταθερά του κενού και ισχύει $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
- A είναι το εμβαδόν των οπλισμών
- d είναι η απόσταση μεταξύ των οπλισμών.

2.4.2 Ενέργεια ενός πυκνωτή

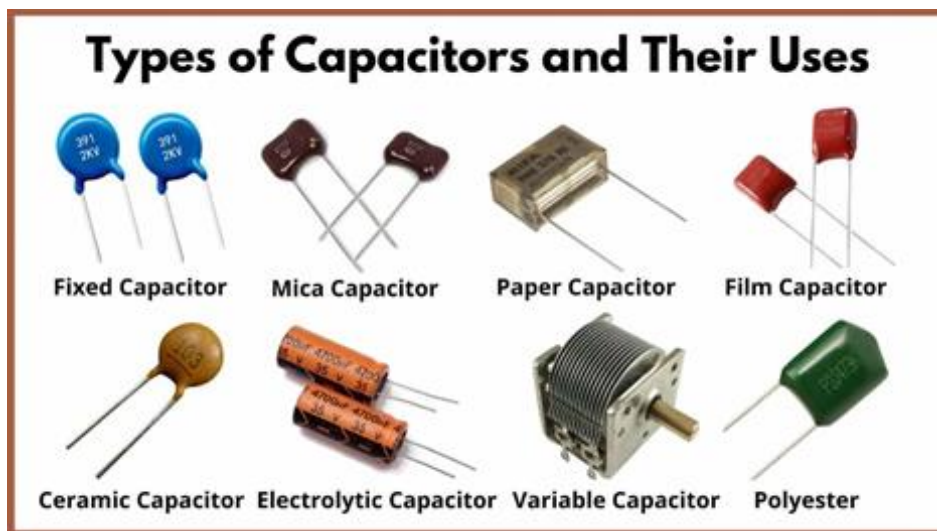
Ένας φορτισμένος πυκνωτής έχει αποθηκεύσει ενέργεια με μορφή ηλεκτρικού πεδίου. Η ενέργεια αυτή, συμβολίζεται με U_e , είναι ανεξάρτητη από τον τρόπο φόρτισης, εξαρτάται από την χωρητικότητα, την τάση, το φορτίο, και η τιμή της δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$U_e = \frac{1}{2} C \cdot V_C^2 = \frac{1}{2} \frac{Q_C^2}{C} = \frac{1}{2} Q \cdot V_C \quad (2.9)$$

2.4.3 Τύποι πυκνωτών

Οι πυκνωτές χωρίζονται σε διάφορους τύπους, με συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Μερικοί από αυτούς τους τύπους είναι οι ακόλουθοι [3]:

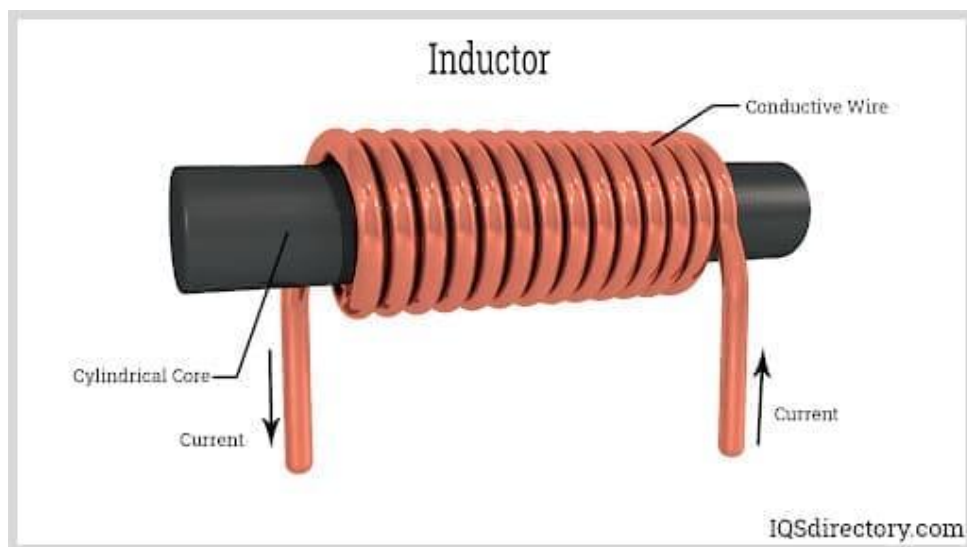
- Πυκνωτές χαρτιού,
- Πυκνωτές μεταλλοποιημένου χαρτιού,
- Πυκνωτές μίκας,
- Πυκνωτές λαδιού,
- Πυκνωτές πολυστερίνης,
- Κεραμικοί πυκνωτές,
- Πυκνωτές με πλαστικό διηλεκτρικό,
- Πυκνωτές γυαλιού,
- Ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές,
- Πυκνωτές τανταλίου,
- Υπερπυκνωτές,
- Πυκνωτές μεταβλητής τιμής.



Εικόνα 2.7: Διάφορα είδη πυκνωτών [9]

2.5 Πηνία (inductors) και αυτεπαγωγή (inductance)

Το πηνίο είναι ένας σπειροειδής αγωγός που το σχήμα του μοιάζει με ελατήριο. Είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο σε ηλεκτρικά κυκλώματα, παθητικό στοιχείο που έχει την ιδιότητα να αποθηκεύει ενέργεια με την μορφή μαγνητικού πεδίου και να αντιδράει στις μεταβολές του ρεύματος που το διαρρέει. Η ιδιότητα αυτή, ονομάζεται αυτεπαγωγή (inductance), συμβολίζεται με το γράμμα L και η μονάδα μέτρησής της στο διεθνές σύστημα μονάδων είναι το Henry (H). Το εσωτερικό του πηνίου μπορεί να περιέχει έναν πυρήνα από κάποιο σιδηρομαγνητικό υλικό ή μπορεί να είναι κενό [1]. Τα ιδανικά πηνία, σε αντίθεση με τις αντιστάσεις, δεν καταναλώνουν ενέργεια. Στην πράξη, το αγωγίμο υλικό του πηνίου παρουσιάζει αντίσταση και έτσι υπάρχει κατανάλωση ενέργειας πάνω στο ωμικό μέρος κάθε πηνίου.



Εικόνα 2.8: Πηνίο με πυρήνα [10]

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργεί ένα πηνίο, δίνεται από τον παρακάτω τύπο [1]:

$$B = \mu_0 \mu_r I \frac{n}{l} \quad (2.10)$$

Όπου :

- B είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου,
- μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού,
- μ_r είναι η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του υλικού του πυρήνα,
- I είναι η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο,
- n είναι ο αριθμός των σπειρών του πηνίου,
- l είναι το μήκος του αγωγού που αποτελεί το πηνίο.

Η ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύει ένα πηνίο με την μορφή μαγνητικού πεδίου, δίνεται από τον παρακάτω τύπο [1]:

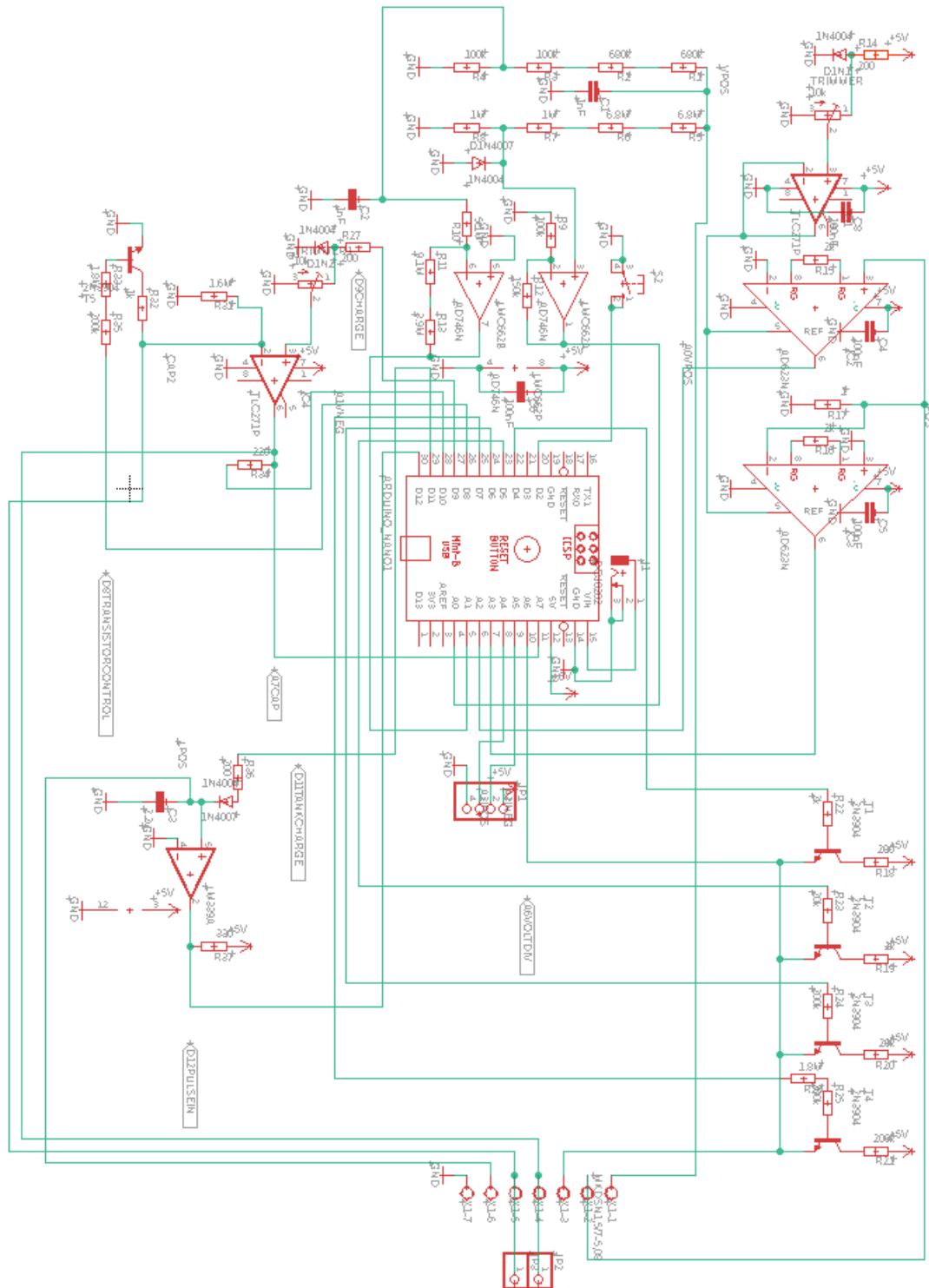
$$E = \frac{1}{2} L I^2 \quad (2.11)$$

Όπου :

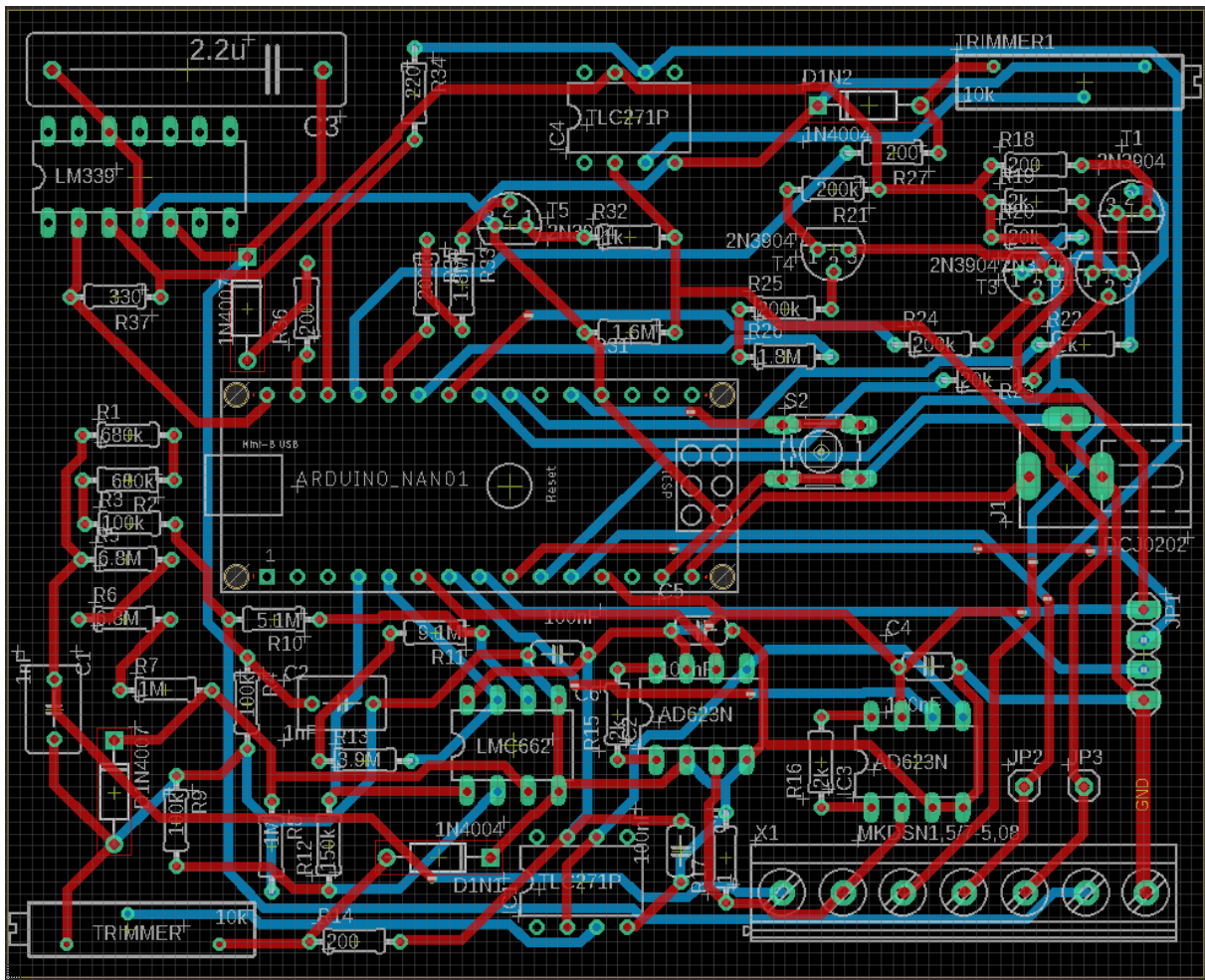
- E είναι η ηλεκτρική ενέργεια,
- L είναι ο συντελεστής αυτεπαγωγής του πηνίου,
- I είναι η ένταση ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει το πηνίο.

Κεφάλαιο 3ο: Ανάλυση των κυκλωμάτων

Στο κεφάλαιο αυτό, θα γίνει λεπτομερής ανάλυση των πέντε αυτόνομων κυκλωμάτων μέτρησης, θα εξεταστούν οι συνδεσμολογίες που υπάρχουν και θα εξηγηθούν οι λόγοι που χρησιμοποιήθηκαν αυτές αλλά και τα υλικά.



Εικόνα 3.1: Πλήρες κύκλωμα, έτσι όπως απεικονίζεται στο Eagle



Εικόνα 3.2: Η πλακέτα της εργασίας, έτσι όπως απεικονίζεται στο Eagle

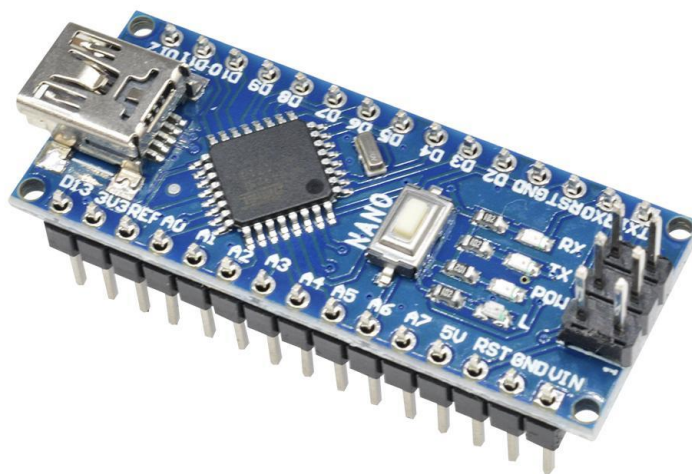
3.1 Λίγα λόγια για το Arduino Nano

Το Arduino Nano είναι μια πλακέτα βασισμένη στον μικροελεγκτή ATmega328, η οποία έχει μικρό μέγεθος και είναι συμβατή με ράστερ. Προγραμματίζεται μέσω της εφαρμογής Arduino IDE (Integrated Development Environment) χρησιμοποιώντας μια γλώσσα παρόμοια με την C. Η τάση λειτουργίας του είναι τα 5V, τα οποία θα είναι η τάση τροφοδοσίας όλου το αναλογικού μέρους του κυκλώματος της εργασίας, ενώ δέχεται τροφοδοσία είτε από υπολογιστή μέσω της θύρας USB, είτε από εξωτερικό τροφοδοτικό συνεχούς τάσης 6-20V. Περιλαμβάνει οχτώ αναλογικές εισόδους (A0-A7) (ADC 10 bit) [4]. Οι δύο από τις οχτώ εισόδους (A4,A5) θα χρησιμοποιηθούν για την επικοινωνία του ελεγκτή με την οθόνη, μέσω του πρωτοκόλλου I²C. Οι υπόλοιπες έξι θα χρησιμοποιηθούν στα κυκλώματα μέτρησης και συγκεκριμένα:

- το κύκλωμα μέτρησης τάσης θα χρησιμοποιήσει τις A0, A1,
- το κύκλωμα μέτρησης ρεύματος θα χρησιμοποιήσει τις A2, A3,
- το κύκλωμα μέτρησης αντίστασης θα χρησιμοποιήσει την A6,
- το κύκλωμα μέτρησης χωρητικότητας θα χρησιμοποιήσει την A7.

Το Arduino Nano επίσης περιλαμβάνει δεκατέσσερις ψηφιακές εισόδους/εξόδους (D0-D13), οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για πολλούς σκοπούς και συγκεκριμένα:

- η D2 θα χρησιμοποιηθεί για λειτουργία εξωτερικών διακοπών (external interrupt) μέσω ενός κουμπιού (push button) που θα αλλάζει την λειτουργία του οργάνου, άρα και το μετρούμενο μέγεθος,
- το κύκλωμα μέτρησης αντίστασης θα χρησιμοποιήσει τις D4, D5, D6, D7,
- το κύκλωμα μέτρησης χωρητικότητας θα χρησιμοποιήσει τις D8, D9, D10,
- το κύκλωμα μέτρησης αυτεπαγωγής θα χρησιμοποιήσει τις D11, D12.

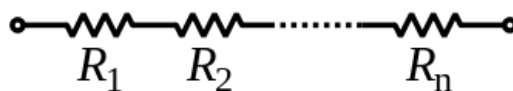


Εικόνα 3.3: Arduino Nano [11]

3.2.1 Αντίσταση εισόδου βολτομέτρου

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, τα βολτόμετρα, επειδή συνδέονται παράλληλα σε ένα κύκλωμα, πρέπει να έχουν μια πολύ μεγάλη αντίσταση εισόδου, ώστε να επηρεάσουν όσο γίνεται λιγότερο το υπόλοιπο κύκλωμα. Στο κύκλωμα της εικόνας (3.4), η αντίσταση εισόδου αποτελείται από τους δύο κλάδους, τεσσάρων αντιστάσεων ο κάθε ένας ($R_{18}, R_{19}, R_{21}, R_{20}, R_1, R_2, R_{15}, R_3$). Οι τέσσερις αντιστάσεις του κάθε κλάδου είναι συνδεδεμένες σε σειρά και θα διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα, για πλήθος n αντιστάσεων σε σειρά, η συνολική τους αντίσταση ισούται με [1]:

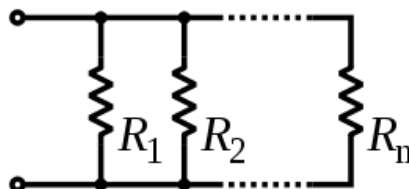
$$R_{total} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (3.1)$$



Εικόνα 3.5: Αντιστάσεις πλήθους n σε σειρά [3]

Επομένως, η αντίσταση του αριστερού κλάδου ($R_{18}, R_{19}, R_{21}, R_{20}$) ισούται με **1,56 MΩ**, ενώ η αντίσταση του δεξιού κλάδου (R_1, R_2, R_{15}, R_3) ισούται με **15,6 MΩ**. Οι δύο κλάδοι είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους παράλληλα και στα άκρα τους θα υπάρχει η ίδια διαφορά δυναμικού, για αντιστάσεις πλήθους n συνδεδεμένες παράλληλα, η συνολική τους αντίσταση ισούται με [1]:

$$\frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (3.2)$$



Εικόνα 3.6: Αντιστάσεις πλήθους n παράλληλα [3]

Ενώ στην περίπτωση που υπάρχουν μόνο δύο αντιστάσεις συνδεδεμένες παράλληλα, ο τύπος (3.2) απλοποιείται σε [1]:

$$R_{total} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.3)$$

Επομένως, η συνολική αντίσταση του κυκλώματος μέτρησης τάσης, που ισούται με τον παραλληλισμό των δύο αυτών κλάδων, είναι $R_{in}=1,418 \text{ M}\Omega$. Για να θεωρηθεί η επίδραση του βολτομέτρου πάνω στο κύκλωμα αμελητέα, το όργανο θα πρέπει να παραλληλιζείται με αντιστάσεις των οποίων η τιμή είναι τουλάχιστον 10 φορές μικρότερη από την αντίσταση εισόδου του. Δηλαδή, στην χειρότερη περίπτωση, η αντίσταση, που βρίσκεται παράλληλα με το όργανο μέτρησης, θα πρέπει να μην υπερβαίνει περίπου τα **140 kΩ**.

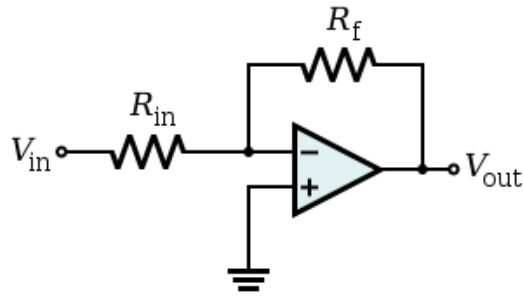
3.2.2 Αναστρέφων ενισχυτής (inverting amplifier)

«Ο αναστρέφων ενισχυτής είναι ένα από το πιο βασικά κυκλώματα ενίσχυσης. Χρησιμοποιεί αρνητική ανάδραση για να σταθεροποιήσει το ολικό κέρδος τάσης» [5]. Στην πράξη, το κέρδος τάσης ανοιχτού βρόχου των τελεστικών ενισχυτών A_{VOL} είναι πολύ μεγάλο και καθόλου σταθερό. Με την χρήση αρνητικής ανάδρασης μέσω της R_f πετυχαίνουμε μείωση και σταθεροποίηση του κέρδους στο επίπεδο που απαιτείται, ενώ ταυτόχρονα τα δυναμικά στις δύο εισόδους του ενισχυτή εξισώνονται. Ένας τελεστικός ενισχυτής σε συνδεσμολογία αναστρέφοντα ενισχυτή, όπως αυτός που απεικονίζεται στην εικόνα (3.7) έχει κέρδος $A_{V(CL)}$ για το οποίο ισχύει [5]:

$$A_{V(CL)} = -\frac{R_f}{R_{in}} \quad (3.4)$$

Αυτό σημαίνει πως η τάση εξόδου V_{out} , εκτός από ενισχυμένη κατά R_f/R_{in} , έχει και διαφορά φάσης κατά 180° σε σχέση με την τάση εισόδου V_{in} , δηλαδή αντιστρέφεται. Ένα από τα πλεονεκτήματα της συνδεσμολογίας του αναστρέφοντα ενισχυτή είναι πως η σύνθετη αντίσταση εισόδου $Z_{in(CL)}$ ρυθμίζεται και για αυτήν ισχύει [5]:

$$Z_{in(CL)} = R_{in} \quad (3.5)$$



Εικόνα 3.7: Αναστρέφων ενισχυτής [3]

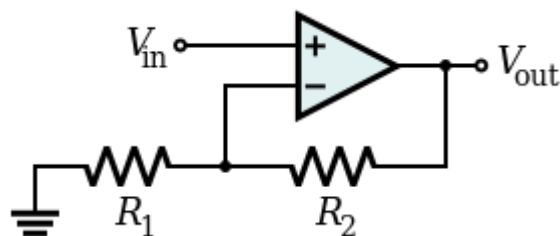
Επομένως, στο κύκλωμα της εικόνας (3.4), ο U4B λειτουργεί σαν αναστρέφων ενισχυτής με κέρδος $A_{V(CL)} = -2,55$ και σύνθετη αντίσταση εισόδου $Z_{in(CL)} = 5,1M\Omega$.

3.2.3 Μη αναστρέφων ενισχυτής (non inverting amplifier)

Ο μη αναστρέφων ενισχυτής είναι επίσης από τα πιο βασικά κυκλώματα ενίσχυσης, ενώ όπως και ο αναστρέφων, χρησιμοποιεί αρνητική ανάδραση για σταθεροποιήσει το ολικό κέρδος τάσης. Ένας μη αναστρέφων ενισχυτής, σε αντίθεση με έναν αναστρέφων, δεν μπορεί να έχει κέρδος χαμηλότερο από την μονάδα. Το κέρδος $A_{V(CL)}$ ενός μη αναστρέφοντα ενισχυτή όπως αυτός της εικόνας (3.8) είναι [5]:

$$A_{V(CL)} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (3.6)$$

Η σύνθετη αντίσταση εισόδου ενός μη αναστρέφοντα ενισχυτή θεωρείται άπειρη, στην πράξη είναι τόσο μεγάλη που η επίδρασή της σε ένα οποιοδήποτε κύκλωμα είναι συνήθως αμελητέα [1].



