



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΩΑΝΝΗΣ-ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΑΔΗΣ

Επιβλέπων : Ευάγγελος Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΩΑΝΝΗΣ-ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΑΔΗΣ

Επιβλέπων : Ευάγγελος Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 31η Οκτωβρίου 2017.

(Υπογραφή)

.....

Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....

Παναγιώτης Τσαραμπάρης
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....

Ιωάννης Ξανθάκης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2017

(Υπογραφή)

.....

ΙΩΑΝΝΗΣ-ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΑΔΗΣ

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

© 2017 – All rights reserved

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

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

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η κατασκευή ηλεκτρονικού εξοπλισμού με σκοπό τη μέτρηση της σύνθετης αντίστασης συσσωρευτών μολύβδου-οξέος σε συχνότητες 50Hz έως 50kHz. Στο θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας των συσσωρευτών. Στην συνέχεια περιγράφεται η λειτουργία της διάταξης, καθώς και τα ηλεκτρονικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν και τέλος, παραθέτονται τα πειραματικά αποτελέσματα. Για την κατασκευή της διάταξης αυτής χρησιμοποιήθηκε υπολογιστική πλατφόρμα της οικογένειας Arduino και προγραμματίστηκε σε γλώσσα C.

Λέξεις κλειδιά

Μέτρηση, διάταξη μετρήσεων, συσσωρευτές, Arduino, LCR.

Abstract

The purpose of this diploma thesis is the design and the construction of electronic equipment for use in lead-acid batteries impedance measurement at frequencies of 50 Hz to 50 kHz. In the theoretical background of this thesis the mode of battery operation is analyzed. Thereafter, the device's function is described, as well as the electronic elements that were used , and in the end , the experimental results are presented. A microcontroller of the Arduino family was used for the implementation of this device, programmed in C language.

Keywords

Measurement, measuring device, batteries, Arduino, LCR.

Περιεχόμενα

Περίληψη	i
Abstract.....	iii
Εισαγωγή	ix
Κεφάλαιο 1. Έλεγχος κατάστασης συσσωρευτών μολύβδου-οξέος	1
1.1. Γενικά περί συσσωρευτών.....	1
1.2. Το φαινόμενο της θειίκωσης	5
1.3. Μετρήσεις σύνθετης αντίστασης	7
1.4. Εξαγωγή συμπερασμάτων για την κατάσταση των συσσωρευτών	10
Κεφάλαιο 2. Υλικό μέρος κατασκευής(Hardware).....	11
2.1. Arduino	11
2.2. Arduino Uno.....	12
2.2.1. Ακροδέκτες.....	13
2.2.2. Μνήμη.....	14
2.2.3. Λογισμικό.....	15
2.3. Οθόνη LCD.....	15
2.4. Ηλεκτρονικά υλικά.....	17
Κεφάλαιο 3. Περιγραφή και ανάλυση της κατασκευής.....	19
3.1