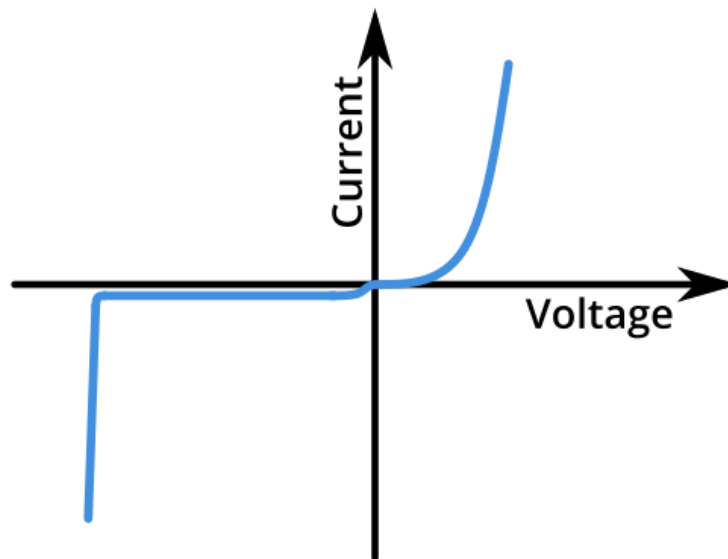
Εικόνα 3.8: Μη αναστρέφων ενισχυτής [3]

Επομένως, στο κύκλωμα της εικόνας (3.4), ο U4A λειτουργεί σαν μη αναστρέφων ενισχυτής με κέρδος $A_{V(CL)} = 2,5$ και σύνθετη αντίσταση εισόδου, που για τις ανάγκες του συγκεκριμένου κυκλώματος θα θεωρηθεί άπειρη.

3.2.4 Δίοδος

Η δίοδος είναι ένα ηλεκτρονικό εξάρτημα με δύο άκρα και η δουλειά της είναι να περιορίζει την ροή του ρεύματος προς μια κατεύθυνση και να επιτρέπει την ροή του ρεύματος προς την αντίθετη κατεύθυνση. Μερικά σημαντικά χαρακτηριστικά μιας διόδου είναι τα παρακάτω [1]:

- στην κατάσταση αγωγής, παρουσιάζεται μια σταθερή διαφορά δυναμικού στα άκρα της V_F , η οποία ισούται με περίπου 0,7 V στις διόδους πυριτίου, περίπου 0,3 V στις διόδους γερμανίου και περίπου 0,2 V στις διόδους Schottky, και η τάση αυτή επηρεάζεται ελάχιστα από το ρεύμα που διαρρέει την δίοδο (εφόσον αυτό είναι αρκετό για την πόλωσή της),
- στην κατάσταση αποκοπής, υπάρχει ένα ρεύμα διαρροής προς την αντίθετη κατεύθυνση το οποίο στις περισσότερες εφαρμογές θεωρείται αμελητέο,
- η δίοδος μπορεί να άγει στην κατάσταση αποκοπής, αν η αντίστροφη τάση που ασκείται στα άκρα της ξεπεράσει την τάση κατάρρευσης της κάθε διόδου (η οποία συνήθως είναι υψηλή για τις τυπικές διόδους), αυτό συχνά μπορεί να καταστρέψει μια δίοδο που δεν είναι σχεδιασμένη να λειτουργεί στην περιοχή κατάρρευσης.



Εικόνα 3.9: Καμπύλη V - I για μια τυπική δίοδο [13]

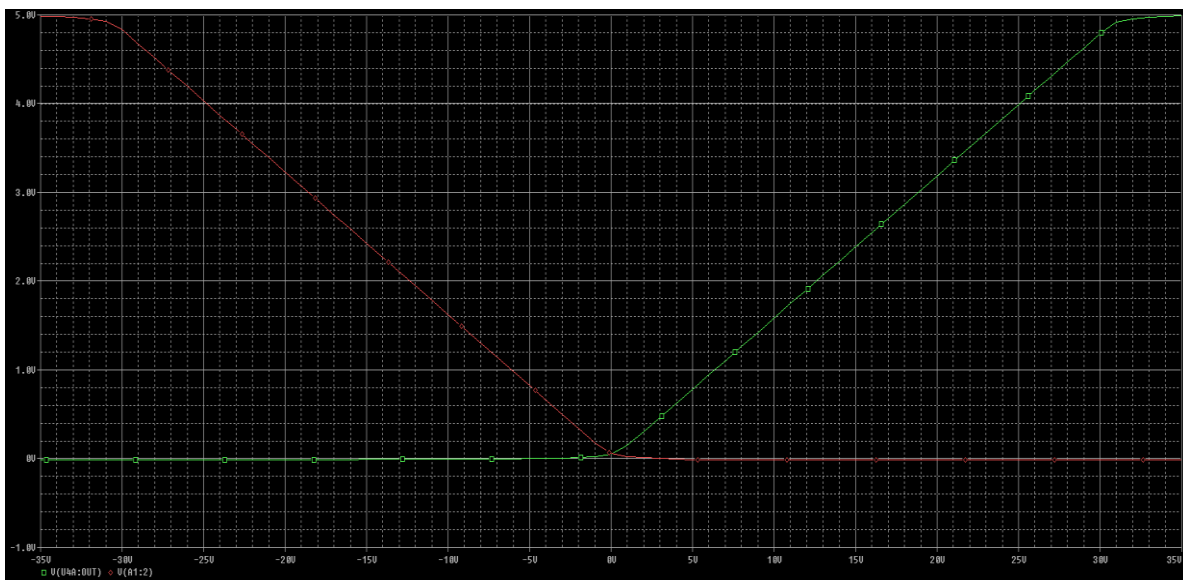
Μια χρήσιμη ιδιότητα των διόδων (και ο λόγος που χρησιμοποιείται στο κύκλωμα μέτρησης τάσης) είναι πως μπορούν να περιορίσουν την τάση του εξαρτήματος που συνδέεται παράλληλα σε αυτές, συνήθως γύρω στα 0,7 V ή ακόμα χαμηλότερα αν το ρεύμα πόλωσής τους δεν είναι επαρκές. Δηλαδή η χρήση διόδου είναι ένας απλός τρόπος για να προστατευτεί ένα εξάρτημα από υπέρταση.

3.2.5 Ανάλυση του αναλογικού μέρους του κυκλώματος μέτρησης τάσης

Όπως αναφέρθηκε, τα τρία βασικά μέρη του κυκλώματος μέτρησης τάσης είναι η αντίσταση εισόδου, ο μη αναστρέφων ενισχυτής και ο αναστρέφων ενισχυτής. Είναι προφανές πως σαν είσοδο, οι δυο ενισχυτές παίρνουν μόνο ένα μέρος της ολικής τάσης που ασκείται στα άκρα της αντίστασης εισόδου. Για την ακρίβεια, μόνο το 6,41% της ολικής τάσης έρχεται σαν τάση εισόδου στους δύο ενισχυτές. Έτσι αυξάνεται το εύρος μέτρησης του οργάνου, αφού κάθε τελεστικός ενισχυτής έχει μονοπολική τροφοδοσία 5V, έτσι η τάση εισόδου πρέπει να βρίσκεται ανάμεσα στα 0 και στα 5V. Το κέρδος κάθε ενισχυτή είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε αυτός να φτάνει στο μέγιστο της εξόδου του (περίπου τα 5V) όταν η ολική τάση είναι περίπου 30V. Αυτό συμβαίνει γιατί $30 \cdot 0,0641 \cdot 2,5 = 4,8$. Δηλαδή, 30V επί το ποσοστό της τάσης που φτάνει ως είσοδο στον κάθε ενισχυτή επί το κέρδος του ενισχυτή δίνει ως αποτέλεσμα τα 4,8V που είναι προσεγγιστικά η τάση κόρου του LMC662 σύμφωνα με το datasheet του [6]. Πάνω από τα 30V και περίπου ως τα 80V, ο τελεστικός προστατεύεται από υπέρταση, ενώ πάνω από τα 80V η τάση εισόδου θα ξεπεράσει την τάση τροφοδοσίας του. Για βέλτιστη λειτουργία, σαν μέγιστη τάση εισόδου, ο LMC662 δέχεται περίπου τα 2,5V (δηλαδή 2,5V κάτω από το θετικό άκρο τροφοδοσίας του). Στην περίπτωση της μέγιστης τάσης μέτρησης των 30V, ως είσοδο στους ενισχυτές θα φτάνουν $30 \cdot 0,0641 = 1,923V$ για να εξασφαλιστεί η κανονική λειτουργία τους.

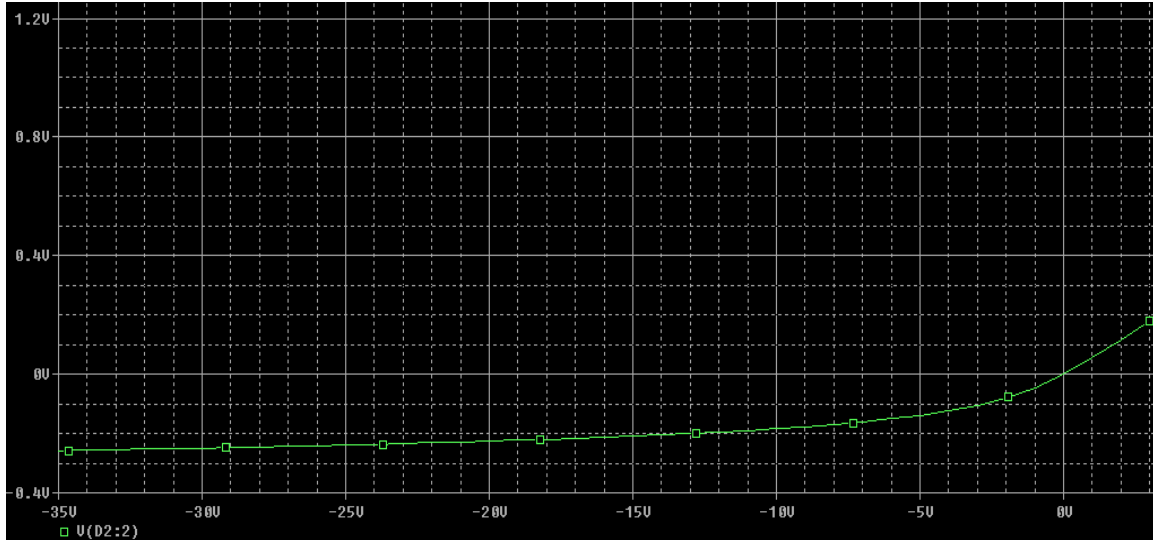
Η προσαρμογή ανάμεσα στην R3 και στον U4A, είναι ιδανική, αφού η αντίσταση εισόδου του μη αναστρέφοντα ενισχυτή θεωρείται άπειρη για τις ανάγκες του κυκλώματος. Η προσαρμογή ανάμεσα στην R20 και στον U4B γίνεται μέσω της R13. Το ποσοστό της τάσης που θα φτάσει ως είσοδος στον ενισχυτή λόγω της προσαρμογής είναι 98,07% γιατί $R13 / (R13 + R20) = 0,9807$. Ο αναστρέφων ενισχυτής έχει λίγο μεγαλύτερο κέρδος από τον μη αναστρέφων, γιατί $0,9807 \cdot 2,55 = 2,5$. Έτσι επιτυγχάνεται το ίδιο κέρδος και στους δύο ενισχυτές.

Όπως φαίνεται, ο U4A ενισχύει τις θετικές τάσεις, ενώ για αρνητικές τάσεις η έξοδός του βρίσκεται κοντά στο 0, και η έξοδός του συνδέεται με την αναλογική είσοδο A0 του Arduino. Ο U4B ενισχύει τις αρνητικές τάσεις, ενώ για θετικές τάσεις η έξοδός του βρίσκεται κοντά στο 0, και η έξοδός του συνδέεται με την αναλογική είσοδο A1 του Arduino.



Εικόνα 3.10: Τάση εξόδου των δύο ενισχυτών για τάση μέτρησης από -35V έως 35V, όπως απεικονίζεται στο Spice

Η αναστρέφουσα είσοδος του U4B προστατεύεται από αρνητικά δυναμικά λόγω του φαινομενικού βραχυκυκλώματος με την μη αναστρέφουσα είσοδο, που το δυναμικό της βρίσκεται στην γείωση. Όμως, η μη αναστρέφουσα είσοδος του U4A είναι εκτεθειμένη σε αρνητικά δυναμικά και για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιείται η διάδος D2. Σύμφωνα με προσομοίωση που έγινε στο Spice, με την χρήση διόδου 1N4007, η τάση στην μη αναστρέφουσα είσοδο του U4A δεν ξεπερνάει (σε απόλυτη τιμή) τα -300mV στην χειρότερη περίπτωση.



Εικόνα 3.11: Τάση στην μη αναστρέφουσα είσοδο του U4A με χρήση διόδου, όπως απεικονίζεται στο Spice

Τέλος, ο πυκνωτής C4 χρησιμοποιείται για μείωση του θορύβου της τάσης μέτρησης πάνω στην αντίσταση εισόδου. Οι πολύ μεγάλες αντιστάσεις ανάδρασης και εισόδου στον U4B, τιμών 13MΩ και 5,1MΩ αντίστοιχα, χρησιμοποιήθηκαν αναγκαστικά για να γίνει καλή προσαρμογή ανάμεσα στην R20 και στον U4B, όμως μπορούν να προκαλέσουν θόρυβο και για αυτό χρησιμοποιείται ο πυκνωτής C2. Ο πυκνωτής C3 χρησιμοποιείται για να σταθεροποιήσει την τροφοδοσία του LMC662, η οποία γίνεται μέσω του Arduino.

Το ολοκληρωμένο κύκλωμα LMC662 επιλέχθηκε γιατί περιέχει δύο τελεστικούς ενισχυτές με rail-to-rail έξοδο, δηλαδή θα εκμεταλλευτεί σχεδόν πλήρως τον ADC του Arduino, ο οποίος δέχεται είσοδο από 0 έως 5V. Επίσης ο LMC662, λειτουργεί με μονοπολική τροφοδοσία 5V, κάτι που είναι απαραίτητο γιατί τροφοδοτείται από το Arduino. Τέλος, δέχεται ως είσοδο ακόμα και τα 0V, άρα δεν θα έχει πρόβλημα στην μέτρηση τάσεων γύρω από το 0.

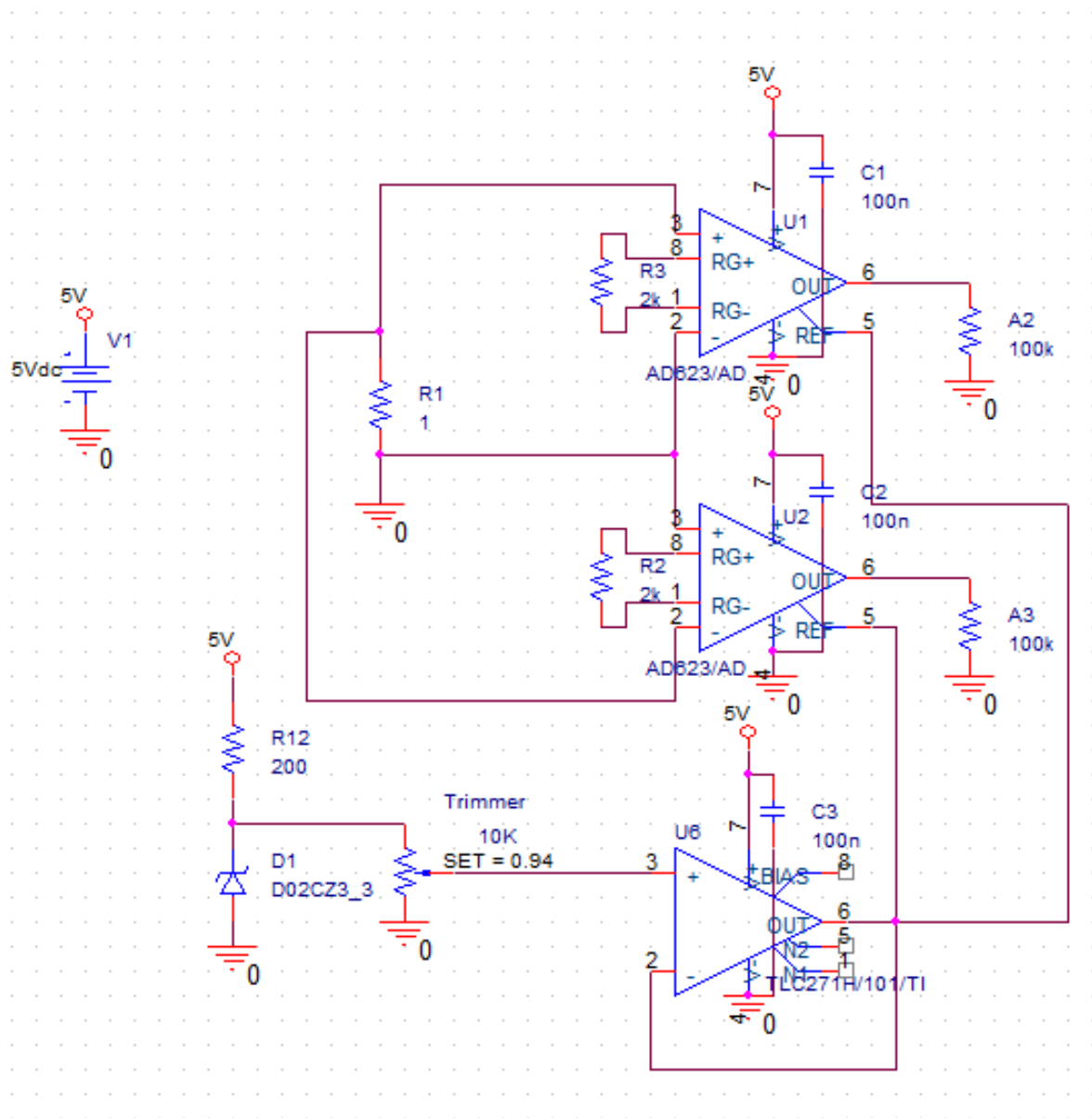
3.2.6 Ανάλυση του ψηφιακού μέρους του κυκλώματος μέτρησης τάσης

Όπως ήδη αναφέρθηκε και φάνηκε στην εικόνα (3.10), κάθε στιγμή υπάρχει μόνο ένας ενισχυτής που δίνει έξοδο πάνω από 0V. Επομένως, ο ελεγκτής επιλέγει την μεγαλύτερη τάση και «αφαιρεί» τα κέρδη των βαθμίδων του ενισχυτή και της αντίστασης εισόδου, για να καταλήξει στην αρχική τάση

μέτρησης. Το πρόσημο της τάσης ορίζεται από τον ενισχυτή που δεν βρίσκεται σε αρνητικό κόρο εκείνη την στιγμή (U4A και είσοδος A0 για θετικά, U4B και είσοδος A1 για αρνητικά). Ενώ έγινε προσπάθεια απαλοιφής θορύβου στο αναλογικό κύκλωμα, για να ενισχυθεί το αποτέλεσμα αυτό, ο ελεγκτής μετράει 20 φορές την τιμή της τάσης ανά δευτερόλεπτο, και στο τέλος του δευτερολέπτου εμφανίζει τον μέσο όρο τους.

3.3 Κύκλωμα μέτρησης έντασης του ρεύματος

Στην συνέχεια, θα αναλυθεί το κύκλωμα μέτρησης έντασης του ρεύματος, πρώτα όμως θα πρέπει να εξηγηθούν οι βασικές αρχές και συνδεσμολογίες που χρησιμοποιούνται στο κύκλωμα.



Εικόνα 3.12: Κύκλωμα μέτρησης έντασης του ρεύματος, όπως απεικονίζεται στο Spice

3.3.1 Αντίσταση αμπερομέτρου

Σε προηγούμενο κεφάλαιο εξηγήθηκε πως τα αμπερόμετρα, επειδή συνδέονται σε σειρά με ένα κύκλωμα, πρέπει να έχουν όσο γίνεται μικρότερη αντίσταση (ιδανικά μηδενική), ώστε η επίδρασή τους στο κύκλωμα να θεωρείται αμελητέα. Όπως φαίνεται στην εικόνα (3.12), η αντίσταση του οργάνου μέτρησης είναι η R_1 και έχει τιμή $1\ \Omega$. Στα περισσότερα κυκλώματα ηλεκτρονικών, η τιμή αυτή θεωρείται αμελητέα, καθώς συνήθως χρησιμοποιούνται μεγάλες αντιστάσεις και τα ρεύματα που υπάρχουν είναι μικρά. Οι τιμές του ρεύματος που μετράει το όργανο αυτό, δεν υπερβαίνουν (σε απόλυτη τιμή) τα $20\ \text{mA}$, για αυτόν τον λόγο επιλέχθηκε μια αντίσταση τιμής $1\ \Omega$, ισχύος $\frac{1}{4}\ \text{W}$ και ανοχής 1% . Για την ισχύ P που καταναλώνει μια αντίσταση ισχύει [1]:

$$P = IV = I^2R = \frac{V^2}{R} \quad (3.7)$$

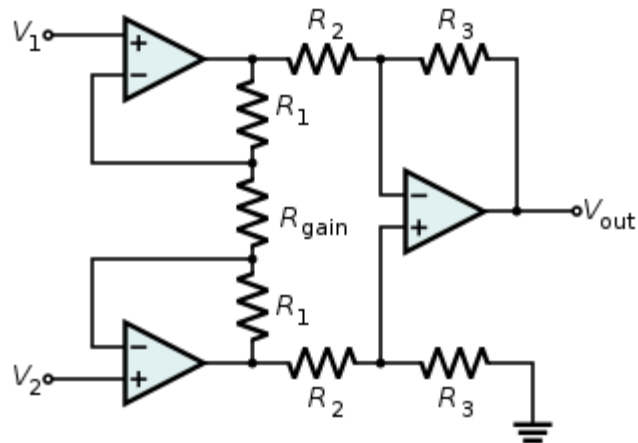
Σύμφωνα με τον τύπο (3.7), η μέγιστη ισχύς που θα καταναλωθεί πάνω στην αντίσταση R_1 ισούται με $(20\ \text{mA})^2 = 0,4\ \text{mW}$. Επομένως, η θεωρητική αντοχή της αντίστασης των $250\ \text{mW}$ είναι αρκετή. Με αυτήν την αντοχή, η αντίσταση του αμπερομέτρου προστατεύεται από ρεύματα τιμής ως $500\ \text{mA}$.

3.3.2 Ενισχυτές οργανολογίας

Πολλές φορές, τα σήματα που θέλουμε να ενισχύσουμε είναι χαμηλής στάθμης και παρουσιάζουν υψηλό θόρυβο. Ο σκοπός είναι να διαχωριστεί το σήμα μέτρησης από τον θόρυβο και να υπάρξει μια πρώτη ενίσχυσή του. Η ποιότητα της συνολικής ενίσχυσης βασίζεται πολύ στην πρώτη ενίσχυση και για αυτό σε τέτοιες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται ειδικοί ενισχυτές. Οι ενισχυτές αυτοί, ονομάζονται ενισχυτές οργανολογίας (instrumentation amplifier) και παρουσιάζουν κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, τα οποία είναι [6]:

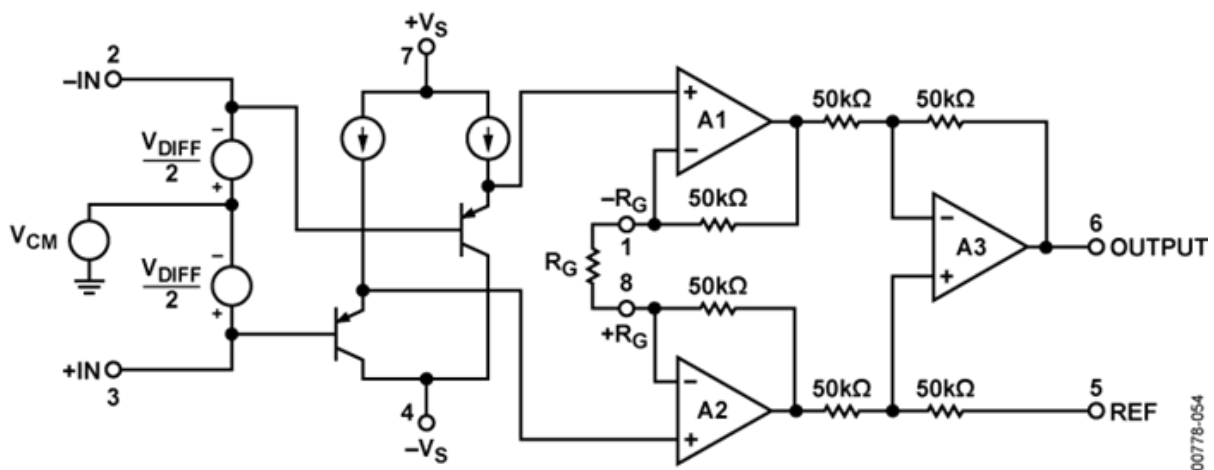
- πολύ μεγάλη (ιδανικά άπειρη) αντίσταση εισόδου,
- πολύ μικρή (ιδανικά μηδενική) αντίσταση εξόδου,
- πολύ μεγάλο λόγο απόρριψης κοινού σήματος CMRR (για μείωση του θορύβου),
- εύκολο έλεγχο κέρδους από μία αντίσταση που παρουσιάζει σταθερότητα και ακρίβεια.

Στην περίπτωση του κυκλώματος της εικόνας (3.12), το μετρούμενο μέγεθος (δηλαδή η πτώση τάσης πάνω στην R_1) θα είναι συχνά της τάξης μερικών μόνο mV και δεν θα υπερβαίνει ποτέ τα $20\ \text{mV}$. Για να υπάρχει ακρίβεια στην ενίσχυση ενός τόσο μικρού σήματος, χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί ένας ενισχυτής οργανολογίας. Οι ενισχυτές οργανολογίας μπορούν να είναι είτε ολοκληρωμένα κυκλώματα, είτε συνδυασμός δύο, τριών, ή τεσσάρων απλών τελεστικών ενισχυτών. Στην εικόνα (3.13) φαίνεται ένας τυπικός ενισχυτής οργανολογίας που αποτελείται από τρεις τελεστικούς ενισχυτές.



Εικόνα 3.13: Διάγραμμα ενός τυπικού ενισχυτή οργανολογίας [3]

Για την μείωση του χώρου και των απαιτούμενων εξαρτημάτων, αλλά και για την αύξηση της ακρίβειας και του εύρους εισόδου του ενισχυτή, χρησιμοποιήθηκε το ολοκληρωμένο κύκλωμα AD623 (μαζί με τον TLC271 για την παροχή τάσης αναφοράς V_{REF}) αντί για έναν συνδυασμό τεσσάρων τελεστικών ενισχυτών. Σύμφωνα με το datasheet, το κέρδος του AD623 με αντίσταση κέρδους $R_G=2k\Omega$ ισούται με **49,78**. Εφόσον η απόλυτη τιμή του ρεύματος μέτρησης, σε αυτό το όργανο, δεν θα ξεπερνάει τα 20mA, αυτό σημαίνει ότι η μετρούμενη τάση δεν θα ξεπερνάει τα 20mV με βάση τον νόμο του Ω . Για την μέγιστη είσοδο των 20mV, η ενισχυμένη τάση εξόδου θα είναι περίπου 1V (ή 1,2V αν λάβουμε υπόψη την V_{REF} που θα αναφερθεί παρακάτω).

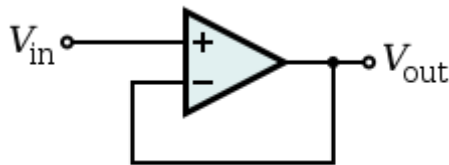


Εικόνα 3.14: Διάγραμμα του AD623 [12]

3.3.3 Ακόλουθος τάσης (buffer)

Ο ακόλουθος τάσης (buffer) είναι μια συνδεσμολογία ενισχυτή που χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλά αναλογικά ηλεκτρονικά κυκλώματα. Η συνδεσμολογία του μοιάζει με αυτή του μη αναστρέφοντα ενισχυτή, το κέρδος του όμως είναι ίσο με την μονάδα. Αν συγκρίνουμε τις εικόνες (3.8) και (3.15), βλέπουμε πως πρακτικά η συνδεσμολογία είναι η ίδια και επιπλέον ισχύει $R_2=0$ και $R_1=\infty$. Με βάση αυτά και τον τύπο (3.6) καταλήγουμε ότι για τον ακόλουθο τάσης ισχύει:

$$A_{V(CL)} = 1 \quad (3.8)$$



Εικόνα 3.15: Διάγραμμα buffer [3]

Ένα από τα πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα του ακόλουθου τάσης, και ο λόγος που χρησιμοποιείται στο κύκλωμα της εικόνας (3.11), είναι το γεγονός ότι κάνει πολύ εύκολη την προσαρμογή των βαθμίδων, γιατί έχει πολύ μεγάλη (θεωρητικά άπειρη) αντίσταση εισόδου και πολύ μικρή (θεωρητικά μηδενική) αντίσταση εξόδου.

3.3.4 Δίοδος Zener

Οι τυπικές διόδους εξηγήθηκαν στην ενότητα 3.2.4. Μια δίοδος Zener είναι μια δίοδος με ειδικά σχεδιασμένη τάση κατάρρευσης V_Z , σε σημείο που η χρήση της στην περιοχή κατάρρευσης με αντίστροφη πόλωση να είναι βολική και ταυτόχρονα να μην κινδυνεύει η ίδια η δίοδος λόγω της υπερβολικής ισχύος. Χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές σταθεροποίησης τάσης, και αυτός είναι ο λόγος που θα χρησιμοποιηθεί και στο κύκλωμα της εργασίας. Η καμπύλη της δεν διαφέρει ουσιαστικά από αυτή της εικόνας (3.9), η ειδοποιός διαφορά είναι η τιμή της τάσης κατάρρευσης.

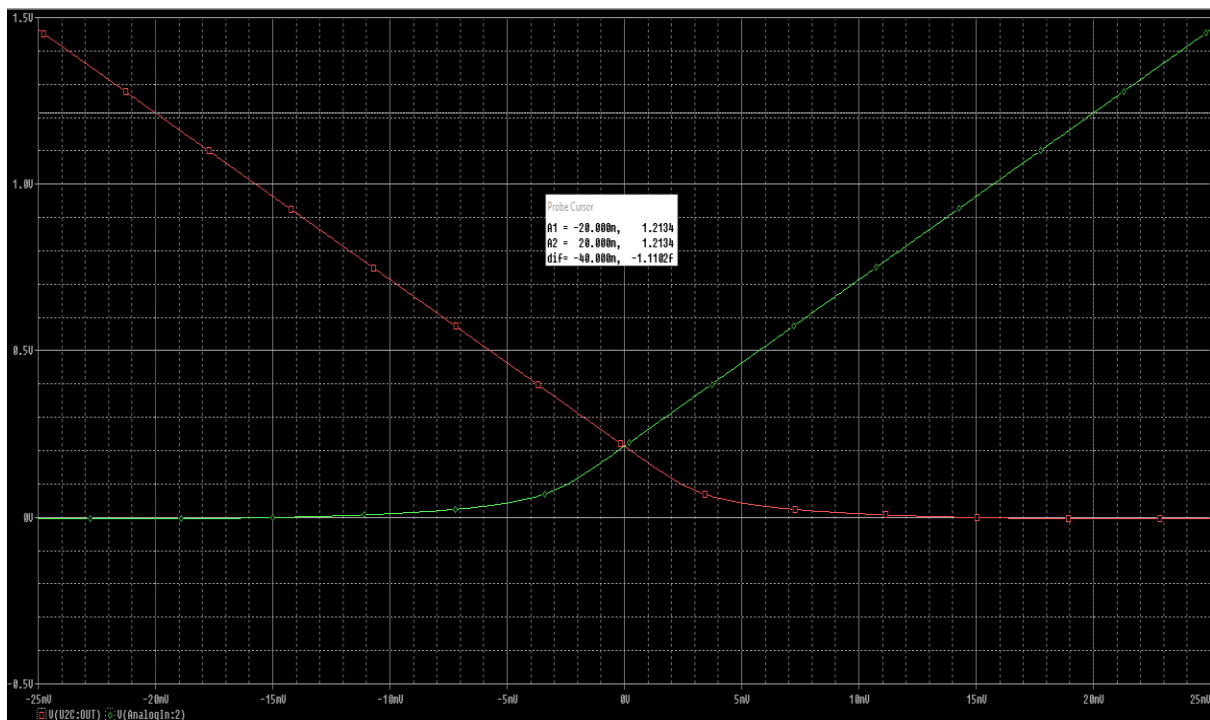
3.3.5 Τάση αναφοράς

Ακόμα και ενισχυτές με rail-to-rail έξοδο, όπως ο AD623, δεν παρουσιάζουν γραμμική συμπεριφορά ακριβώς πάνω στα άκρα τροφοδοσίας τους. Με ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα όπως αυτό του AD623, η προσθήκη τάσης αναφοράς γίνεται εύκολα, και πλέον ο ενισχυτής δεν δουλεύει ακριβώς πάνω στο 0 (αρνητικό άκρο τροφοδοσίας). Όπως φαίνεται στο κύκλωμα της εικόνας (3.11), υπεύθυνος για την παροχή τάσης τροφοδοσίας στους ενισχυτές είναι ο TLC271.

3.3.6 Ανάλυση του αναλογικού μέρους του κυκλώματος μέτρησης έντασης του ρεύματος

Στην εικόνα (3.12) φαίνεται πως το κύκλωμα αποτελείται από δύο ενισχυτές οργανολογίας (U1,U2), όπου ο U1 ενισχύει τις θετικές τάσεις και ο U2 ενισχύει τις αρνητικές τάσεις. Επομένως, ο U1 ευθύνεται για την προσαρμογή των θετικών ρευμάτων που διαρρέουν την αντίσταση αμπερομέτρου R1, ενώ ο U2 είναι υπεύθυνος για τα αρνητικά ρεύματα. Όπως φαίνεται, έξοδος του U1 είναι η αναλογική είσοδος A2, έξοδος του U2 είναι η αναλογική είσοδος A3. Το κύκλωμα συμπληρώνει ο U6, που σε συνδυασμό με την δίοδο zener D1 τάσης $V_z=3,3V$, παρέχει μια σταθερή τάση αναφοράς στους δύο ενισχυτές οργανολογίας, η οποία ισούται με **200mV**.

Πιο αναλυτικά, η δίοδος των 3,3V και ισχύος $\frac{1}{4}W$ αντέχει μέγιστο ρεύμα 75 mA. Εφαρμόζοντας τον νόμο του Ωμ για την R12 ισχύει ότι $I=(5-3,3)/200=8,5$ mA. Επομένως η δίοδος D1 διαρρέεται από ρεύμα τιμής **8,5mA** που είναι λίγο μεγαλύτερο από το 1/10 της μέγιστης τιμής που μπορεί να αντέξει η δίοδος, άρα είναι αρκετό για την σταθεροποίηση της τάσης στα άκρα της. Στον υπολογισμό του ρεύματος, το trimmer αντίστασης 10kΩ μπορεί να αγνοηθεί, καθώς το ρεύμα που το διαρρέει είναι σημαντικά μικρότερο από 1mA. Το trimmer αυτό, δημιουργεί έναν διαιρέτη τάσης που επιτρέπει την ακριβή επιλογή της τιμής της τάσης αναφοράς που θέλουμε να φτάσει στον U6. Λόγω της ιδιότητας της διόδου να κρατάει σχετικά σταθερή την τάση στα άκρα της, οι διαφορές στην τιμή της τάσης αναφοράς που υπό άλλες συνθήκες θα υπήρχαν λόγω του θορύβου στην τροφοδοσία του Arduino, είναι πλέον αμελητέες. Ο U6 λειτουργεί ως ακόλουθος τάσης και παρέχει μια τάση αναφοράς τιμής 200mV στους ενισχυτές οργανολογίας U1 και U2. Όπως και στο κύκλωμα μέτρησης τάσης, μόνο ένας ενισχυτής λειτουργεί κάθε φορά, ανάλογα με το πρόσημο του μεγέθους μέτρησης, ενώ ο άλλος βρίσκεται σε αρνητικό κόρο, που στην συγκεκριμένη περίπτωση ισούται με 200 mV. Οι δύο ενισχυτές με κέρδος περίπου 50, πρέπει να φτάνουν στην θετική τιμή των 1,2V όταν το μετρούμενο μέγεθος έχει απόλυτη τιμή περίπου 20mV, αυτό φαίνεται στην εικόνα (3.16).



Εικόνα 3.16: Τάση εξόδου U1, U2, για τιμές εισόδου από -25mV ως 25mV, όπως απεικονίζεται στο Spice

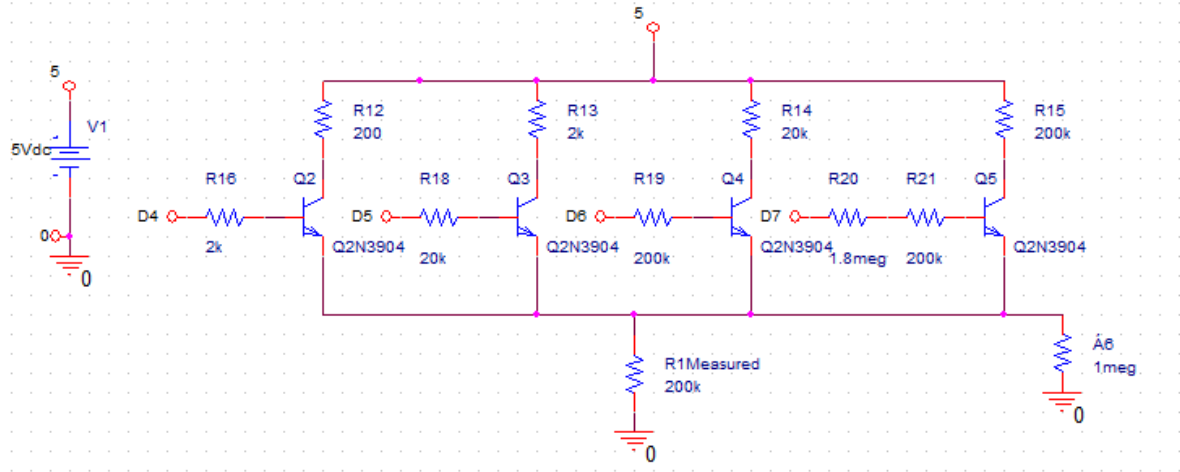
Η διάδοος zener, πρέπει να έχει τάση κατάρρευσης σχετικά μεγάλης τιμής, ώστε οι μεταβολές της τάσης να αποτελούν μόνο ένα μικρό ποσοστό της συνολικής και να μην επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό το τελικό αποτέλεσμα. Η τιμή ισχύος $\frac{1}{4}W$ επιλέχθηκε έτσι ώστε το ρεύμα πόλωσης να είναι μικρό. Το trimmer αντίστασης που βρίσκεται παράλληλα με την διάοδο, πρέπει να είναι μεγάλης τιμής, ώστε να μην επηρεάζει το ρεύμα που διαρρέει την διάοδο, έτσι δεν υπάρχει ανάγκη χρήσης τελεστικού ενισχυτή ως buffer για απομόνωση ανάμεσα στην διάοδο και στον διαιρέτη τάσης που δημιουργεί το trimmer. Ο τελεστικός ενισχυτής TLC271 επιλέχθηκε γιατί δέχεται μονοπολική τροφοδοσία 5V, δέχεται τάσεις ακόμα και κάτω από 0 στην είσοδό του, και η έξοδός του περιλαμβάνει το αρνητικό άκρο τροφοδοσίας [5]. Δηλαδή, μπορεί να τροφοδοτηθεί από το Arduino, δέχεται τα 200mV στην είσοδο αλλά μπορεί και να δώσει 200mV στην έξοδό του. Ο ενισχυτής οργανολογίας AD623 επιλέχθηκε γιατί δέχεται μονοπολική τροφοδοσία 5V, δέχεται τάσεις ακόμα και κάτω από 0 στην είσοδό του, το οποίο είναι πολύ σημαντικό γιατί τα σήματα που θα ενισχύει θα βρίσκονται ακριβώς πάνω στο 0, ενώ παράλληλα παρουσιάζει και rail-to-rail έξοδο για να μπορεί να δώσει οποιαδήποτε τιμή εξόδου ανάμεσα στα 0 και στα 5V [7]. Οι πυκνωτές C1, C2, C3 χρησιμοποιούνται για σταθεροποίηση της τροφοδοσίας στα τρία ολοκληρωμένα κυκλώματα.

3.3.7 Ανάλυση του ψηφιακού μέρους του κυκλώματος μέτρησης έντασης του ρεύματος

Όπως αναφέρθηκε και φάνηκε στην εικόνα (3.16), κάθε στιγμή υπάρχει μόνο ένας ενισχυτής που δίνει έξοδο πάνω από 200mV (τάση αναφοράς). Ο ελεγκτής επιλέγει την μεγαλύτερη τάση, αφαιρεί 200mV από αυτή και στην συνέχεια διαιρεί την τάση με 49,78, που είναι το κέρδος ενίσχυσης. Το πρόσημο της τιμής εξαρτάται από τον ενισχυτή που δίνει τιμή μέτρησης εκείνη την στιγμή (U1 και είσοδος A2 για θετικά, U2 και είσοδος A3 για αρνητικά). Για μείωση του θορύβου που μπορεί να υπάρχει, ο ελεγκτής παίρνει 20 μετρήσεις το δευτερόλεπτο και εμφανίζει τον μέσο όρο τους.

3.4 Κύκλωμα μέτρησης αντίστασης

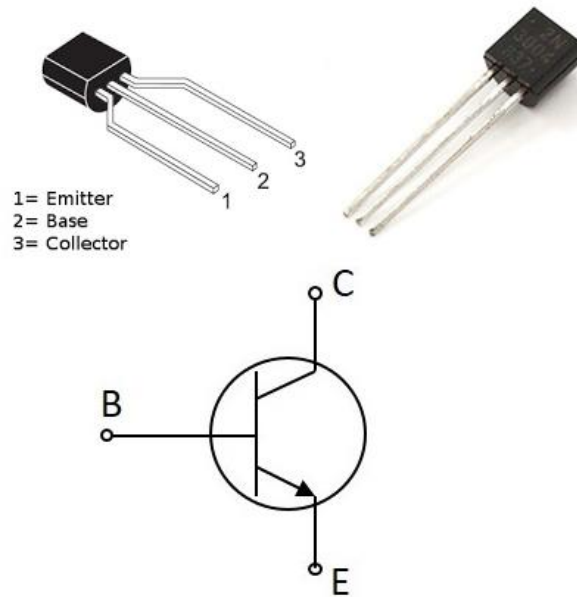
Στην συνέχεια, θα αναλυθεί το κύκλωμα μέτρησης αντίστασης, πρώτα όμως θα πρέπει να εξηγηθούν οι βασικές αρχές και συνδεσμολογίες που χρησιμοποιούνται στο κύκλωμα.



Εικόνα 3.17: Κύκλωμα μέτρησης αντίστασης, όπως απεικονίζεται στο Spice

3.4.1 Τρανζίστορ (Transistor)

Ενώ υπάρχουν διάφορα είδη τρανζίστορ, στο κύκλωμα της εργασίας χρησιμοποιούνται μόνο τρανζίστορ τύπου BJT (Bipolar Junction Transistor) και αυτό θα αναλυθεί. Τα BJT, σε αντίθεση με άλλα είδη τρανζίστορ όπως τα FET, χρησιμοποιούν δύο είδη φορτίων ηλεκτρικού ρεύματος, τα ηλεκτρόνια και τις οπές. Η βασική αρχή λειτουργίας ενός BJT είναι πως ένα ρεύμα μικρής τιμής σε ένα από τα άκρα του, μπορεί να ελέγχει ένα ρεύμα πολύ μεγαλύτερης τιμής σε κάποιο άλλο άκρο του. Η αρχή αυτή, καθιστά το BJT ικανό ενισχυτή αλλά και ικανό διακόπτη. Στην εφαρμογή της εικόνας (3.17), τα τέσσερα τρανζίστορ λειτουργούν ως διακόπτες [1].



Εικόνα 3.18: Σύμβολο και εικόνα ενός BJT [14]

Ένα BJT περιλαμβάνει τον συλλέκτη (collector), την βάση (base) και τον εκπομπό (emitter). Το ρεύμα που συλλέκτη - εκπομπού (CE) ελέγχεται από την τάση και το ρεύμα βάσης – εκπομπού (BE), το οποίο είναι πολύ μικρότερο. Για τα ρεύματα σε ένα BJT ισχύει ότι [5]:

$$I_E = I_C + I_B \quad (3.9)$$

Αλλά επειδή το ρεύμα βάσης είναι σημαντικά μικρότερο, ο τύπος απλοποιείται και γίνεται:

$$I_C = I_E \quad (3.10)$$

Σε ένα τρανζίστορ όπως αυτό της εικόνας (3.18), όταν η επαφή BE πολωθεί ορθά, τότε ξεκινάει να διαρρέει ρεύμα την επαφή CE. Στην περίπτωση αυτή, η διαφορά δυναμικού V_{CE} είναι μικρή (συντά της τάξης λίγων εκατοντάδων mV ή και λιγότερο), και αναλόγως την εφαρμογή, μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

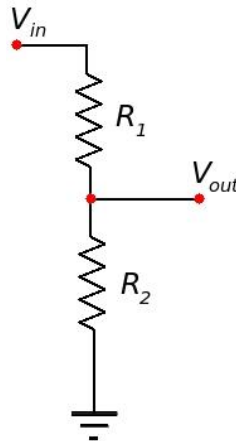
3.4.2 Διαιρέτης τάσης

Ο διαιρέτης τάσης είναι μια πολύ απλή διάταξη που αποτελείται από δύο ή περισσότερες αντιστάσεις συνδεδεμένες σε σειρά. Για έναν απλό διαιρέτη τάσης δύο αντιστάσεων, όπως αυτός της εικόνας (3.19), ισχύει ο τύπος [1]:

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.11)$$

Όπου:

- V_{in} είναι η τάση τροφοδοσίας των δύο αντιστάσεων,
- V_{out} είναι η τάση στο σημείο που συνδέονται οι δύο αντιστάσεις, δηλαδή η τάση της R_2 .



Εικόνα 3.19: Διαιρέτης τάσης με δύο αντιστάσεις [3]

3.4.3 Ανάλυση του αναλογικού μέρους του κυκλώματος μέτρησης αντίστασης

Για την μέτρηση της αντίστασης, δημιουργείται ένα κύκλωμα με δύο αντιστάσεις στην σειρά, δηλαδή ένας απλός διαιρέτης τάσης. Η τάση τροφοδοσίας του κυκλώματος είναι γνωστή (5V του Arduino), η μία από τις δύο αντιστάσεις είναι γνωστές, καθώς είναι μέρος του κυκλώματος μέτρησης, η τάση στο κοινό σημείο των αντιστάσεων είναι γνωστή, εφόσον γίνεται μέτρησή της από τον ελεγκτή, και ο μοναδικός άγνωστος είναι η αντίσταση που μετριέται και είναι διαφορετική κάθε φορά. Το κύκλωμα θα ήταν πολύ απλό αν ο ADC του Arduino ήταν πολλών bit, είχε δηλαδή μεγάλη διακριτική ικανότητα. Όμως, ο ADC είναι 10 bit, και η χρήση μιας μόνο αντίστασης σύγκρισης δεν αρκεί για να μετρηθεί με ακρίβεια όλο το εύρος τιμών από Ω μέχρι $M\Omega$. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα χρειάζεται είτε ένας εξωτερικός ADC πολλών bit, είτε περισσότερες αντιστάσεις σύγκρισης. Για λόγους απλότητας και κόστους, επιλέχθηκε ο δεύτερος τρόπος και αυτός θα εξεταστεί.

Στο κύκλωμα της εικόνας (3.17), οι αντιστάσεις σύγκρισης είναι οι R_{12} , R_{13} , R_{14} , R_{15} , τιμών 200 Ω , 2 k Ω , 20 k Ω , 200 k Ω αντίστοιχα. Τα τρανζίστορ Q2, Q3, Q4, Q5 που ελέγχονται από τις ψηφιακές εξόδους D4, D5, D6, D7 αντίστοιχα, λειτουργούν ως διακόπτες και «ενεργοποιούν» μόνο έναν κλάδο κάθε φορά. Η αντίσταση προς μέτρηση συνδέεται σε σειρά με τους εκπομπούς των τρανζίστορ και ανάλογα με την τιμή της, επιλέγεται αυτόματα το κατάλληλο τρανζίστορ ώστε η μέτρηση τάσης στην αναλογική είσοδο A6 να είναι όσο γίνεται μεγαλύτερης ακρίβειας.

Είναι προφανές πως τα ρεύματα των κλάδων είναι μικρότερα στους δεξιούς κλάδους και μεγαλύτερα στους αριστερούς κλάδους (λόγω των τιμών των R_{12} , R_{13} , R_{14} , R_{15}). Για να ισχύει ο τύπος (3.10) και τα ρεύματα βάσης να είναι αμελητέα, χρησιμοποιούνται μεγαλύτερες τιμές αντιστάσεων βάσης

στους δεξιούς κλάδους. Με μικρότερες αντιστάσεις, τα ρεύματα βάσης θα ήταν συγκρίσιμα με τα ρεύματα συλλέκτη, άρα ο τύπος (3.10) δεν θα ίσχυε και τα αποτελέσματα των μετρήσεων θα είχαν μεγάλες αποκλίσεις.

Τα τέσσερα τρανζίστορ είναι 2N3904. Είναι ένα βασικό BJT τύπου npn που επιλέχθηκε για την απλότητά του και σύμφωνα με προσομοίωση στο Spice, η τιμή V_{CE} είναι περίπου 80 με 100 mV. Οι τιμές τόσο της V_{CE} , όσο και των διακυμάνσεων αυτής, είναι αρκετά μικρές για να μην επηρεάσουν σημαντικά την λήψη μετρήσεων με ακρίβεια.

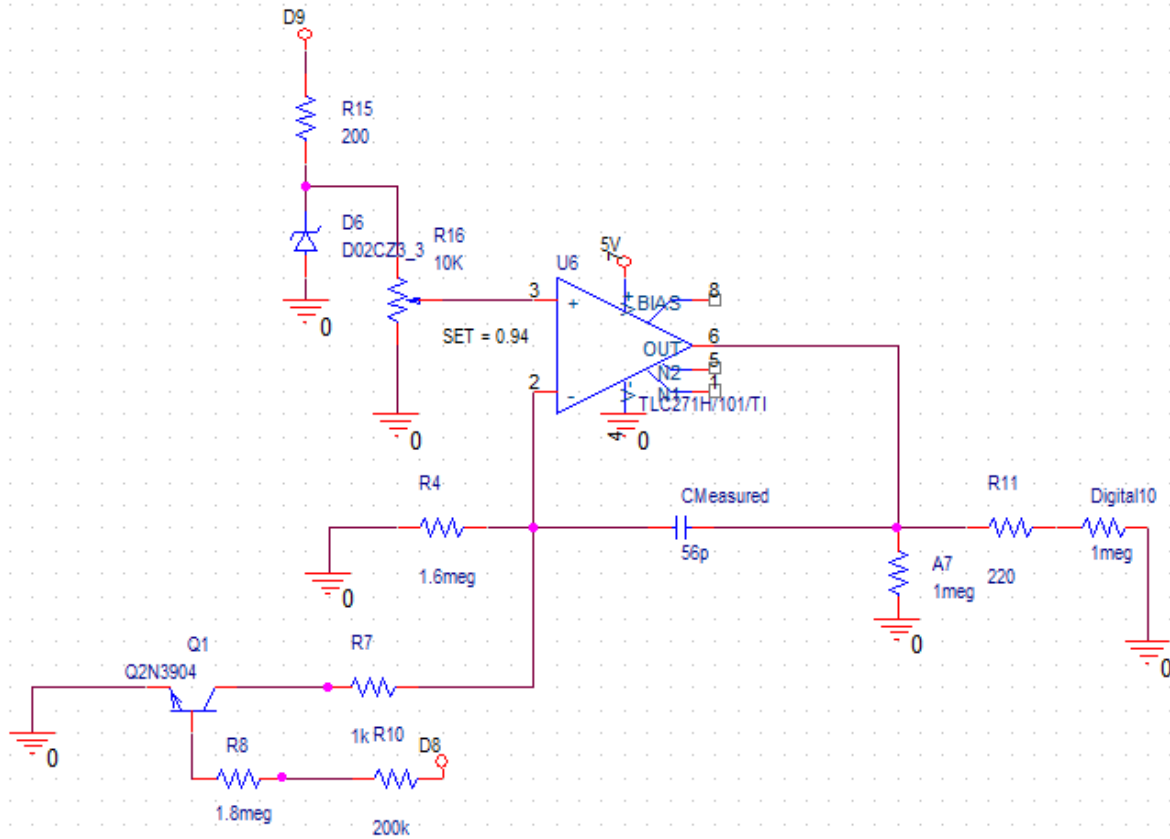
3.4.4 Ανάλυση του ψηφιακού μέρους του κυκλώματος μέτρησης αντίστασης

Αν το κύκλωμα μέτρησης τάσης είχε μία μόνο αντίσταση, για παράδειγμα την R12 τιμής 200 Ω, και έπρεπε αυτή η αντίσταση να συγκριθεί με μια αντίσταση τιμής 100 kΩ και με άλλη μία τιμής 200 kΩ, ο ADC θα δυσκολευόταν να δει διαφορά ανάμεσα στα δυο, καθώς και στις δυο περιπτώσεις, σχεδόν όλη η τάση θα βρισκόταν πάνω στην αντίσταση μέτρησης.

Στην αρχή κάθε κύκλου, ο ελεγκτής ενεργοποιεί το Q2, άρα και τον πρώτο κλάδο του κυκλώματος με την μικρή αντίσταση. Στην συνέχεια γίνεται μέτρηση της τάσης στο σημείο που ο εκπομπός συναντάει το πάνω άκρο της αντίστασης μέτρησης. Αν η τιμή μέτρησης υπερβεί το 80% της συνολικής τάσης (δηλαδή αν η τιμή της αντίστασης μέτρησης είναι περίπου 4 φορές μεγαλύτερη από την τιμή της αντίστασης σύγκρισης), τότε ο ελεγκτής απενεργοποιεί το πρώτο τρανζίστορ και ενεργοποιεί το δεύτερο. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι η αντίσταση μέτρησης να μην είναι πάνω από 4 φορές μεγαλύτερη από την αντίσταση σύγκρισης ώστε να αξιοποιηθεί μεγάλο τμήμα του ADC. Στην περίπτωση που η αντίσταση είναι εξαιρετικά μεγάλη (της τάξης των MΩ), και το τελευταίο τρανζίστορ είναι ενεργοποιημένο, η μέτρηση θα γίνει ακόμα και αν η τιμή της τάσης μέτρησης υπερβεί το 80% της συνολικής. Στην περίπτωση που η τάση μέτρησης ισούται με την συνολική, αυτό αναγνωρίζεται από το όργανο ως ανοιχτό κύκλωμα. Για μείωση του θορύβου που μπορεί να υπάρχει, η τιμή της αντίστασης μετριέται 20 φορές το δευτερόλεπτο και εμφανίζεται ο μέσος όρος αυτών των τιμών.

3.5 Κύκλωμα μέτρησης χωρητικότητας

Στην συνέχεια, θα αναλυθεί το κύκλωμα μέτρησης χωρητικότητας, πρώτα όμως θα πρέπει να εξηγηθούν οι βασικές αρχές και συνδεσμολογίες που χρησιμοποιούνται στο κύκλωμα.



Εικόνα 3.20: Κύκλωμα μέτρησης χωρητικότητας, όπως απεικονίζεται στο Spice

3.5.1 Πηγή ρεύματος

Μία έξυπνη εφαρμογή των τελεστικών ενισχυτών είναι η χρήση τους ως πηγές σταθερού ρεύματος. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην αναστρέφουσα και στην μη αναστρέφουσα είσοδο ενός ενισχυτή είναι πρακτικά μηδενική όταν υπάρχει αρνητική ανάδραση. Χρησιμοποιώντας αυτήν την βασική αρχή, μπορούμε εύκολα να ρυθμίσουμε το ρεύμα ανάδρασης με την χρήση μόνο μίας αντίστασης, αρκεί το ρεύμα να είναι μικρότερο από το μέγιστο που μπορεί να δώσει ο κάθε τελεστικός ενισχυτής. Στην περίπτωση που οι ανάγκες ρεύματος είναι μεγαλύτερες, μπορεί να γίνει ενίσχυση ρεύματος με τρανζίστορ. Στο κύκλωμα της εικόνας (3.20), οι ανάγκες είναι μικρές και έτσι το κύκλωμα είναι πολύ απλό. Όπως φαίνεται, μια σταθερή τάση εφαρμόζεται στην μη αναστρέφουσα είσοδο του ενισχυτή. Ταυτόχρονα, η τάση στην αναστρέφουσα είσοδο γίνεται ίδια λόγω της αρνητικής ανάδρασης (μέσω του πυκνωτή μέτρησης). Το ρεύμα ρυθμίζεται εύκολα μέσω της αντίστασης R4. Σύμφωνα με τον νόμο του Ωμ, για το ρεύμα ανάδρασης ισχύει:

$$I = \frac{V_+}{R_4} = \frac{V_-}{R_4} \quad (3.12)$$

3.5.2 Εκθετική φόρτιση πυκνωτή

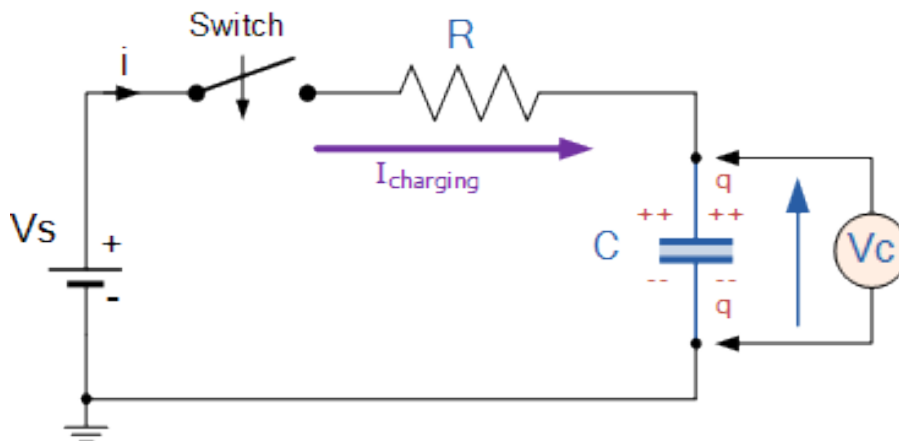
Ένας απλός τρόπος φόρτισης ενός πυκνωτή είναι με την χρήση ενός κυκλώματος φόρτισης RC. Πρόκειται πρακτικά για μια DC πηγή τάσης που τροφοδοτεί μία αντίσταση και έναν πυκνωτή που βρίσκονται σε σειρά. Ένας αφόρτιστος πυκνωτής δεν θα φορτίσει ακαριαία, αλλά θα φορτίσει εκθετικά και ο χρόνος φόρτισης εξαρτάται από μία σταθερά χρόνου T (Time Constant). Για ένα κύκλωμα όπως αυτό της εικόνας (3.21), για την σταθερά χρόνου T ισχύει [8]:

$$T = R \cdot C \quad (3.13)$$

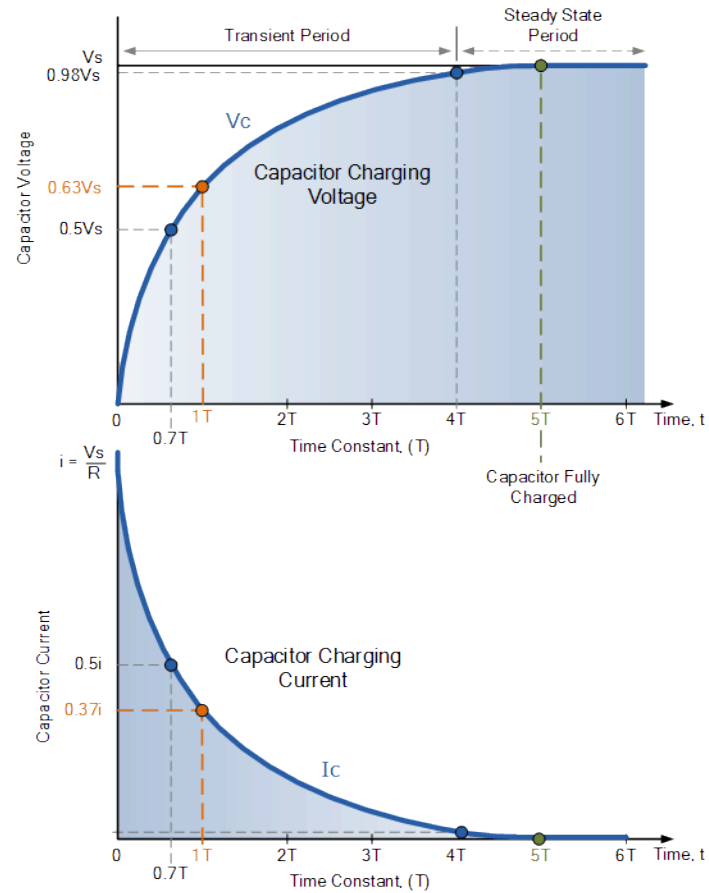
Όπου:

- R είναι η τιμή της αντίστασης μέσω από την οποία φορτίζεται ο πυκνωτής,
- C είναι η τιμή του πυκνωτή που φορτίζεται.

Αποδεικνύεται πως σε χρόνο $T=RC$, η τάση του πυκνωτή ισούται με το 63,2% της μέγιστης, ενώ σε χρόνο $5T=5RC$, η τάση του πυκνωτή ισούται με το 99,3% της μέγιστης, που στις περισσότερες εφαρμογές θεωρείται ικανοποιητικά κοντά στο 100%. Είναι προφανές πως όσο πιο φορτισμένος είναι ένας πυκνωτής, τόσο πιο αργά φορτίζει στην συνέχεια. Δηλαδή το ρεύμα φόρτισης μειώνεται με τον ίδιο ρυθμό που η τάση φόρτισης αυξάνεται, και τελικά μηδενίζεται όταν η τάση φόρτισης φτάσει την μέγιστη τιμή της. Αυτό φαίνεται στα διαγράμματα της εικόνας (3.22).



Εικόνα 3.21: Κύκλωμα φόρτισης RC [15]



Εικόνα 3.22: Διαγράμματα V-t και I-t εκθετικής φόρτισης πυκνωτή σε κύκλωμα RC [15]

3.5.3 Νόμος του Ωμ για πυκνωτές και γραμμική φόρτιση

Σε αντίθεση με τους αντιστάτες, οι πυκνωτές δεν παρουσιάζουν μια σταθερή «αντίσταση». Η μαθηματική σχέση που συνδέει την τάση και το ρεύμα σε έναν πυκνωτή, δηλαδή κατά κάποιο τρόπο ο νόμος του Ωμ για τους πυκνωτές είναι [9]:

$$I = C \frac{dV}{dt} \quad (3.14)$$

Όπου:

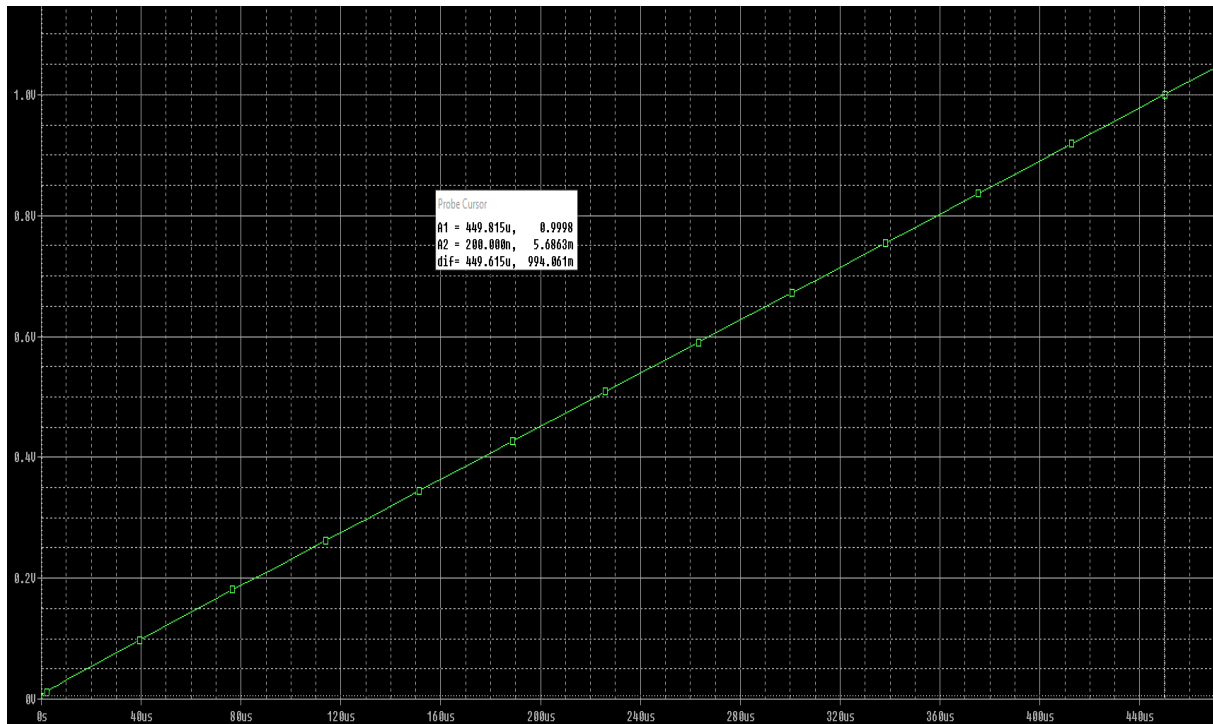
- I είναι η τιμή του ρεύματος που διαρρέει τον πυκνωτή,
- C είναι η τιμή της χωρητικότητας του πυκνωτή,
- $\frac{dV}{dt}$ είναι ο ρυθμός μεταβολής της τάσης του πυκνωτή, δηλαδή το πηλίκο της μεταβολής της τάσης προς την χρονική διάρκεια που διήρκησε αυτή η μεταβολή.

Είναι προφανές πως η τιμή της χωρητικότητας για έναν πυκνωτή είναι σταθερή. Επίσης, αν ο ρυθμός μεταβολής τάσης είναι σταθερός (γραμμική φόρτιση), τότε και το ρεύμα θα έχει μια σταθερή τιμή.

Επομένως, για να υπάρξει γραμμική φόρτιση ενός πυκνωτή, χρειάζεται το ρεύμα φόρτισης να είναι σταθερό και αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση μιας πηγής ρεύματος σαν αυτή που αναλύθηκε στην ενότητα 3.5.1. Όπως φαίνεται στην εικόνα (3.19), για τις ανάγκες της εργασίας επιλέχθηκε ο τρόπος της γραμμικής φόρτισης των πυκνωτών. Αυτό προσφέρει μεγαλύτερο έλεγχο του εύρους των τιμών μέτρησης, ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια.

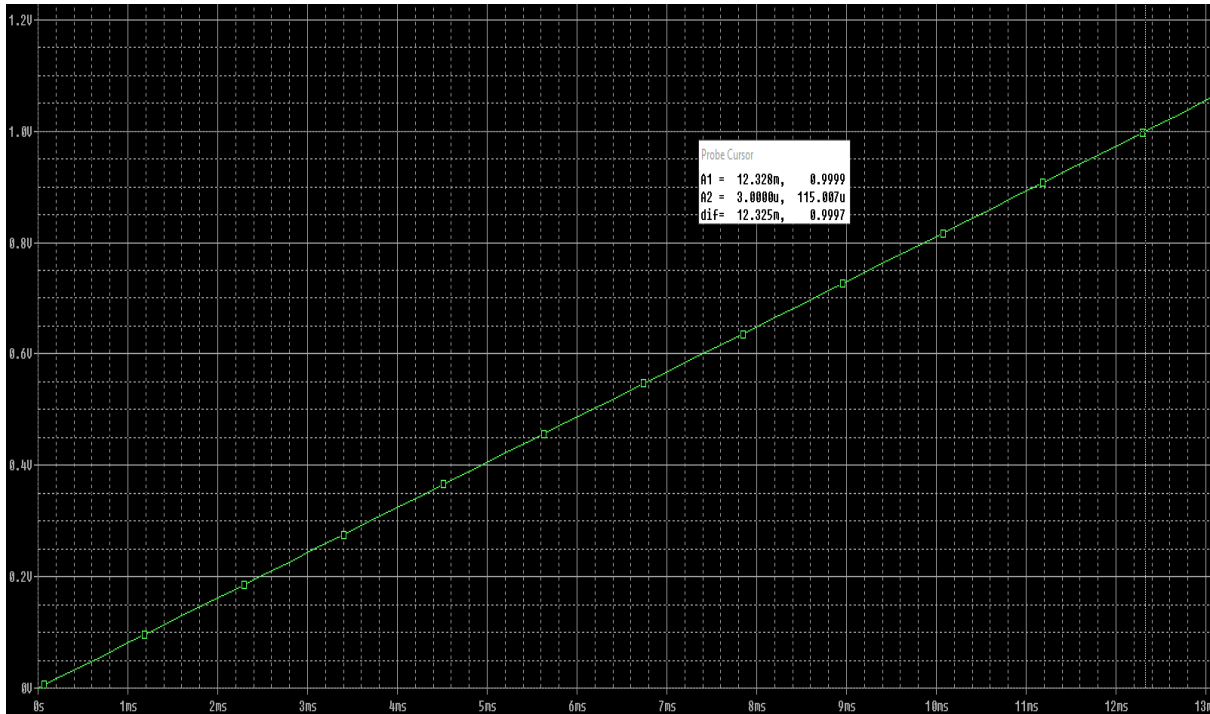
3.5.4 Ανάλυση του αναλογικού μέρους του κυκλώματος μέτρησης χωρητικότητας

Στο κύκλωμα της εικόνας (3.19) χρησιμοποιείται η ίδια τεχνική που χρησιμοποιήθηκε στο κύκλωμα μέτρησης έντασης του ρεύματος για την δημιουργία μιας σταθερής τάσης με την χρήση διόδου zener. Η τιμή της τάσης αυτής είναι **200 mV**, άρα η μη αναστρέφουσα είσοδος του ενισχυτή έχει δυναμικό 200 mV, και μέσω της ανάδρασης που δημιουργεί ο πυκνωτής μέτρησης, το δυναμικό στην αναστρέφουσα είσοδο ισούται και αυτό με 200 mV. Σύμφωνα με τον τύπο (3.12), ισχύει ότι η τιμή του ρεύματος ανάδρασης, άρα και του ρεύματος φόρτισης του πυκνωτή, ισούται με **125 nA**. Σύμφωνα με τον τύπο (3.14), ένας πυκνωτής τιμής **56 pF** θα κάνει **448 μs** για να αυξήσει την τιμή τάσης του κατά **1V** με αυτό το ρεύμα φόρτισης.



Εικόνα 3.23: Φόρτιση πυκνωτή τιμής 56 pF, όπως απεικονίζεται στο Spice

Το τρανζίστορ Q1 χρησιμοποιείται ως διακόπτης και ελέγχεται αυτόματα από την ψηφιακή έξοδο D8. Όταν ένας πυκνωτής είναι μεγάλης τιμής, το ρεύμα που θα χρειαστεί να την φόρτισή του σε χρόνο που δεν θα φανεί μεγάλος στον χρήστη, θα πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερο από 125 nA. Σύμφωνα με προσομοίωση που έγινε στο Spice, η τάση V_{CE} του Q1 κατά την λειτουργία του είναι περίπου **116 mV**. Έχοντας ως δεδομένο πως η τιμή αντίστασης βάσης (R8+R10) είναι αρκετά μεγάλη ώστε το ρεύμα βάσης να είναι αμελητέο και να ισχύει ο τύπος (3.10), καταλήγουμε πως πλέον το ρεύμα ανάδρασης ρυθμίζεται από την R7. Η τάση της R7 ισούται με 84 mV (αφού τα υπόλοιπα 116 από τα συνολικά 200 mV βρίσκονται πάνω στο τρανζίστορ κατά την κατάσταση αγωγής του), και με βάση τον νόμο του Ωμ ισχύει πως η τιμή του νέου ρεύματος φόρτισης είναι **84 μA**. Δηλαδή, το τρανζίστορ όταν άγει, μεγαλώνει το συνολικό ρεύμα ανάδρασης κατά περίπου **672 φορές** (το ρεύμα που συνεχίζει να διαρρέει την R4 πλέον θεωρείται αμελητέο). Σύμφωνα με τον τύπο (3.14), ένας πυκνωτής τιμής **1 μF**, θα κάνει μόλις **12 ms** περίπου για να αυξήσει την τιμή της τάσης του κατά **1V** με αυτό το ρεύμα φόρτισης.



Εικόνα 3.24: Φόρτιση πυκνωτή τιμής 1 μF , όπως απεικονίζεται στο Spice

Με την αύξηση του ρεύματος λόγω της χρήσης του Q1 ως διακόπτη, επιτυγχάνεται η αύξηση του εύρους των τιμών μέτρησης, ενώ παράλληλα ο χρόνος που απαιτείται για την φόρτιση δεν γίνεται αντιληπτός από τον άνθρωπο.

Η δίοδος zener με $V_z=3,3\text{V}$ επιλέχθηκε για τους ίδιους λόγους που επιλέχθηκε στο κύκλωμα μέτρησης ρεύματος. Σταθεροποιείται σε μια σχετικά υψηλή τάση και δεν επηρεάζεται από τον θόρυβο που μπορεί να υπάρχει στην τροφοδοσία. Ο TLC271 επιλέχθηκε για τους ίδιους λόγους, ενώ στην συγκεκριμένη εφαρμογή παίζει ρόλο και το Slew Rate, δηλαδή ο ρυθμός μεταβολής της εξόδου του. Ακόμα και στην χειρότερη περίπτωση, το Slew Rate του ισούται με $0,03 \text{ V}/\mu\text{s}$ [5], το οποίο είναι αρκετό για να καλύψει τις ανάγκες του κυκλώματος. Το BJT 2N3904 επιλέχθηκε για την απλότητά του και πρακτικά εξυπηρετεί τον ίδιο σκοπό με τα τρανζίστορ του κυκλώματος μέτρησης αντίστασης.

3.5.5 Ανάλυση του ψηφιακού μέρους του κυκλώματος μέτρησης χωρητικότητας

Ενώ η φόρτιση του πυκνωτή είναι γραμμική και πλήρως ελεγχόμενη, η εκφόρτίσή του γίνεται εκθετικά μέσω της αντίστασης R11. Κατά την φόρτιση, η D10 που συνδέεται με την R11 σε σειρά, λειτουργεί ως είσοδος, έχει μεγάλη αντίσταση εισόδου και δεν επηρεάζει την φόρτιση. Κατά την εκφόρτιση, η D10 λειτουργεί ως έξοδος με χαμηλό δυναμικό, άρα ο πυκνωτής εκφορτίζει εκθετικά μέσω της R11. Για την ελαχιστοποίηση του χρόνου εκφόρτισης, η περιοχή λειτουργίας που επιλέχθηκε είναι από **2V** έως **3V**. Δηλαδή ο πυκνωτής φορτίζει ως τα 3V και εκφορτίζει ως τα 2V. Αν η περιοχή λειτουργίας ήταν σε χαμηλότερα δυναμικά, για παράδειγμα από 0,5V έως 1,5V, ο χρόνος

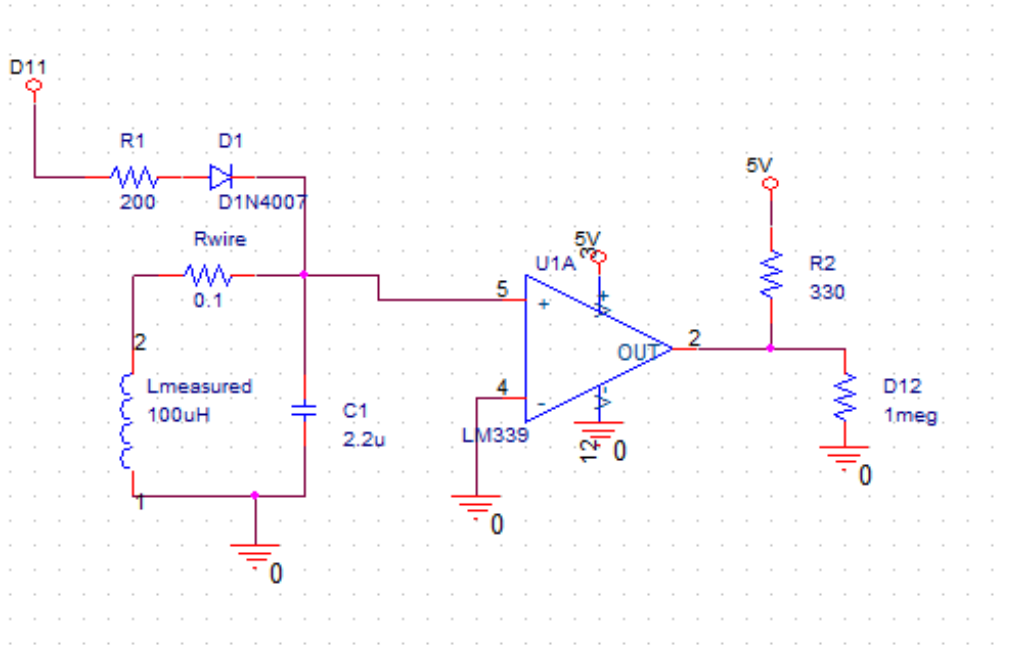
μέτρησης σε πυκνωτές μεγαλύτερους των εκατοντάδων nF θα ήταν πολύ μεγαλύτερος και η μέτρησή τους δεν θα ήταν πρακτική. **Ακόμα και στην περιοχή 2V-3V, για την πιο γρήγορη μέτρηση προτείνεται οι πυκνωτές μεγάλων τιμών να είναι εντελώς αφόρτιστοι.**

Σε κάθε κύκλο, ο ελεγκτής μετράει τον χρόνο φόρτισης του πυκνωτή από τα 2V στα 3V μέσω της αναλογικής εισόδου A7. Αν ο χρόνος υπερβεί μια συγκεκριμένη τιμή, ο ελεγκτής καταλαβαίνει ότι πρόκειται για μεγάλο πυκνωτή και ενεργοποιεί το τρανζίστορ Q1 μέσω της D8. Η μέτρηση ολοκληρώνεται όταν η τάση του πυκνωτή φτάσει στα 3V. Τότε ανάλογα με το ρεύμα φόρτισης και τον χρόνο φόρτισης και σύμφωνα με τον τύπο (3.14), υπολογίζεται η χωρητικότητα του μετρούμενου πυκνωτή. Το κύκλωμα έχει διακριτική ικανότητα **14 pF**, η οποία εξαρτάται από τον μικρότερο δυνατό χρόνο που μπορεί να μετρήσει ο ελεγκτής (στην συγκεκριμένη περίπτωση τυχαίνει να είναι τα 112 μs λόγω των εντολών που μεσολαβούν) και του ρεύματος φόρτισης που είναι τα 125 nA. Επομένως, το κύκλωμα μέτρησης χωρητικότητας ξεκινάει να έχει μια σχετική ακρίβεια μετά τις **μερικές δεκάδες pF**. Δεν υπάρχει θεωρητικό, αλλά μόνο πρακτικό όριο στην μέγιστη τιμή μετρούμενης χωρητικότητας, καθώς εξαρτάται από τον χρόνο που θα περιμένει ο χρήστης του οργάνου για να γίνει η φόρτιση, άρα και η μέτρηση του πυκνωτή.

Μόλις ολοκληρωθεί η μέτρηση, σταματάει η φόρτιση του πυκνωτή μέσω της D9 και ταυτόχρονα ξεκινάει η εκφόρτισή του μέσω της R11, με το δυναμικό της D10 να είναι χαμηλό. Όταν η τάση του πυκνωτή φτάσει τα 2 V, ξεκινάει εκ νέου ο κύκλος μέτρησης.

3.6 Κύκλωμα μέτρησης αυτεπαγωγής

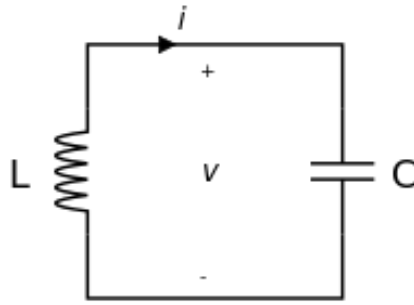
Στην συνέχεια, θα αναλυθεί το κύκλωμα μέτρησης αυτεπαγωγής, πρώτα όμως θα πρέπει να εξηγηθούν οι βασικές αρχές και συνδεσμολογίες που χρησιμοποιούνται στο κύκλωμα.



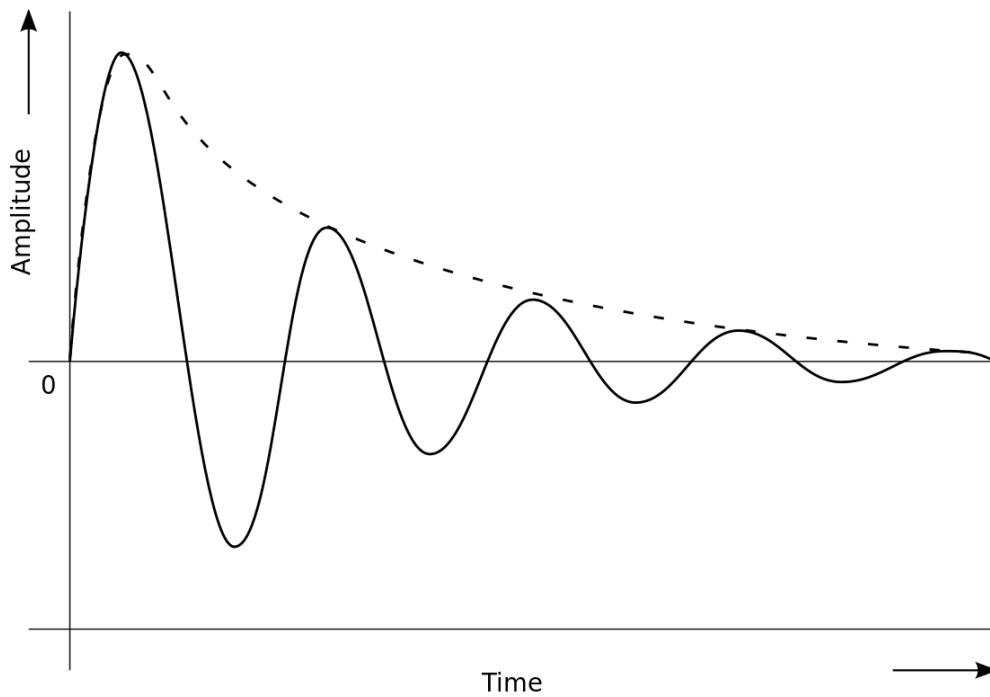
Εικόνα 3.25: Κύκλωμα μέτρησης αυτεπαγωγής, όπως απεικονίζεται στο Spice

3.6.1 Ταλαντώσεις και κυκλώματα LC

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενες ενότητες, οι πυκνωτές και τα πηνία έχουν την ιδιότητα να αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια με την μορφή ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου αντίστοιχα. Χρησιμοποιώντας αυτήν την βασική αρχή, μπορούμε να κατασκευάσουμε ένα πολύ απλό κύκλωμα ταλάντωσης που αποτελείται από ένα πηνίο και έναν πυκνωτή και ονομάζεται κύκλωμα LC (tank circuit). Αν αυτό το κύκλωμα φορτιστεί και στην συνέχεια διακοπεί η τροφοδοσία του, ο πυκνωτής και το πηνίο θα αρχίσουν να ανταλλάσσουν την αποθηκευμένη ενέργεια μεταξύ τους με συγκεκριμένη συχνότητα που εξαρτάται μόνο από τις τιμές χωρητικότητας και αυτεπαγωγής τους. Λόγω της ανταλλαγής της ενέργειας ανάμεσα στα δύο εξαρτήματα, δημιουργείται μια ημιτονική τάση. Ιδανικά, σε ένα κύκλωμα LC σαν αυτό της εικόνας (3.26), η ημιτονική τάση θα κρατούσε για άπειρο χρόνο. Στην πράξη, θα καταναλώνεται συνεχώς ενέργεια πάνω στα ωμικά μέρη του πυκνωτή, του πηνίου, αλλά και στις ωμικές αντιστάσεις των καλωδιώσεων του κυκλώματος, έτσι η τάση που παράγεται θα έχει ένα πλάτος που συνεχώς μειώνεται (η συχνότητα δεν αλλάζει), και θα μοιάζει με αυτή της εικόνας (3.27).



Εικόνα 3.26: Κύκλωμα LC [3]



Εικόνα 3.27: Ημίτονο που παρουσιάζει μείωση του πλάτους με την πάροδο του χρόνου [16]

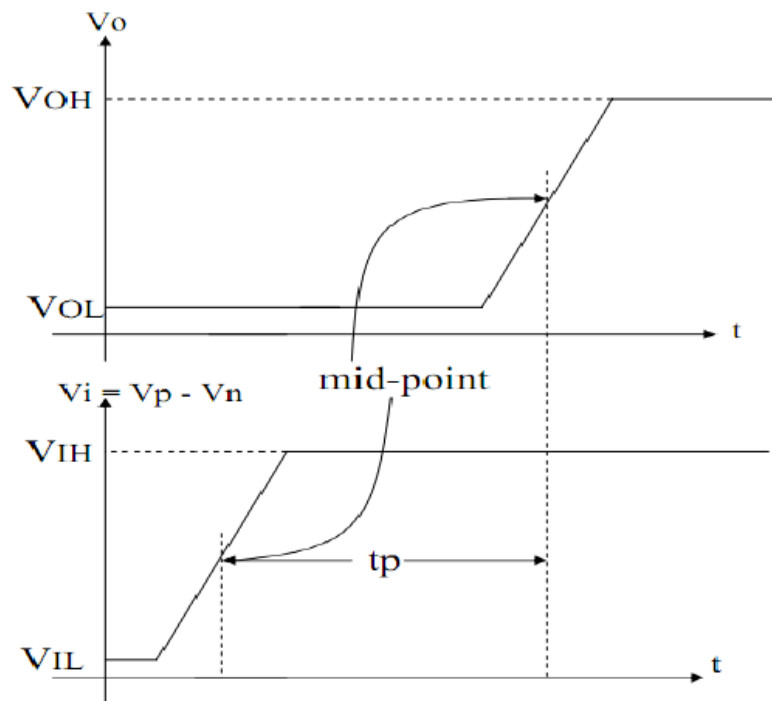
Αποδεικνύεται πως σε ένα κύκλωμα ταλάντωσης LC, που αποτελείται από πυκνωτή χωρητικότητας C και πηνίο αυτεπαγωγής L, η συχνότητα της ταλάντωσης θα είναι [1]:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.15)$$

Όπως φαίνεται στην εικόνα (3.24), το κύκλωμα ταλάντωσης LC αποτελείται από τον πυκνωτή C1 και το μετρούμενο πηνίο L_{measured}. Η αντίσταση R_{wire} αντιπροσωπεύει την ωμικές αντιστάσεις που υπάρχουν στο μη ιδανικό κύκλωμα.

3.6.2 Συγκριτές τάσης

Οι συγκριτές είναι διατάξεις που ελέγχουν αν μια τάση είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από μια άλλη τάση και ανάλογα με αυτό, η τάση εξόδου τους μπορεί να πάρει μια από τις δύο οριακές τιμές οι οποίες ορίζονται από τα όρια της τάσης τροφοδοσίας τους. Σαν συγκριτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμα και τυπικοί τελεστικοί ενισχυτές, οι οποίοι όμως παρουσιάζουν βασικά μειονεκτήματα, όπως ο σχετικά αργός ρυθμός μεταβολής της εξόδου τους (slew rate). Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα που κατασκευάζονται για να λειτουργούν ως συγκριτές, παρουσιάζουν μεγάλους ρυθμούς μεταβολής εξόδου (άρα δεν υπάρχει μεγάλη καθυστέρηση διάδοσης μεταξύ εισόδου και εξόδου), ενώ συχνά η βαθμίδα εξόδου τους είναι τύπου ανοικτού συλλέκτη (open collector) ή ανοικτής εκροής (open drain), που σημαίνει ότι τροφοδοτείται από διαφορετικές τροφοδοσίες και είναι συμβατή με όλες τις οικογένειες ψηφιακών κυκλωμάτων [10].



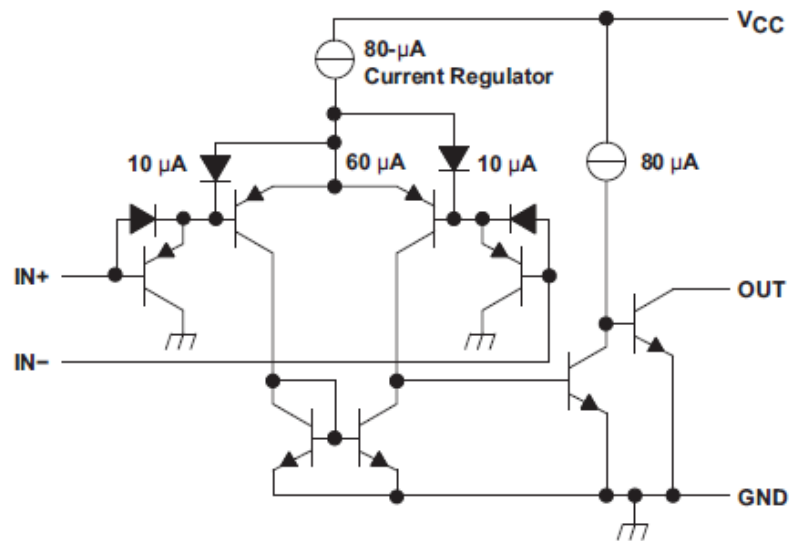
Εικόνα 3.28: Καθυστέρηση διάδοσης (propagation delay) [17]

Ενώ οι συγκριτές τάσης μπορούν να χρησιμεύσουν σε πολλές εφαρμογές, στο κύκλωμα της εικόνας (3.25) ο συγκριτής λειτουργεί ως ανιχνευτής μηδενός. Ουσιαστικά, ένας ανιχνευτής μηδενός, αλλάζει κατάσταση εξόδου όταν η είσοδος αλλάζει πρόσημο. Με την χρήση ανιχνευτή μηδενός, ένα αναλογικό σήμα όπως το ημίτονο που παράγεται από το κύκλωμα LC μπορεί να μετατραπεί σε ψηφιακό. Έτσι, όχι μόνο αυξάνεται το εύρος των συχνοτήτων που μπορεί να μετρήσει ο ADC του arduino, αλλά ταυτόχρονα αποδεσμεύεται μια αναλογική είσοδος (των οποίων το πλήθος είναι μικρό) και δεσμεύεται μια ψηφιακή είσοδος (των οποίων το πλήθος είναι πολύ μεγαλύτερο).

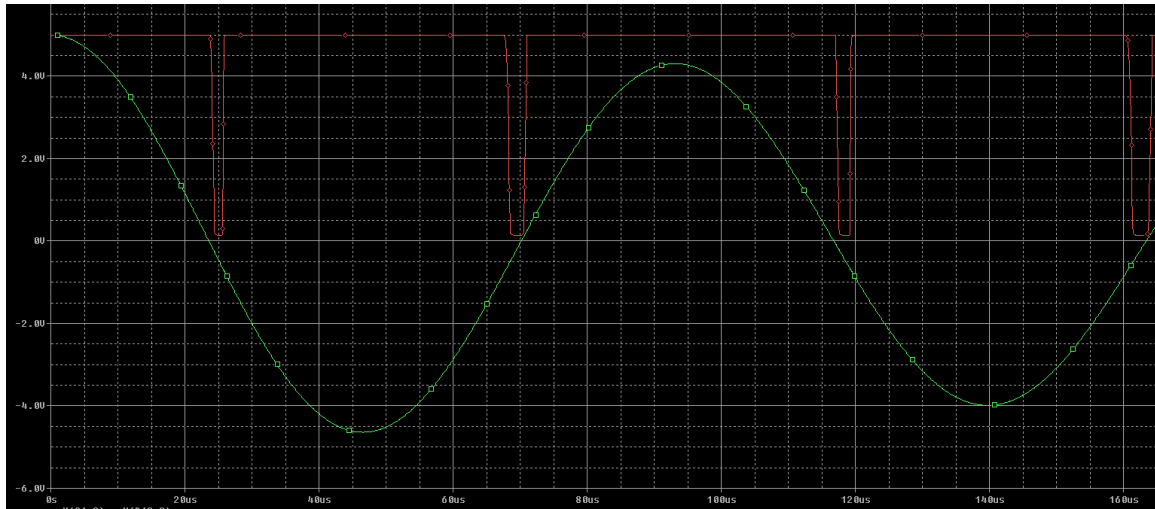
3.6.3 Ανάλυση του αναλογικού μέρους του κυκλώματος μέτρησης αυτεπαγωγής

Όπως φαίνεται στην εικόνα (3.25), το κύκλωμα μέτρησης αποτελείται από ένα κύκλωμα ταλάντωσης LC, γνωστού πυκνωτή και άγνωστου (μετρούμενου) πηνίου, ενώ η έξοδος αυτού γίνεται είσοδος του ανιχνευτή μηδενός που είναι ο U1A. Ο U1A με την σειρά του, παράγει ένα ψηφιακό σήμα στην έξοδό του, του οποίου η συχνότητα ισούται με την συχνότητα του ημιτόνου που υπάρχει στην είσοδό του, και αυτό το σήμα μετριέται στην ψηφιακή είσοδο D12. Το κύκλωμα ταλάντωσης αρχικά φορτίζεται από την ψηφιακή έξοδο D11, η διάοδος D1 επιτρέπει την φόρτιση αλλά αποτρέπει την εκφόρτιση του κυκλώματος (αφού το δυναμικό της D11 γίνει χαμηλό). Ο ρόλος της R1 είναι να περιορίσει το αρχικό ρεύμα, του οποίου η τιμή θα τείνει προς το άπειρο όταν ο πυκνωτής είναι αφόρτιστος (άρα θα παρουσιάζει πολύ χαμηλή αντίσταση). Ο U1A μετατρέπει το ημίτονο σε ψηφιακό σήμα ίδιας συχνότητας. Σύμφωνα με το datasheet του [5] και όπως φαίνεται στην εικόνα (3.28), η βαθμίδα εξόδου του LM339 είναι ανοικτού συλλέκτη. Η R2 χρησιμοποιείται ως pull-up αντίσταση, για να φέρει το δυναμικό εξόδου του U1A στα 5V όταν το τρανζίστορ εξόδου του βρίσκεται σε κατάσταση off. Χωρίς την χρήση pull up αντίστασης, η έξοδος θα ήταν floating.

8.2 Functional Block Diagram



Εικόνα 3.29: Διάγραμμα του LM339 [18]



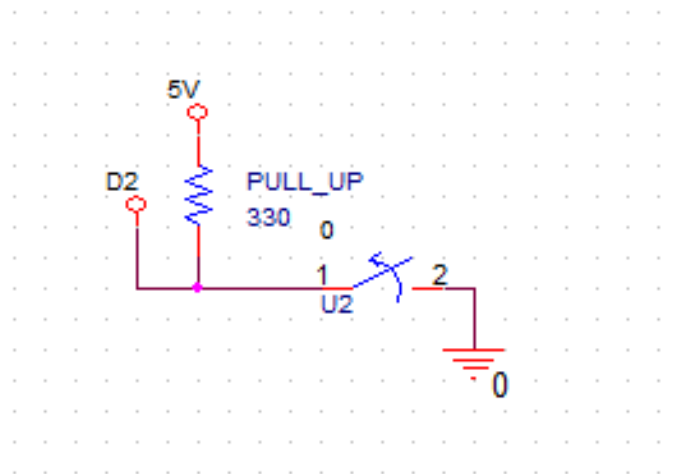
Εικόνα 3.30: Έξοδος και είσοδος U1A, όπως απεικονίζεται στο Spice

3.6.4 Ανάλυση του ψηφιακού μέρους του κυκλώματος μέτρησης αυτεπαγωγής

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η D11 χρησιμοποιείται για να φορτίσει το κύκλωμα ταλάντωσης, ενώ στην συνέχεια το δυναμικό της γίνεται χαμηλό για να αρχίσει η ταλάντωση. Η D12 διαβάσει το ψηφιακό σήμα χρησιμοποιώντας την εντολή `pulseIn()` του `arduino`. Η εντολή αυτή δεν μπορεί να διαβάσει παλμούς διάρκειας μικρότερης από 10μs [11]. Σύμφωνα με τον τύπο (3.15), καταλήγουμε στο ότι ένα πηνίο τιμής περίπου 4,6 μH σε συνδυασμό με τον πυκνωτή του κυκλώματος θα έδινε παλμό (ημιπερίοδο) διάρκειας 10μs. Για να μην προκληθούν σφάλματα λόγω της διακριτικής ικανότητας του `arduino`, προτείνεται η τιμή των πηνίων μέτρησης να είναι πάνω από περίπου **50 μH**. Μεγαλύτερα πηνία θα προκαλέσουν ταλαντώσεις με μικρότερες συχνότητες, άρα μεγαλύτερες περιόδους, επομένως η μέτρηση από τον ελεγκτή θα γίνεται πιο εύκολα. Για παράδειγμα, ένα πηνίο τιμής 100 mH θα προκαλέσει ταλάντωση με περίοδο περίπου 3ms και ψηφιακό παλμό (δηλαδή ημιπερίοδο) διάρκειας 1,5ms. Το ανώτατο όριο στην μέτρηση πηνίων εξαρτάται από το πόσο γρήγορα θα αποσβέσει η ταλάντωση λόγω των ενεργειακών απωλειών.

3.7 Κύκλωμα αλλαγής λειτουργίας

Για να επιλεγθεί το μέγεθος μέτρησης του οργάνου μέτρησης, χρησιμοποιείται ένα πολύ απλό κύκλωμα. Ένα κανονικά ανοικτό κουμπί (normally open push button), συνδέει την ψηφιακή είσοδο D2 με την γείωση. Η D2 είναι προγραμματισμένη να χρησιμοποιεί μια εσωτερική pull-up αντίσταση για να κρατάει το δυναμικό της ψηλά. Όταν ο χρήστης πατήσει το κουμπί, η D2 συνδέεται με την γείωση και το δυναμικό της πηγαίνει στα χαμηλά. Την στιγμή αυτή, δηλαδή όταν το δυναμικό της D2 αλλάξει κατάσταση από υψηλό σε χαμηλό, ενεργοποιούνται οι εξωτερικές διακοπές (external interrupt) και η τιμή μιας μεταβλητής-μετρητή αυξάνεται κατά ένα. Για την αποφυγή πολλών ενεργοποιήσεων των διακοπών, λόγω των αναπηδήσεων του κουμπιού, χρησιμοποιείται η εντολή καθυστέρησης. Στην αρχή κάθε επανάληψης του προγράμματος, ελέγχεται η τιμή του μετρητή και με βάση αυτή, εκτελείται η αντίστοιχη λειτουργία (V,I,R,C,L).



Εικόνα 3.31: Κύκλωμα ενεργοποίησης διακοπών, όπως απεικονίζεται στο Spice

Κεφάλαιο 4ο: Μετρήσεις και σύγκριση αποτελεσμάτων με όργανα του εμπορίου

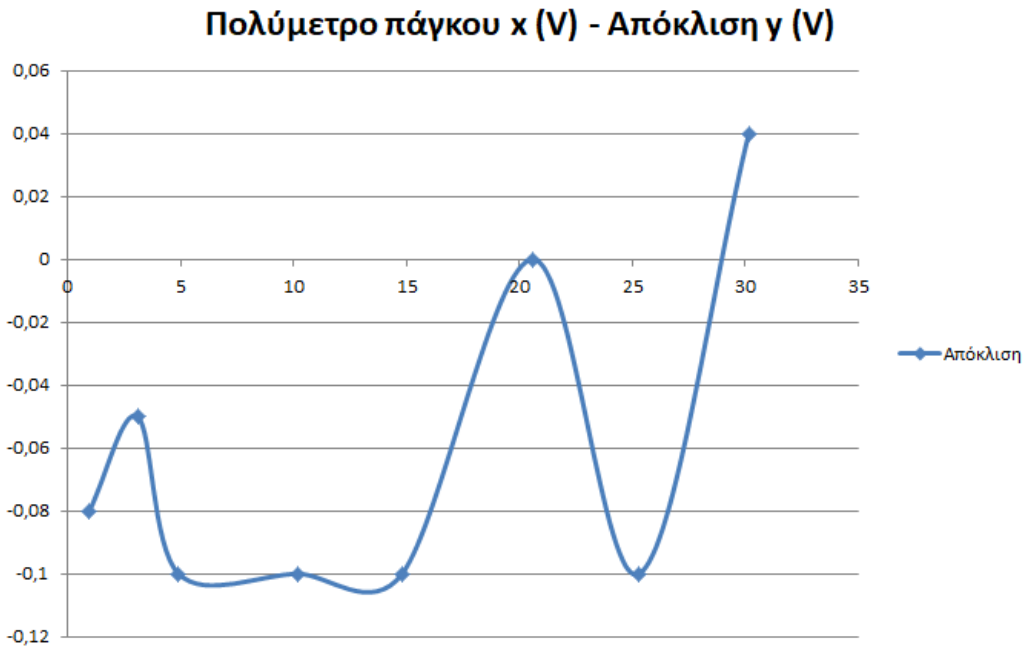
Όπως είναι προφανές, το όργανο μέτρησης της εργασίας, όπως και κάθε άλλο όργανο μέτρησης, δεν έχει τέλεια ακρίβεια και οι τιμές μέτρησής του παρουσιάζουν αποκλίσεις από τις πραγματικές. Για την καλύτερη κατανόηση της ακρίβειας του οργάνου, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων του με μετρήσεις που έγιναν από όργανα του εμπορίου, μεγαλύτερης ακρίβειας. Στην συνέχεια, για να βελτιωθεί η ακρίβεια του οργάνου, έγινε βαθμονόμηση στον κώδικα. Παρακάτω απεικονίζονται τα διαγράμματα μέτρησης για κάθε ένα από τα πέντε κυκλώματα μέτρησης του οργάνου.

4.1 Μέτρηση τάσης

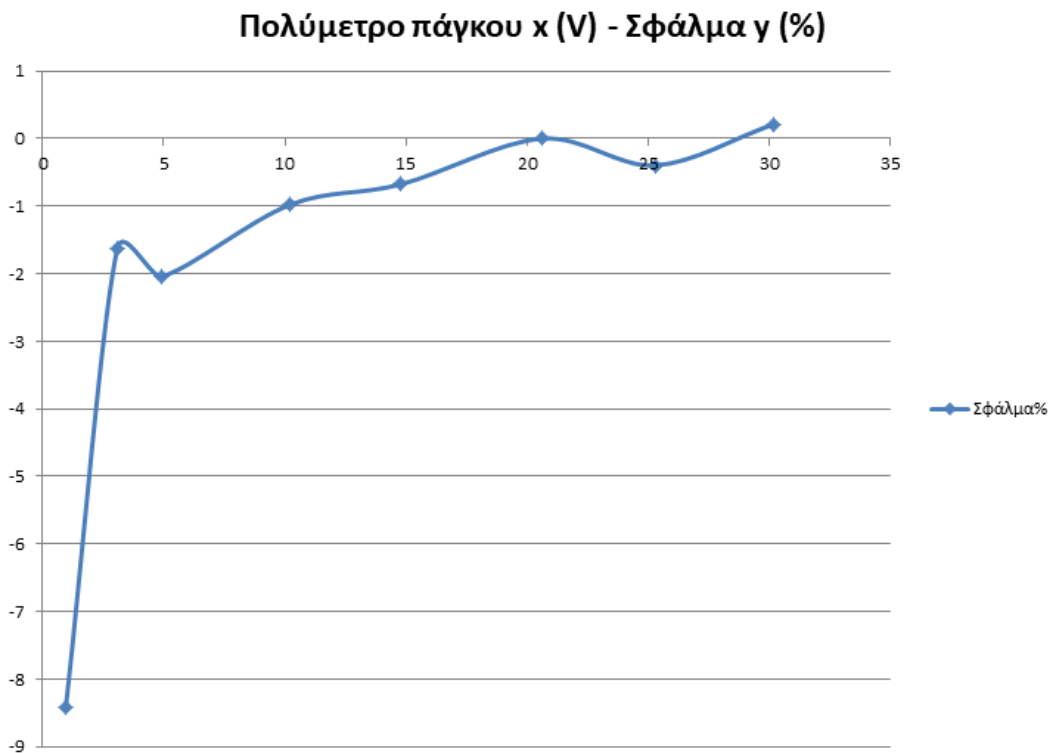
Στο κύκλωμα μέτρησης τάσης της εργασίας, οι μετρήσεις θετικών και αρνητικών δυναμικών γίνονται από διαφορετικά εξαρτήματα και μέρη του κυκλώματος. Για αυτόν τον λόγο, είναι απαραίτητη η σύγκριση τόσο θετικών όσο και αρνητικών τιμών τάσης.



Εικόνα 4.1: Σύγκριση τιμών τάσης (1...30V)

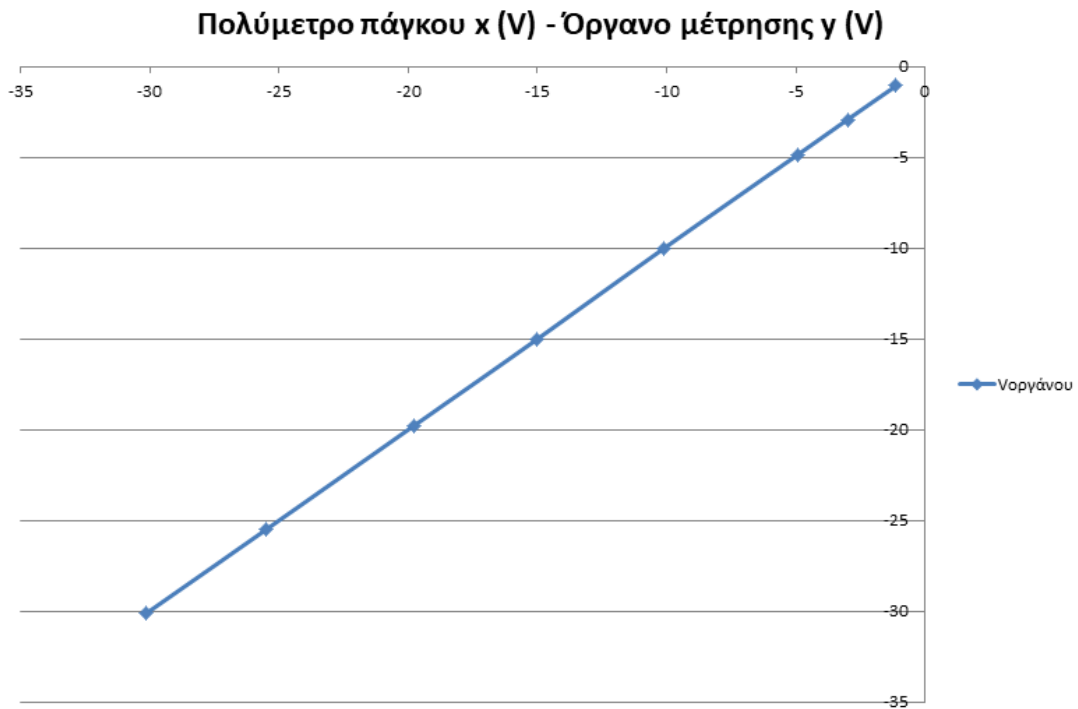


Εικόνα 4.2: Απόκλιση τιμών οργάνου μέτρησης σε σχέση με αυτές του πολυμέτρου πάγκου (1...30V)

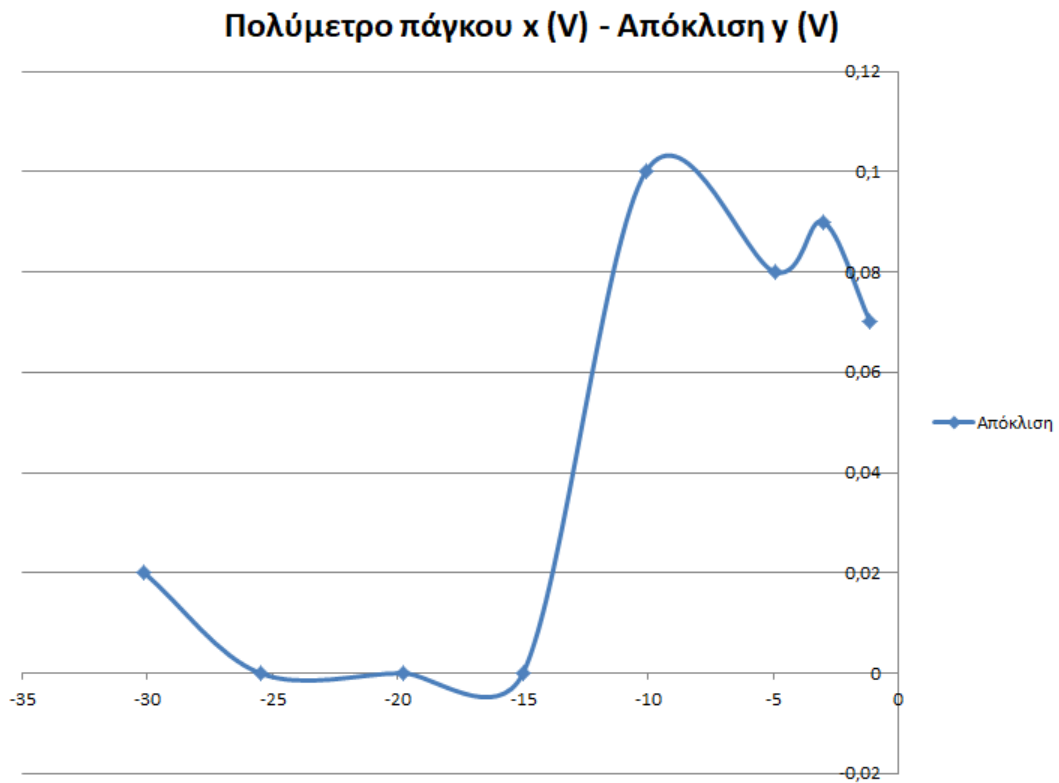


Εικόνα 4.3: Ποσοστό σφάλματος σε σχέση με το πολύμετρο πάγκου (1...30V)

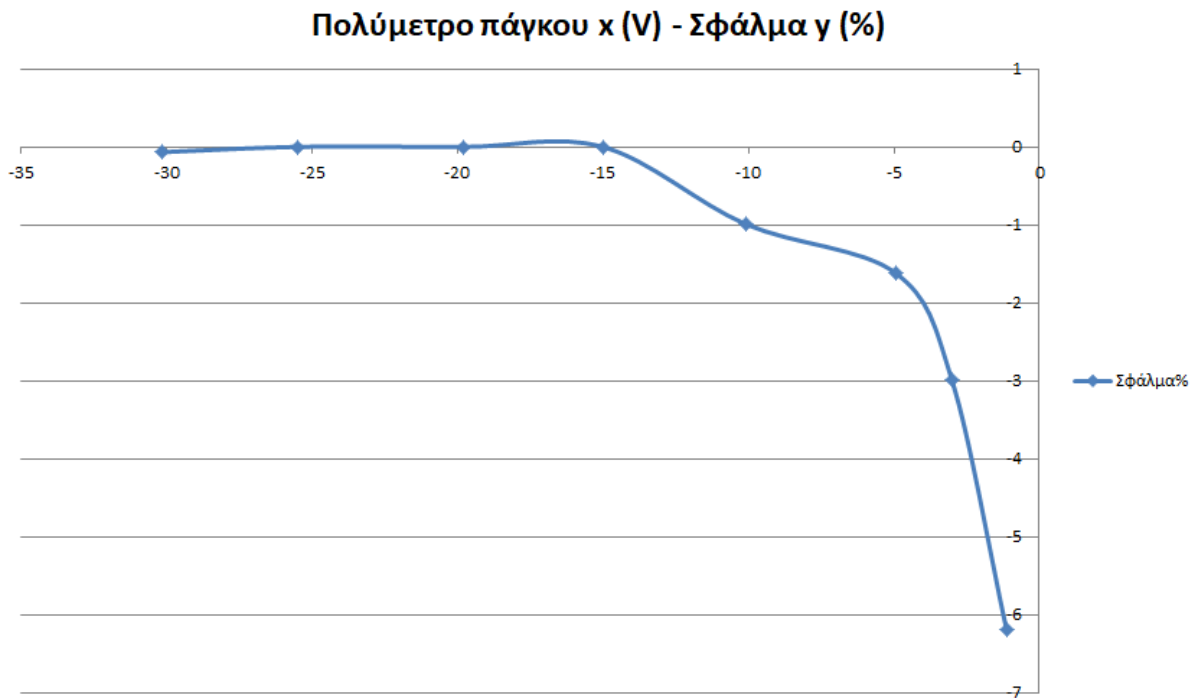
Προκύπτει πως η εξίσωση που επιβεβαιώνει προσεγγιστικά την εικόνα (4.1) είναι $y=1,0027x-0,0981$. Θα γίνει μείωση του σφάλματος των θετικών τιμών τάσης με την βοήθεια του λογισμικού του arduino και με βάση αυτήν την εξίσωση.



Εικόνα 4.4: Σύγκριση τιμών τάσης (-1...-30V)



Εικόνα 4.5: Απόκλιση τιμών οργάνου μέτρησης σε σχέση με αυτές του πολυμέτρου πάγκου (-1...-30V)



Εικόνα 4.6: Ποσοστό σφάλματος σε σχέση με το πολύμετρο πάγκου (-1...-30V)

Προκύπτει πως η εξίσωση που επιβεβαιώνει προσεγγιστικά την εικόνα (4.4) είναι $y=1,0032x+0,0886$. Θα γίνει μείωση του σφάλματος των αρνητικών τιμών τάσης με την βοήθεια του λογισμικού του arduino και με βάση αυτήν την εξίσωση.

4.2 Μέτρηση έντασης ρεύματος

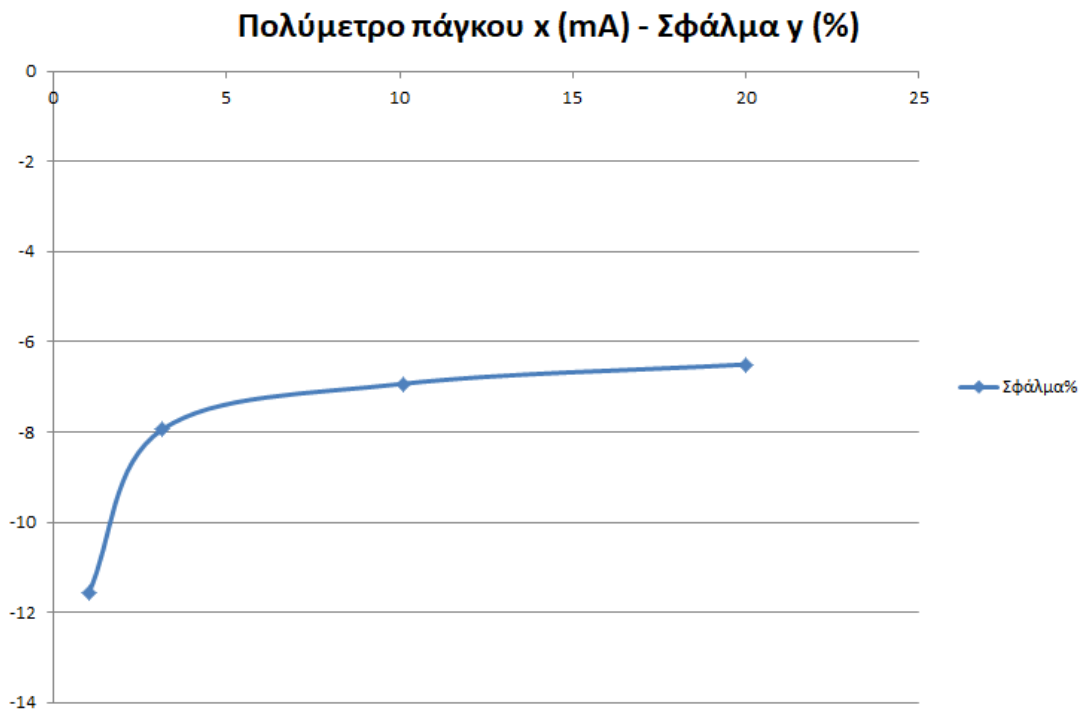
Στο κύκλωμα μέτρησης έντασης ρεύματος της εργασίας, οι μετρήσεις θετικών και αρνητικών ρευμάτων γίνονται από διαφορετικά εξαρτήματα και μέρη του κυκλώματος. Για αυτόν τον λόγο, είναι απαραίτητη η σύγκριση τόσο θετικών όσο και αρνητικών τιμών ρεύματος.



Εικόνα 4.7: Σύγκριση τιμών έντασης (1...20mA)



Εικόνα 4.8: Απόκλιση τιμών οργάνου μέτρησης σε σχέση με αυτές του πολυμέτρου πάγκου (1...20mA)

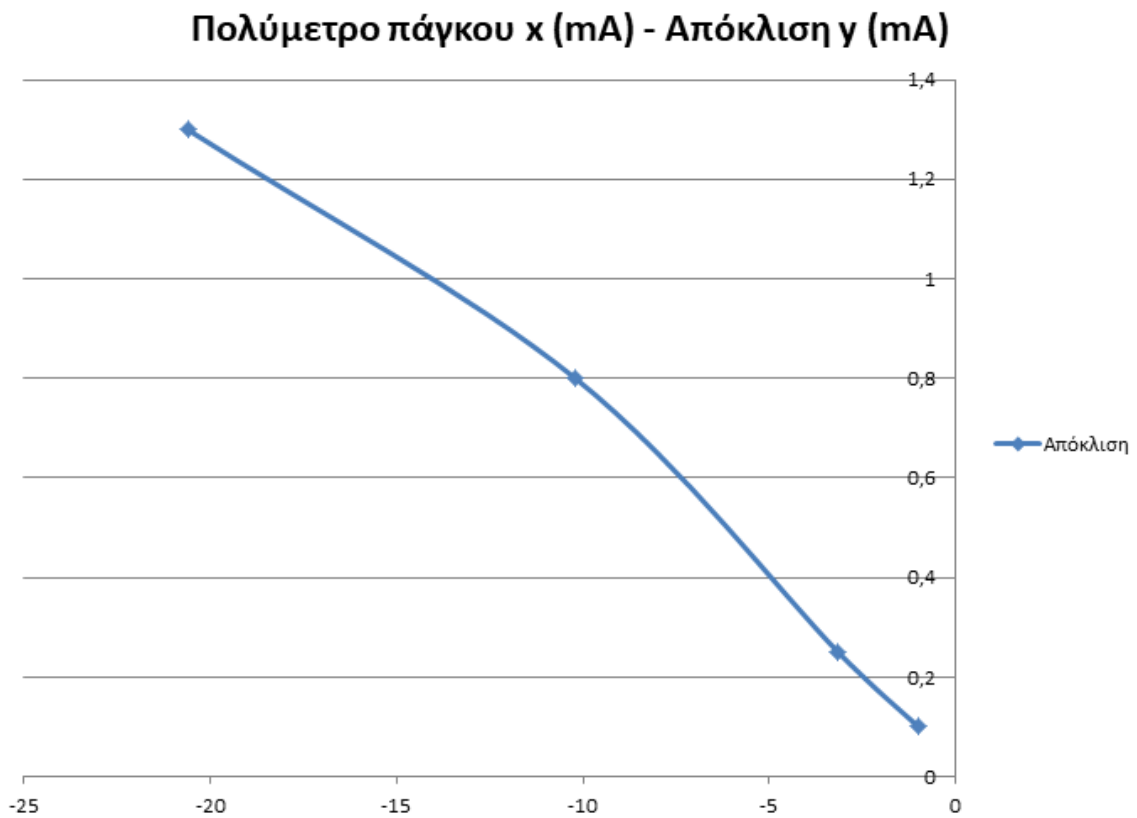


Εικόνα 4.9: Ποσοστό σφάλματος σε σχέση με το πολύμετρο πάγκου (1...20mA)

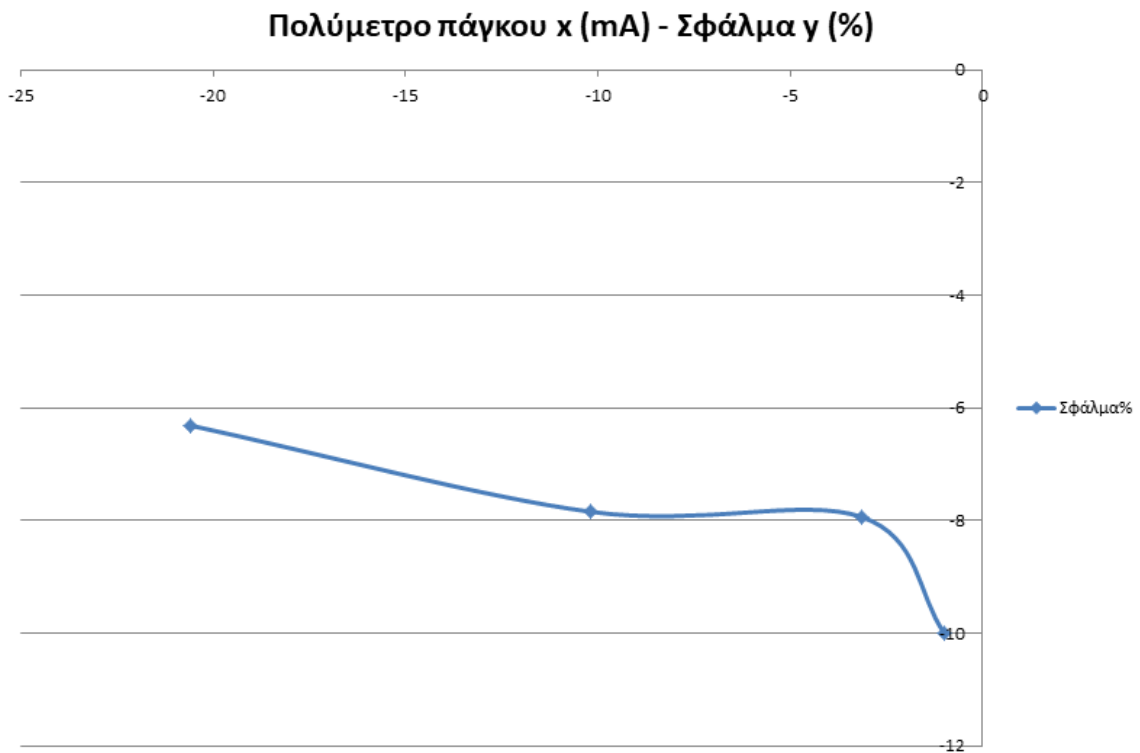
Προκύπτει πως η εξίσωση που επιβεβαιώνει προσεγγιστικά την εικόνα (4.7) είναι $y=0,9373x-0,0533$. Θα γίνει μείωση του σφάλματος των θετικών τιμών ρεύματος με την βοήθεια του λογισμικού του arduino και με βάση αυτήν την εξίσωση.



Εικόνα 4.10: Σύγκριση τιμών έντασης (-1...-20mA)



Εικόνα 4.11: Απόκλιση τιμών οργάνου μέτρησης σε σχέση με αυτές του πολυμέτρου πάγκου (-1...-20mA)

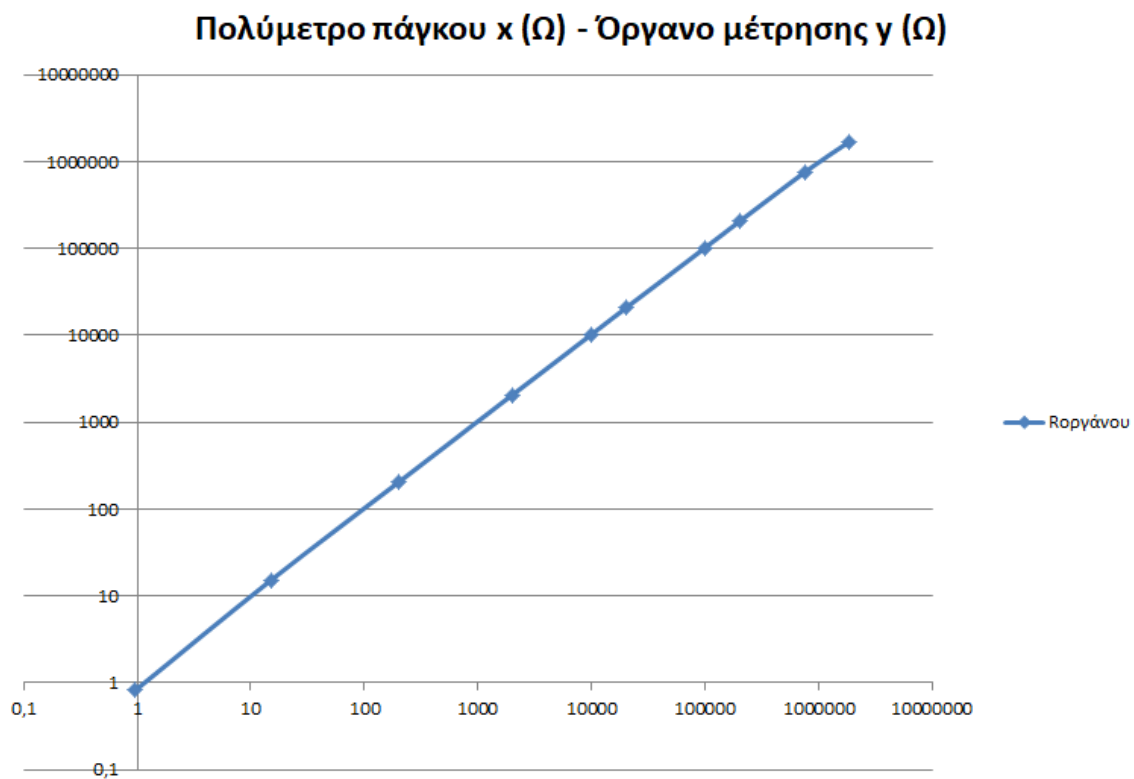


Εικόνα 4.12: Ποσοστό σφάλματος σε σχέση με το πολύμετρο πάγκου (-1...-20mA)

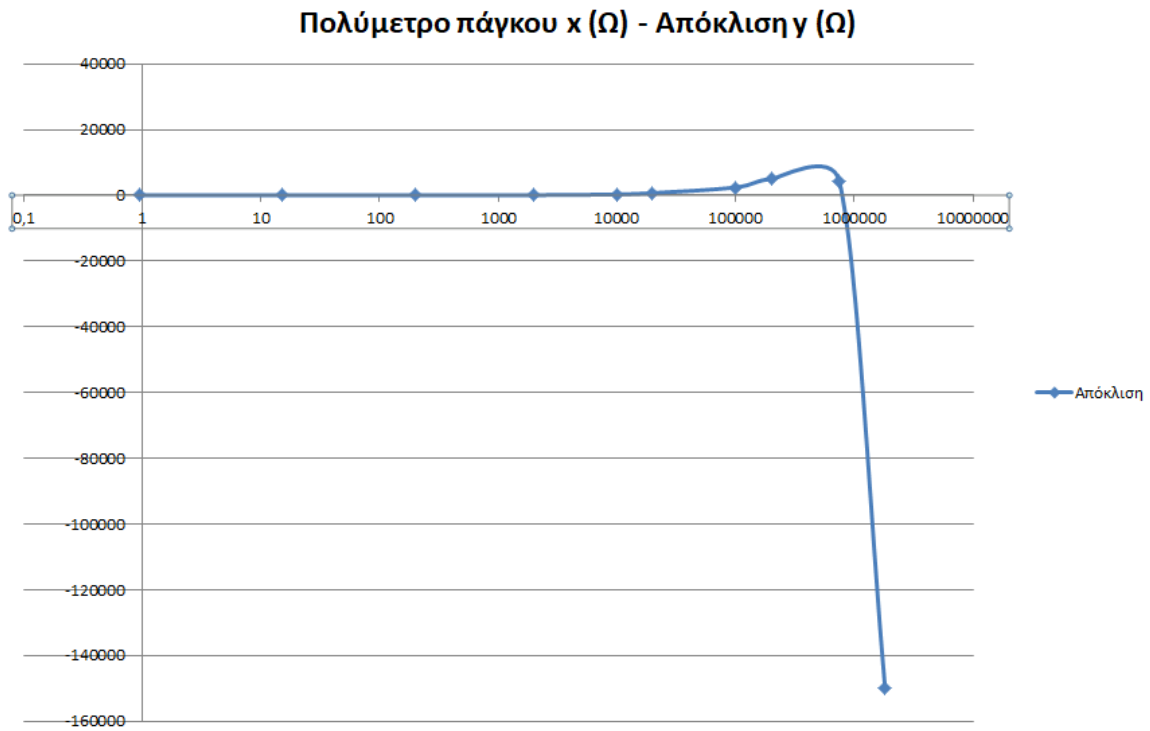
Προκύπτει πως η εξίσωση που επιβεβαιώνει προσεγγιστικά την εικόνα (4.10) είναι $y=0,9384x+0,0739$. Θα γίνει μείωση του σφάλματος των αρνητικών τιμών ρεύματος με την βοήθεια του λογισμικού του arduino και με βάση αυτήν την εξίσωση.

4.3 Μέτρηση αντίστασης

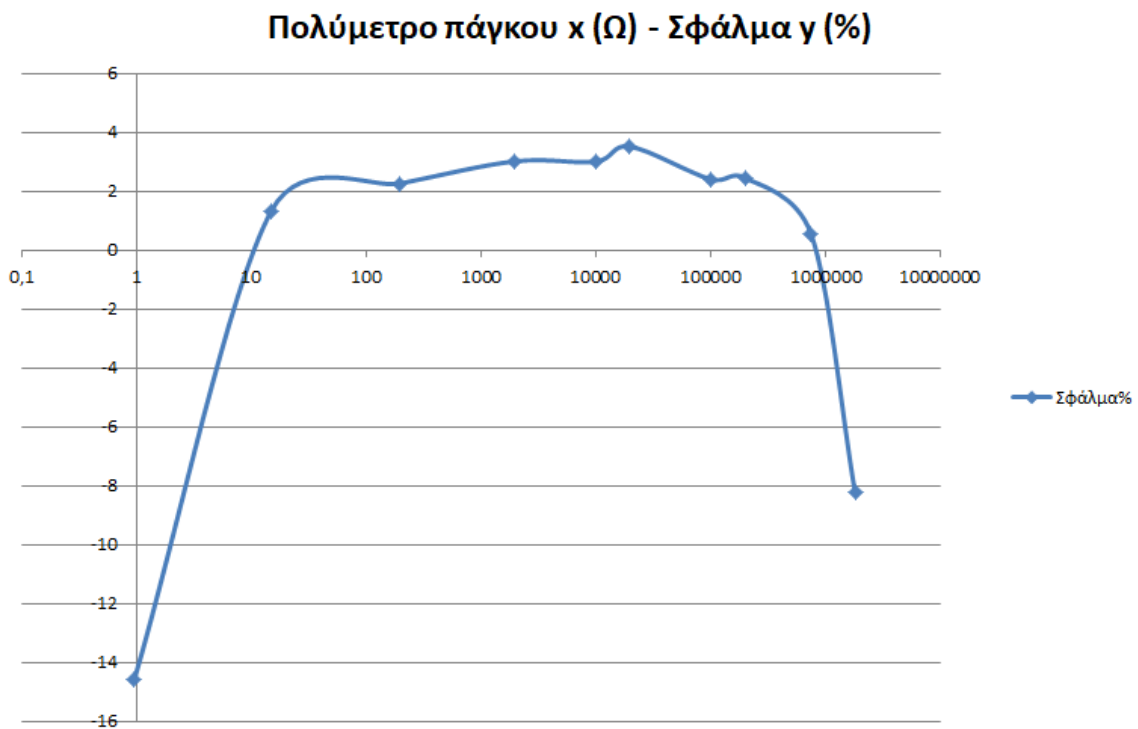
Αν και το κύκλωμα μέτρησης αντίστασης περιλαμβάνει τέσσερις κλίμακες για να καλύψει ένα μεγάλο εύρος τιμών, ο τρόπος λειτουργίας τους είναι παρόμοιος και το ποσοστό σφάλματος, όπως θα φανεί παρακάτω, μένει σχεδόν σταθερό ανεξάρτητα από την κλίμακα. Για αυτόν τον λόγο, θα γίνει εξέταση των μετρήσεων στο ενιαίο κύκλωμα και όχι ξεχωριστά σε κάθε κλίμακα.



Εικόνα 4.13: Σύγκριση τιμών αντίστασης (1Ω...1,8ΜΩ)



Εικόνα 4.14: Απόκλιση τιμών οργάνου μέτρησης σε σχέση με αυτές του πολυμέτρου πάγκου ($1\Omega \dots 1,8M\Omega$)



Εικόνα 4.15: Ποσοστό σφάλματος σε σχέση με το πολύμετρο πάγκου ($1\Omega \dots 1,8M\Omega$)

Στην περίπτωση της αντίστασης των $1,8 \text{ M}\Omega$, η μέτρηση έχει αρκετά μεγάλη απόκλιση επειδή η προσαρμογή δεν είναι ιδανική. Η μεγάλη αντίσταση μέτρησης παραλληλίζεται με την μεγάλη (και πλέον συγκρίσιμη) αντίσταση εισόδου του ADC. Για καλύτερα αποτελέσματα σε μεγάλες τιμές αντιστάσεων, θα έπρεπε να χρησιμοποιηθεί ένας τελεστικός ενισχυτής σε λειτουργία ακόλουθου τάσης, ώστε να επιτευχθεί η ιδανική προσαρμογή ανάμεσα στις δύο βαθμίδες. Το μεγάλο ποσοστό σφάλματος στην τιμή 1Ω οφείλεται σε δύο παράγοντες:

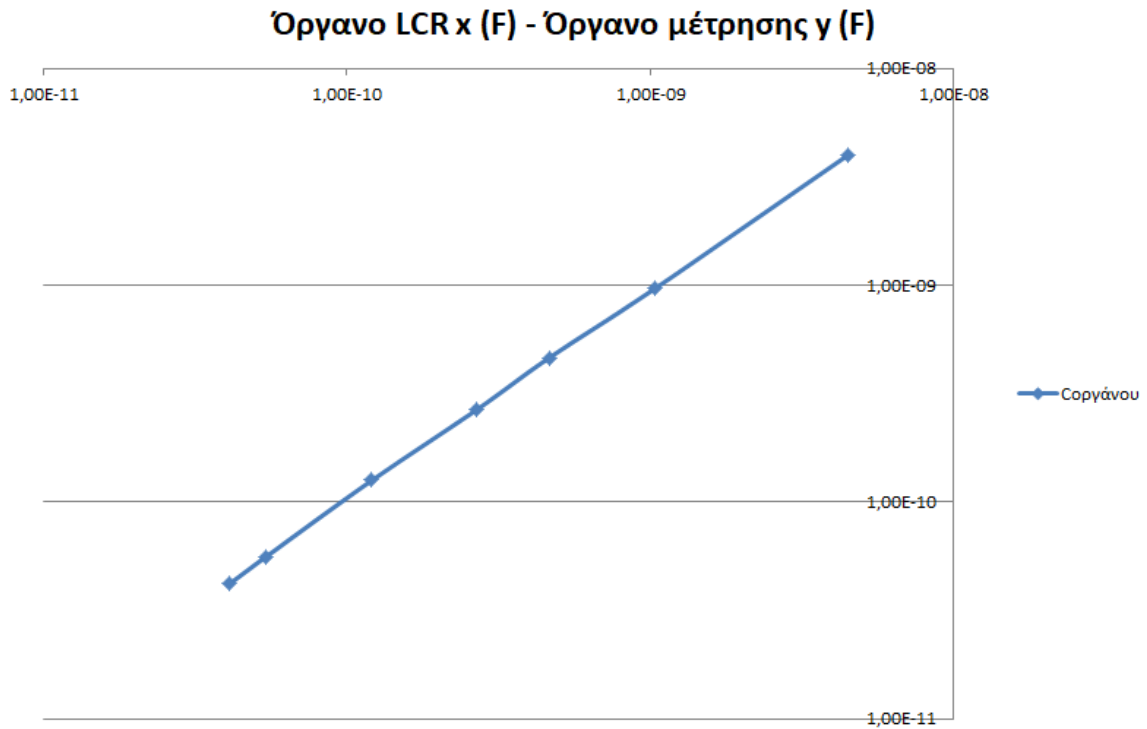
- ADC χαμηλής διακριτικής ικανότητας,
- μη ύπαρξη μικρής αντίστασης σύγκρισης.

Αν υπήρχε είτε καλύτερος ADC, είτε μια επιπλέον κλίμακα μέτρησης για μικρές αντιστάσεις, το ποσοστό σφάλματος στην τιμή 1Ω θα ήταν πολύ μικρότερο.

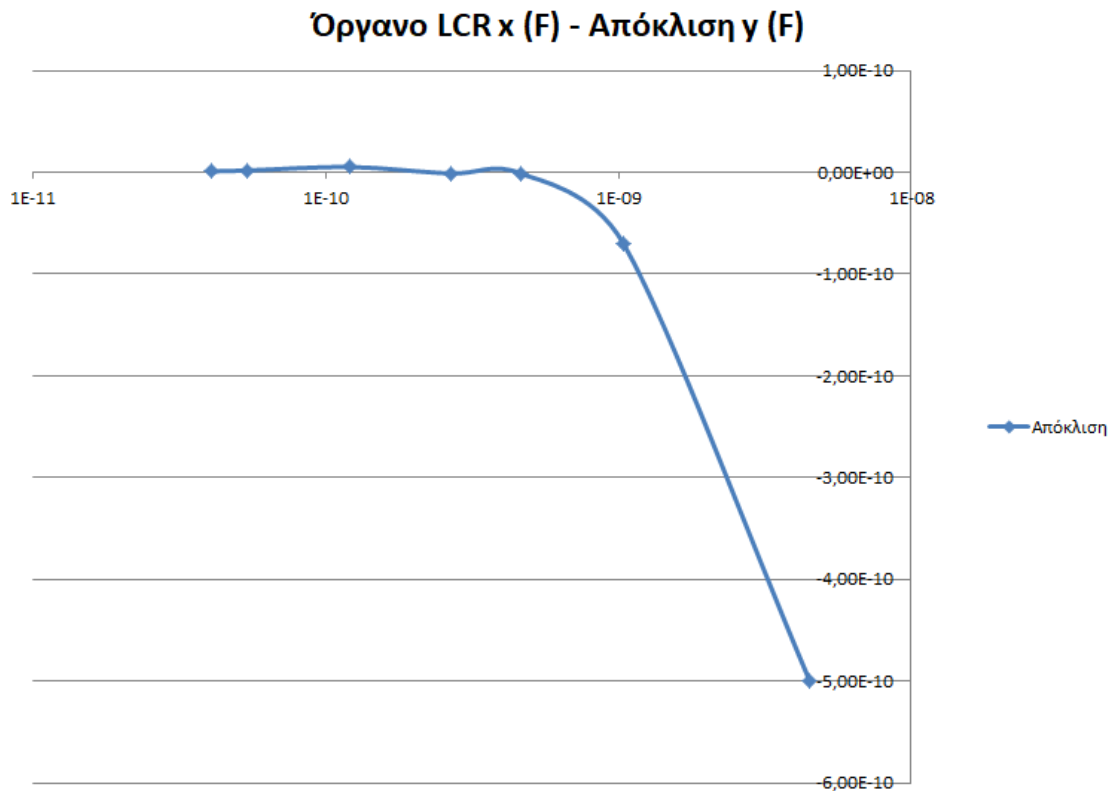
Η βαθμονόμηση της μέτρησης αντιστάσεων με βάση την εξίσωση της εικόνας (4.13) ήταν δύσκολη, ακόμα και στην περίπτωση που η εξίσωση χωρίστηκε σε τέσσερα μέρη για μεγαλύτερη ακρίβεια. Εναλλακτικά, για την βαθμονόμηση αυτής της μέτρησης χρησιμοποιήθηκε η εικόνα (4.15) και το μέσο σφάλμα που όπως φαίνεται, είναι μικρότερο από 3% για τιμές αντίστασης από περίπου 10Ω ως περίπου $1\text{M}\Omega$. Πιο συγκεκριμένα, το μέσο σφάλμα, αγνοώντας τις δύο ακραίες περιπτώσεις (1Ω και $1,8\text{M}\Omega$), ισούται με **2,316%**. Για αυτόν τον λόγο, θα γίνει πολλαπλασιασμός των τιμών των αντιστάσεων με τον συντελεστή **0,977** με την βοήθεια του λογισμικού του arduino, ώστε να επιτευχθεί μείωση του σφάλματος.

4.4 Μέτρηση χωρητικότητας

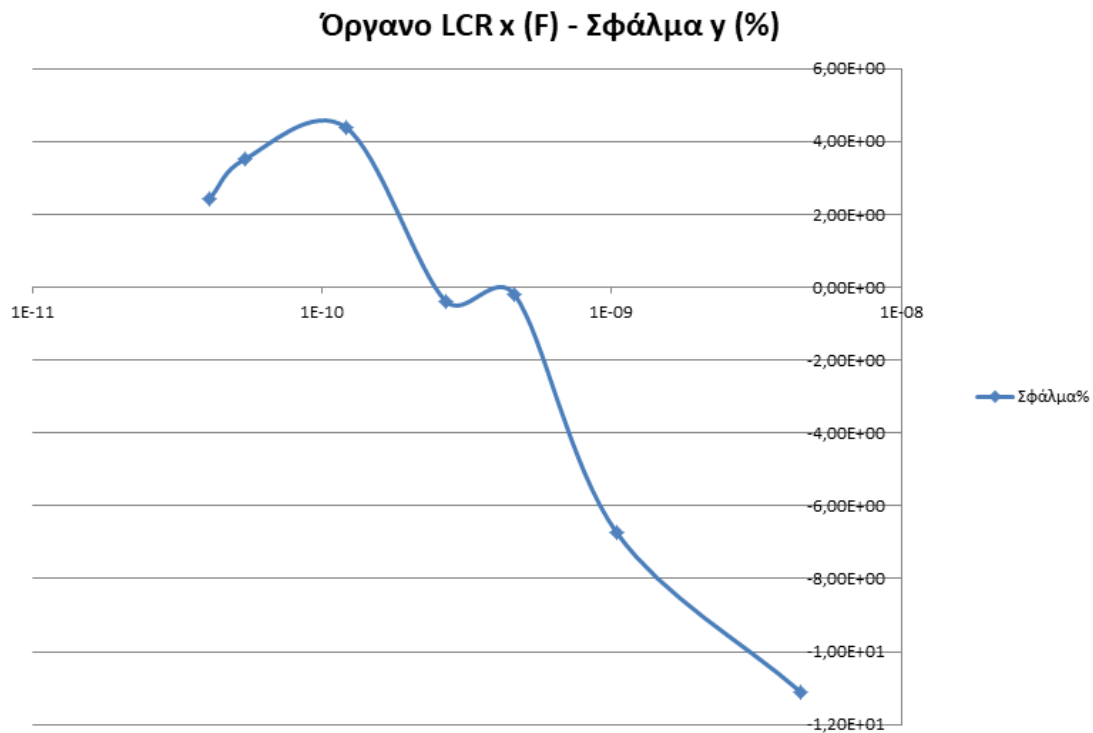
Το κύκλωμα μέτρησης χωρητικότητας χρησιμοποιεί δύο μεθόδους φόρτισης πυκνωτών. Η πρώτη μέθοδος είναι για πυκνωτές μικρότερους από 25 nF , ενώ η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιεί αυξημένο ρεύμα για πυκνωτές μεγαλύτερους από 25 nF . Για αυτόν τον λόγο, είναι αναγκαίο να εξεταστούν ξεχωριστά οι δύο τρόποι μέτρησης.



Εικόνα 4.16: Σύγκριση τιμών χωρητικότητας (41pF...4,5nF)

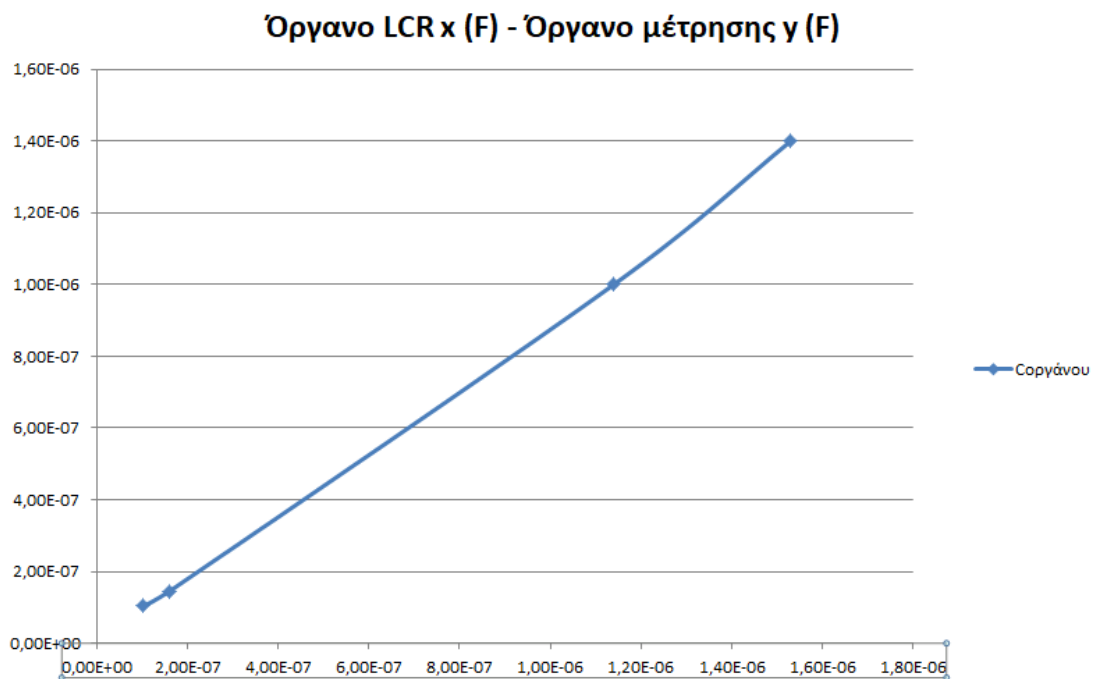


Εικόνα 4.17: Απόκλιση τιμών οργάνου μέτρησης σε σχέση με αυτές του οργάνου LCR (41pF...4,5nF)

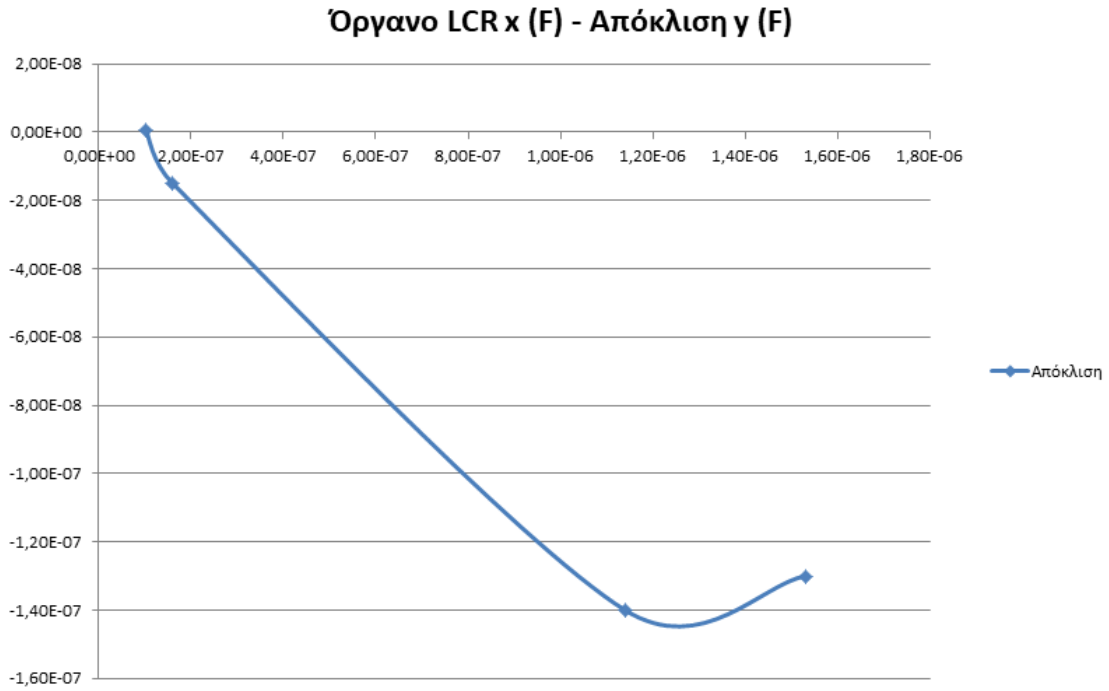


Εικόνα 4.18: Ποσοστό σφάλματος σε σχέση με το όργανο LCR (41pF...4,5nF)

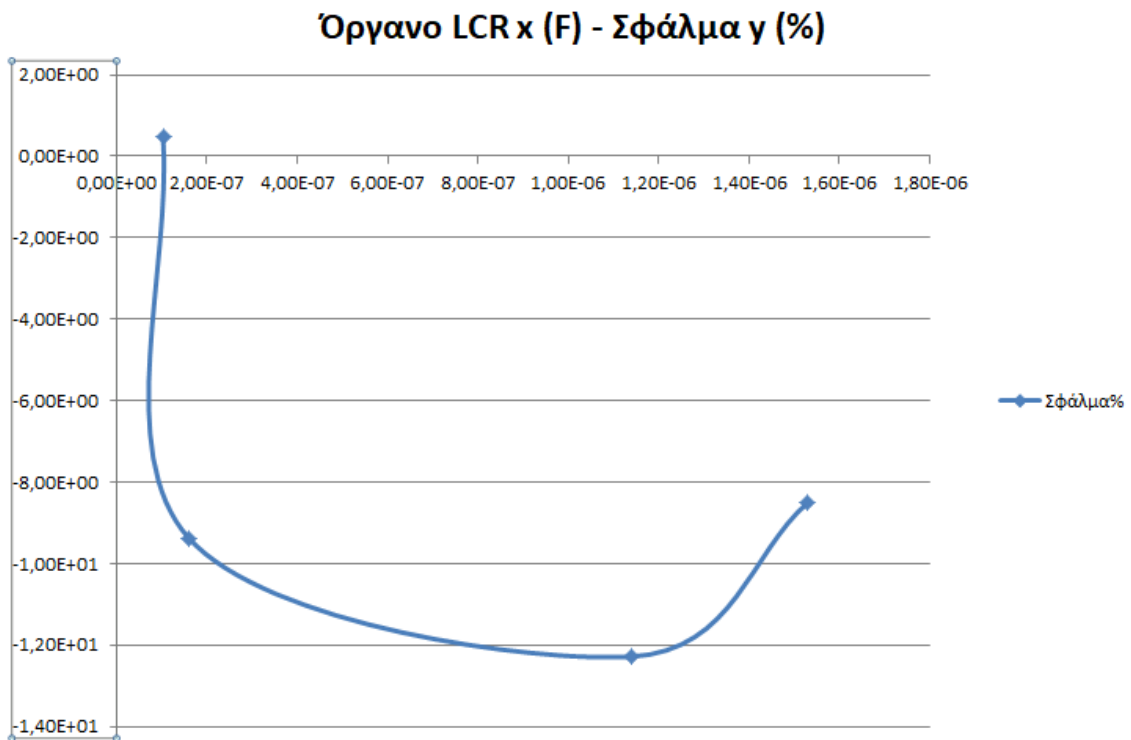
Προκύπτει πως η εξίσωση που επιβεβαιώνει προσεγγιστικά την εικόνα (4.16) είναι $y=0,8848x+3E-11$. Θα γίνει μείωση του σφάλματος των τιμών των μικρών πυκνωτών με την βοήθεια του λογισμικού του arduino και με βάση αυτήν την εξίσωση.



Εικόνα 4.19: Σύγκριση τιμών χωρητικότητας (103nF...1,53μF)



Εικόνα 4.20: Απόκλιση τιμών οργάνου μέτρησης σε σχέση με αυτές του οργάνου LCR (103nF...1,53μF)

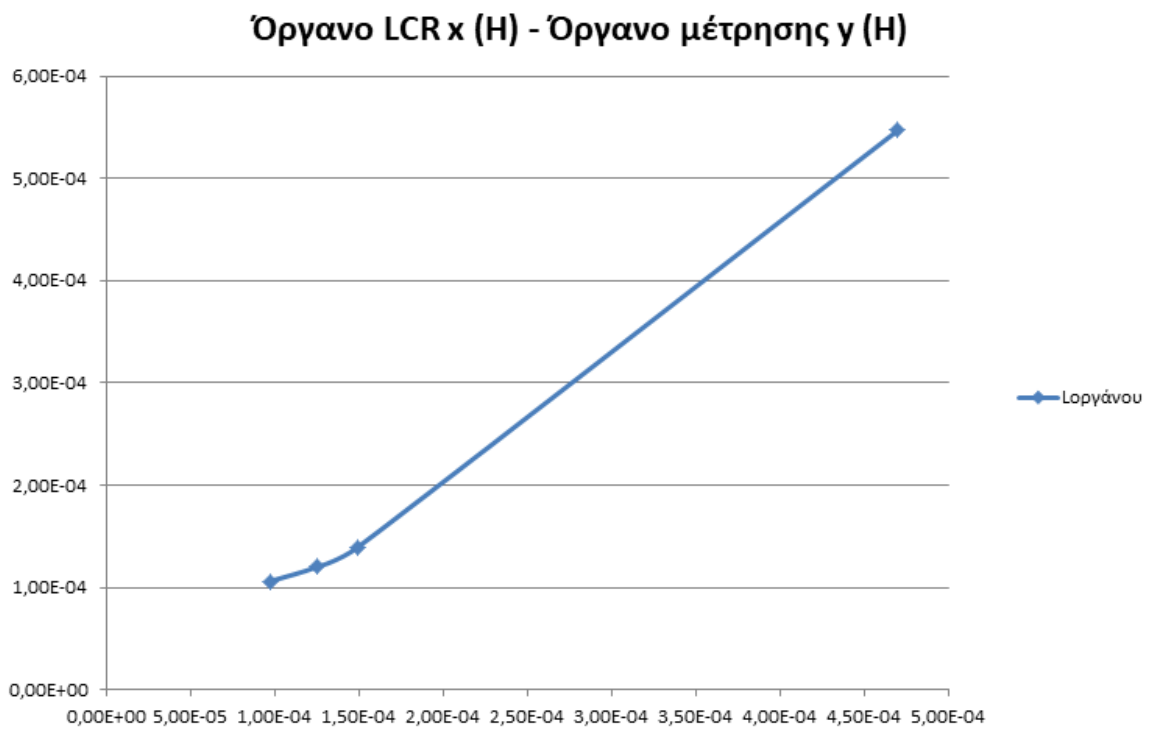


Εικόνα 4.21: Ποσοστό σφάλματος σε σχέση με το όργανο LCR (103nF...1,53μF)

Προκύπτει πως η εξίσωση που επιβεβαιώνει προσεγγιστικά την εικόνα (4.19) είναι $y=0,9002x+2E-09$. Θα γίνει μείωση του σφάλματος των τιμών των μεγάλων πυκνωτών με την βοήθεια του λογισμικού του arduino και με βάση αυτήν την εξίσωση.

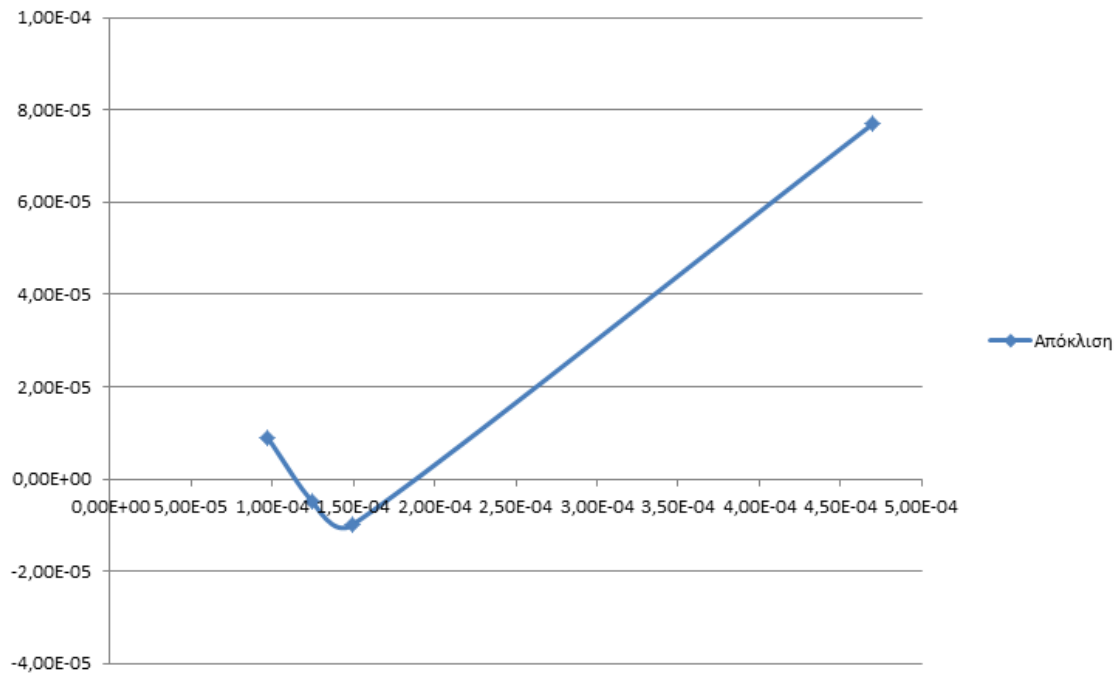
4.5 Μέτρηση αυτεπαγωγής

Το κύκλωμα μέτρησης αυτεπαγωγής έχει μόνο μία κλίμακα. Οι τιμές που μετρήθηκαν ήταν λίγες και το ποσοστό σφάλματος δεν παραμένει σταθερό.



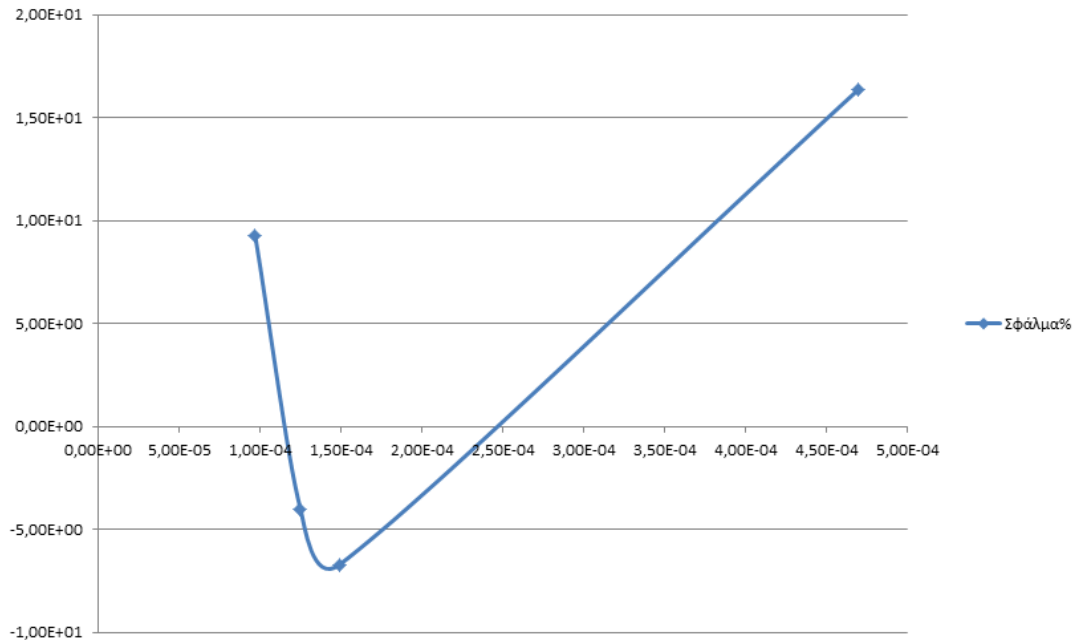
Εικόνα 4.22: Σύγκριση τιμών χωρητικότητας (97μΗ...470μΗ)

Όργανο LCR x (H) - Απόκλιση γ (H)



Εικόνα 4.23: Απόκλιση τιμών οργάνου μέτρησης σε σχέση με αυτές του οργάνου LCR (97μH...470μH)

Όργανο LCR x (H) - Σφάλμα γ (%)



Εικόνα 4.24: Ποσοστό σφάλματος σε σχέση με το όργανο LCR (97μH...470μH)

Όπως φαίνεται στην εικόνα (4.24), το ποσοστό σφάλματος δεν παρουσιάζει σταθερότητα, κυμαίνεται από -7% ως 16%. Οι τιμές των πηγών που μετρήθηκαν είναι λίγες και επομένως δεν έχει νόημα η βαθμονόμηση αυτού του κυκλώματος μέτρησης.

Βιβλιογραφία

- [1] <https://en.wikipedia.org>
- [2] <https://web.ua.es/doci/vis/magnet/multimeter.html>
- [3] <https://slideplayer.gr/slide/2322218/>
- [4] <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano>
- [5] A. P. Malvino, D. J. Bates, *Ηλεκτρονική*, Εκδόσεις Τζιόλα
- [5] <https://www.ti.com>
- [6] Μιχάλης Ν. Σπάσος, *Αναλογική επεξεργασία σημάτων αισθητηρίων*, Εκδόσεις Αϊβάζη
- [7] <https://www.analog.com/>
- [8] https://www.electronics-tutorials.ws/rc/rc_1.html
- [9] <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/direct-current/chpt-13/capacitors-and-calculus/>
- [10] Μιχάλης Ν. Σπάσος, Κώστας Θ. Αμοιρίδης, *Σύγχρονες εφαρμογές αναλογικών ηλεκτρονικών*, Εκδόσεις Αϊβάζη
- [11] <https://www.arduino.cc>

Βιβλιογραφία εικόνων

- [1] <https://www.thebalancesmb.com/multimeter-what-is-a-multimeter-844780>
- [2] <https://dengarden.com/home-improvement/Using-a-Multimeter>
- [3] <https://en.wikipedia.org/>
- [4] <https://www.livescience.com/53875-resistors-capacitors-inductors.html>
- [5] <https://www.circuitspecialists.com/blog/resistor-color-codes/>
- [6] <https://electricalvoice.com/electrical-resistance-materials/>
- [7] <https://engineerfix.com/ohms-law-the-complete-guide/>
- [8] <https://www.ednasia.com/common-impedance-plumbing/>
- [9] <https://www.theengineerspost.com/capacitors-types/>
- [10] <https://www.iqsdirectory.com/articles/electric-coil/inductors-and-inductor-coils.html>
- [11] <https://www.joom.com/el/products/5f22aad6968a3f01069811b6>
- [12] <https://www.analog.com>
- [13] <https://www.ossila.com/en-eu/pages/iv-curves-measurement>
- [14] https://www.tutorialspoint.com/basic_electronics/basic_electronics_types_of_transistors.htm
- [15] https://www.electronics-tutorials.ws/rc/rc_1.html
- [16] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Damped_sinewave.svg
- [17] https://www.researchgate.net/figure/Propagation-Delay-Time-of-Comparator-3_fig2_283206237
- [18] <https://www.ti.com>

Παράρτημα Α: Κώδικας που χρησιμοποιήθηκε

```
#include <Wire.h>           //βιβλιοθήκη I2C
#include <LiquidCrystal_I2C.h> //βιβλιοθήκη LCD
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2); //δήλωση διεύθυνσης LCD

float Vpos, Vneg, Vavg, Vtotal=0, Ipos, Ineg, Iavg, Itotal=0, resistance, V=4.91, voltdiv, Rtotal=0,
Ravg, capacitance, current = 0.125, bigcurrent = 84, frequency, cap= 2.2E-6, inductance;

int Vaccuracy, mode=0, transistor=0, rselect=0, counter=0, Raccuracy;

long R[4]={200,2000,20000,200000};

String unit;

bool flag=0, increasecurrent=0, interrupt=0;

unsigned long timewaiting, starttime, timecharged, pulse;           //δήλωση μεταβλητών

void setup(){
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), changemode, FALLING); //εξωτερικές διακοπές
  lcd.init();           //εντολές για αρχικοποίηση LCD
  lcd.clear();
  lcd.backlight();
  Serial.begin (9600);
  pinMode(2, INPUT_PULLUP);           //υψηλό δυναμικό εκτός αν πατηθεί το κουμπί
  pinMode(4, OUTPUT);           //200Ω έλεγχος κλάδου
  digitalWrite(4,LOW);
  pinMode(5, OUTPUT);           //2kΩ έλεγχος κλάδου
  digitalWrite(5,LOW);
  pinMode(6, OUTPUT);           //20kΩ έλεγχος κλάδου
  digitalWrite(6,LOW);
  pinMode(7, OUTPUT);           //200kΩ έλεγχος κλάδου
  digitalWrite(7,LOW);
  pinMode(10, OUTPUT);           // pin εκφόρτισης
  digitalWrite(10,LOW);
  pinMode(9, OUTPUT);           //pin φόρτισης
  digitalWrite(9,LOW);
```

```

pinMode(8, OUTPUT);           //έλεγχος τρανζίστορ
digitalWrite(8,LOW);
pinMode(11, OUTPUT);        //φόρτιση κυκλώματος LC
pinMode(12, INPUT);         //μέτρηση διάρκειας παλμού-συχνότητας ψηφιακού ημιτόνου

delay(200);
}
void loop(){                 //έναρξη επανάληψης
  startloop:
  interrupt=0;              //μηδενισμός της σημαίας interrupt
  if (mode==0){             //mode 0 μέτρηση τάσης
    Vpos=analogRead(0);     //V=2.5*1/15.6
    Vneg=analogRead(1);     //μέτρηση τάσεων από τον ADC μετά τα κέρδη των βαθμίδων

    if(Vpos>=Vneg){         //ελέγχει για την μεγαλύτερη τάση
      if(Vpos<=5)           //μείωση θορύβου κοντά στο 0
        Vpos=0;
    } else{
      Vpos=Vpos/2.5*15.6*5/1023; //απαλοιφή κερδών και μετατροπή από bits σε V
      Vpos=(Vpos+0.0981)/1.0027; //βαθμονόμηση
    }
    if(counter<20){        //μέσος όρος για απαλοιφή θορύβου
      Vtotal+=Vpos;
      counter++;
    }
    else{                  //μέσος όρος για απαλοιφή θορύβου
      Vavg=Vtotal/20;
      Vtotal=0;
      counter=0;
      if(Vavg<1){         //ακρίβεια δεκαδικών ψηφίων
        Vaccuracy=3;
      }
    }
  }
}

```

```

else if(Vavg<10){           //ακρίβεια δεκαδικών ψηφίων
  Vaccuracy=2;
}
else{                       //ακρίβεια δεκαδικών ψηφίων
  Vaccuracy=1;
}
Serial.println();          //εμφάνιση τιμής στο serial monitor
Serial.print("V ");
Serial.print(Vavg,Vaccuracy);
Serial.print(" V");
lcd.clear();               //καθαρισμός οθόνης και εμφάνιση της θετικής τάσης με ακρίβεια
lcd.setCursor(0,1);        //δεκαδικών που επιλέχθηκε ανάλογα με το μέγεθός της
lcd.print("V");
lcd.setCursor(5,1);
lcd.print(Vavg,Vaccuracy);
lcd.setCursor(13,1);
lcd.print("V");
}
}
else{                       //η αρνητική τάση έχει μεγαλύτερη τιμή
  if(Vneg<=5)               //μείωση θορύβου κοντά στο 0
    Vneg=0;
  else{
    Vneg=Vneg/2.5*15.6*5/1023; //απαλοιφή κερδών και μετατροπή από bits σε V
    Vneg=Vneg/1.021;          //πρώτη βαθμονόμηση
    Vneg=(Vneg+0.0886)/1.0032; //δεύτερη βαθμονόμηση
  }
  if(counter<20){          //μέσος όρος για απαλοιφή θορύβου
    Vtotal+=Vneg;
    counter++;
  }
  else{
    Vavg=Vtotal/20;

```

```

Vtotal=0;
counter=0;
if(Vavg<1){           //ακρίβεια δεκαδικών ψηφίων
  Vaccuracy=3;
}
else if(Vavg<10){
  Vaccuracy=2;
}
else{
  Vaccuracy=1;
}
Serial.println();    //εμφάνιση τιμής στο serial monitor
Serial.print("V -");
Serial.print(Vavg,Vaccuracy);
Serial.print("  V");
lcd.clear();         //καθαρισμός οθόνης και εμφάνιση της αρνητικής τάσης με ακρίβεια
lcd.setCursor(0,1);  //δεκαδικών που επιλέχθηκε ανάλογα με το μέγεθός της
lcd.print("V");
lcd.setCursor(4,1);
lcd.print("-");
lcd.setCursor(5,1);
lcd.print(Vavg,Vaccuracy);
lcd.setCursor(13,1);
lcd.print("V");
}
}

delay(50);           //καθυστέρηση ώστε να εμφανίζει μια τιμή κάθε δευτερόλεπτο
}

else if(mode==1){    //mode 1 μέτρηση ρεύματος
  Ipos=analogRead(2); //μέτρηση ρευμάτων που έχουν μετατραπεί σε τάσεις με συντελεστή
  Ineg=analogRead(3); //49.78 που είναι το κέρδος τάσης του AD623 με RG=2kΩ
}
}

```

```

if(Ipos>=Ineg){           //μεγαλύτερο θετικό ρεύμα
Ipos-=41;                 //αφαίρεση Vref=200mV
if(Ipos<0)                //μείωση θορύβου κοντά στο 0
  Ipos=0;
else{
  Ipos=Ipos*5/1023/49.78*1000; //απαλοιφή των κερδών και μετατροπή από bits σε mA
  Ipos=Ipos/1.143;           //πρώτη βαθμονόμηση
  Ipos=(Ipos+0.0533)/0.9373; //δεύτερη βαθμονόμηση
}

if(counter<20){          //μέσος όρος για μείωση θορύβου
  Itotal+=Ipos;
  counter++;
}
else{
  Iavg=Itotal/20;
  Itotal=0;
  counter=0;
  Serial.println();       //εμφάνιση τιμής στο serial monitor
  Serial.print("I ");
  Serial.print(Iavg,1);
  Serial.print(" mA");
  lcd.clear();            //καθαρισμός οθόνης και εμφάνιση της θετικής τιμής ρεύματος
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("I");
  lcd.setCursor(5,1);
  lcd.print(Iavg,1);
  lcd.setCursor(13,1);
  lcd.print("mA");
}

```

```

}
else{
    //το αρνητικό ρεύμα είναι μεγαλύτερο
    Ineg=-41;          //αφαίρεση Vref=200mV
    if(Ineg<0)        //μείωση θορύβου κοντά στο 0
        Ineg=0;
    else{
        Ineg=Ineg*5/1023/49.78*1000;    // απαλοιφή των κερδών και μετατροπή από bits σε mA
        Ineg=Ineg/1.143;                //πρώτη βαθμονόμηση
        Ineg=(Ineg+0.0739)/0.9384;     //δεύτερη βαθμονόμηση
    }
    if(counter<20){
        //μέσος όρος για μείωση θορύβου
        Itotal+=Ineg;
        counter++;
    }
    else{
        Iavg=Itotal/20;
        Itotal=0;
        counter=0;
        Serial.println();           //εμφάνιση τιμής στο serial monitor
        Serial.print("I  -");
        Serial.print(Iavg,1);
        Serial.print("  mA");
        lcd.clear();                //καθαρισμός οθόνης και εμφάνιση της αρνητικής τιμής ρεύματος
        lcd.setCursor(0,1);
        lcd.print("I");
        lcd.setCursor(4,1);
        lcd.print("-");
        lcd.setCursor(5,1);
        lcd.print(Iavg,1);
        lcd.setCursor(13,1);
        lcd.print("mA");
    }
}

```

```

}

delay(50);           //καθυστέρηση ώστε να εμφανίζει μια τιμή κάθε δευτερόλεπτο
}

else if(mode==2){   //mode 2 μέτρηση αντίστασης
  voltdiv=analogRead(6);           //μέτρηση τιμής τάσης στην μέση του διαιρέτη τάσης
  if (voltdiv>=0.8*1023 && rselect!=3){ //αν η τιμή εξόδου είναι μεγαλύτερη από το 80%
    switch (transistor){           //της τιμής εισόδου, τότε ανεβάζει σταδιακά
    case 0:                         //την κλίμακα μέτρησης αντιστάσεων, εκτός
      digitalWrite(4,HIGH);         //αν ήδη βρίσκεται στην πιο μεγάλη
      digitalWrite(5,LOW);
      digitalWrite(6,LOW);
      digitalWrite(7,LOW);
      rselect=0;                    //αντίσταση σύγκρισης
      transistor++;
      break;
    case 1:
      digitalWrite(4,LOW);
      digitalWrite(5,HIGH);
      digitalWrite(6,LOW);
      digitalWrite(7,LOW);
      rselect=1;
      transistor++;
      break;
    case 2:
      digitalWrite(4,LOW);
      digitalWrite(5,LOW);
      digitalWrite(6,HIGH);
      digitalWrite(7,LOW);
      rselect=2;
      transistor++;
      break;

```

```

case 3:
    digitalWrite(4,LOW);
    digitalWrite(5,LOW);
    digitalWrite(6,LOW);
    digitalWrite(7,HIGH);
    rselect=3;
    transistor++;
    break;
default:
    digitalWrite(4,HIGH);
    digitalWrite(5,LOW);
    digitalWrite(6,LOW);
    digitalWrite(7,LOW);
    rselect=0;
    transistor=0;
    break;
}
}
else {
    //αν η τιμή εξόδου του διαιρέτη τάσης είναι μικρότερη από το
    //80% της τιμής εισόδου
    voltdiv=voltdiv*5/1023; //μετατροπή τιμής εξόδου από bits σε V
    resistance = voltdiv*R[rselect]/(V-voltdiv); //υπολογισμός της αντίστασης από τον τύπο
    //του διαιρέτη τάσης
    //R=Vout*Rσύγκρισης/(4.91-Vout)
    //4.91 είναι προσεγγιστικά η τάση εισόδου μείον την VCE των τρανζίστορ
    resistance*=0.94; //πρώτη βαθμονόμηση
    resistance*=0.977; //δεύτερη βαθμονόμηση
    digitalWrite(4,HIGH); //επαναφορά κλίμακας
    digitalWrite(5,LOW);
    digitalWrite(6,LOW);
    digitalWrite(7,LOW);
    rselect=0;
    transistor=0;
}
}

```

```

if(counter<20){                                     //μέσος όρος για μείωση θορύβου
    Rtotal+=resistance;
    counter++;
    if(Rtotal>=1E15)                                 //άπειρη αντίσταση
        Rtotal=-3.4028235E38;
    delay(50);                                       //καθυστέρηση για να εμφανίζεται μια τιμή κάθε δευτερόλεπτο
}
else{
    flag=1;
    Ravg=Rtotal/20;
    Rtotal=0;
    counter=0;
}
}

if(flag){
    if (Ravg<0){                                     //άπειρη αντίσταση
        unit="OL";
        Ravg=0;
    }

    else if (Ravg>=1E6){                             //επιλογή μονάδας MΩ, kΩ, Ω, με βάση το μέγεθος της αντίστασης
        unit="MΩ";
        Ravg*=1E-6;
    }

    else if (Ravg>=1E3){
        unit="kΩ";
        Ravg*=1E-3;
    }

    else
        unit="Ω";

    if (Ravg<10)                                     //επιλογή ακρίβειας δεκαδικών ψηφίων
        Raccuracy=2;
}

```

```

else
  Raccuracy=1;

Serial.println();           //εμφάνιση τιμής στο serial monitor
Serial.print("R ");
Serial.print(Ravg,Raccuracy);
Serial.print(" ");
Serial.print(unit);
lcd.clear();               //καθαρισμός οθόνης και εμφάνιση της τιμής της αντίστασης
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("R");
lcd.setCursor(5,1);
lcd.print(Ravg,Raccuracy);
lcd.setCursor(12,1);
lcd.print(unit);
flag=0;
}
delay(1);
}
else if(mode==3){         //mode 3 μέτρηση χωρητικότητας
  digitalWrite(8,LOW);     //τρανζίστορ off
  digitalWrite(9,LOW);    //ο πυκνωτής δεν φορτίζει
  pinMode(10, OUTPUT);    //αλλαγή της D10 σε έξοδο
  digitalWrite(10, LOW);  //έναρξη εκφόρτισης
  while (analogRead(A7) >= 4*1023/10.5){ //εκφόρτιση πυκνωτή όσο η τάση του είναι >=2V
    if (interrupt){       //έλεγχος για διακοπές
      interrupt=0;
      goto startloop;    //πηγαίνει στην αρχή της επανάληψης
    }
  }
}

```

```

pinMode(10, INPUT);      //αλλαγή της D10 σε είσοδο για να έχει μεγάλη αντίσταση και να
                          //σταματήσει η εκφόρτιση

delay(5);

digitalWrite(9,HIGH);    //έναρξη φόρτισης

timewaiting = millis();  //χρόνος που ξεκινάει η φόρτιση

while (analogRead(A7) <= 4*1023/10){    φόρτιση πυκνωτή όσο η τάση του είναι <=2V
  if(millis() - timewaiting >=500){ //ελέγχει να δει αν ο πυκνωτής αργεί να φορτίσει
    increasecurrent=1;              //και στην περίπτωση αυτή αυξάνει το ρεύμα φόρτισης
    digitalWrite(8,HIGH);           //τρανζίστορ on
  }

  if (interrupt){                  //έλεγχος διακοπών
    interrupt=0;
    digitalWrite(8,LOW);          //τρανζίστορ off
    digitalWrite(9,LOW);          //δεν υπάρχει φόρτιση
    pinMode(10, OUTPUT);          //έναρξη εκφόρτισης
    digitalWrite(10, LOW);        // έναρξη εκφόρτισης
    goto startloop;              //πηγαίνει στην αρχή της επανάληψης
  }

}

if (increasecurrent){            //μειώνει το ρεύμα αν ήταν μεγάλο
  digitalWrite(8,LOW); //τρανζίστορ off
  increasecurrent=0;
}

starttime=micros();             //ξεκινάει η χρονομέτρηση όταν η τάση του πυκνωτή είναι 2V
while (analogRead(A7) <= 6*1023/10){ //περιμένει μέχρι η τάση να γίνει 3V   dV=1V
  if (micros()-starttime >= 200000){ //έλεγχος για μεγάλο πυκνωτή ~25nF
    increasecurrent=1;
    goto bigcap;                 //πηγαίνει στην περίπτωση του μεγάλου πυκνωτή
  }

  if (interrupt){                //έλεγχος για διακοπές

```

```

interrupt=0;
digitalWrite(8,LOW);
digitalWrite(9,LOW);
pinMode(10, OUTPUT);
digitalWrite(10, LOW);
goto startloop;
}
}
timecharged=micros()-starttime; //τελειώνει η χρονομέτρηση
if(timecharged==112) //διακριτική ικανότητα τα 112μs
    timecharged=0;
capacitance = current*timecharged; //υπολογισμός χωρητικότητας σε pF
capacitance=(capacitance-3E-11)/0.8848; //βαθμονόμηση μικρών πυκνωτών
if(capacitance<0) //έλεγχος για αρνητική τιμή λόγω βαθμονόμησης
    capacitance=0;

bigcap: // περίπτωση μεγάλου πυκνωτή
if (increasecurrent==1){ //έλεγχος για περίπτωση μεγάλου πυκνωτή
    digitalWrite(9,LOW); //παύση της φόρτισης
    pinMode(10, OUTPUT); //D10 έξοδος
    digitalWrite(10, LOW); //έναρξη εκφόρτισης

while (analogRead(A7) >= 4*1023/10.5) { //εκφόρτιση όσο η τάση >=2V
if (interrupt){ //έλεγχος διακοπών
    interrupt=0;
    digitalWrite(8,LOW);
    digitalWrite(9,LOW);
    pinMode(10, OUTPUT);
    digitalWrite(10, LOW);
    goto startloop; //πηγαίνει στην αρχή της επανάληψης
    }
}
pinMode(10, INPUT); //παύση εκφόρτισης

```

```

digitalWrite(8,HIGH);           //τρανζίστορ on, μεγάλο ρεύμα φόρτισης
delay(5);
digitalWrite(9,HIGH);           //έναρξη φόρτισης
while (analogRead(A7) <= 4*1023/10){ //φόρτιση όσο η τάση πυκνωτή <=2V
  if (interrupt){               //έλεγχος διακοπών
    interrupt=0;
    digitalWrite(8,LOW); //transistor off
    digitalWrite(9,LOW); //not charging
    pinMode(10, OUTPUT); //start discharging
    digitalWrite(10, LOW); //start discharging
    goto startloop;
  }
}
starttime=micros();             //εκκίνηση χρονομέτρησης
while (analogRead(A7) <= 6*1023/10){ //φόρτιση ως τα 3V   dv=1V
  if (interrupt){               //έλεγχος διακοπών
    interrupt=0;
    digitalWrite(8,LOW); //transistor off
    digitalWrite(9,LOW); //not charging
    pinMode(10, OUTPUT); //start discharging
    digitalWrite(10, LOW); //start discharging
    goto startloop;
  }
}
timecharged=micros()-starttime; //τελειώνει η χρονομέτρηση
capacitance = bigcurrent*timecharged; //υπολογισμός χωρητικότητας σε pF
capacitance *= 1.1; //πρώτη βαθμονόμηση
capacitance =(capacitance-2E-9)/0.9002; //δεύτερη βαθμονόμηση
if(capacitance<0)               //έλεγχος για αρνητική τιμή λόγω βαθμονόμησης
  capacitance=0;
digitalWrite(8,LOW); //τρανζίστορ off
increasecurrent=0;
}

```

```

if(capacitance < 1E3){           //επιλογή μονάδων pF, nF, uF, mF ανάλογα με το μέγεθος
  unit = "pF";
}
else if (capacitance < 1E6){
  capacitance *= 1E-3;
  unit = "nF";
}
else if (capacitance < 1E9){
  capacitance *= 1E-6;
  unit = "uF";
}
else{
  capacitance *= 1E-9;
  unit = "mF";
}
Serial.println();               //εμφάνιση τιμής στο serial monitor
Serial.print("C ");
Serial.print(capacitance,1);
Serial.print(" ");
Serial.print(unit);  lcd.clear();           //καθαρισμός οθόνης και εμφάνιση χωρητικότητας
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("C");
lcd.setCursor(5,1);
lcd.print(capacitance,1);
lcd.setCursor(13,1);
lcd.print(unit);
if (unit=="pF")
  delay(1000); //οι πυκνωτές στα pF φορτίζουν και εκφορτίζουν πολύ γρήγορα και τα αποτελέσματα
else           //στην οθόνη δεν γίνονται εύκολα ορατά, χρειάζονται μεγαλύτερη καθυστέρηση
  delay(100);
}
else{           //mode 4 μέτρηση αυτεπαγωγής
  digitalWrite(11, HIGH); //έναρξη φόρτισης κυκλώματος tank

```

```

delay(5); //αναμονή για φόρτιση
digitalWrite(11,LOW); //παύση φόρτισης και αρχή ταλάντωσης
delayMicroseconds(100);
pulse = pulseIn(12,HIGH,5000); //επιστρέφει 0 αν περάσουν 5ms χωρίς ταλάντωση
if(pulse){ //pulse = μισή περίοδος σε μs
    frequency = 1E6/(2*pulse); //Hz
    inductance = 1/(cap*frequency*frequency*4*3.14159*3.14159); //υπολογισμός αυτεπαγωγής
    if(inductance<1E-3){ //επιλογή μονάδας uH, mH, ανάλογα με το μέγεθος
        inductance *= 1E6; //uH
        unit="uH";
    }
    else{
        inductance *= 1E3; //mH
        unit="mH";
    }
}
else{ //αν δεν μετρηθεί παλμός σε 5ms
    inductance=0;
    unit="uH";
}
Serial.println(); //εμφάνιση τιμής στο serial monitor
Serial.print("L ");
Serial.print(inductance,1);
Serial.print(" ");
Serial.print(unit);
lcd.clear(); //καθαρισμός οθόνης και εμφάνιση τιμής αυτεπαγωγής
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("L");
lcd.setCursor(5,1);
lcd.print(inductance,1);
lcd.setCursor(13,1);
lcd.print(unit);
delay(200);

```

```

}
}
void changemode() {           //συνάρτηση αλλαγής μεγέθους μέτρησης, ενεργοποιείται όταν
                             //πατηθεί το κουμπί
delay(400);                  //καθυστέρηση για να μην αλλάξει πολλές καταστάσεις με ένα πάτημα λόγω
                             //των αναπηδήσεων
interrupt=1;                //σημαία διακοπών
if(mode==4)                  //αν είναι ήδη στην τελευταία κατάσταση, η τιμή του μετρητή
                             //πηγαίνει κυκλικά στο 0
    mode=0;
else
    mode++;
}

```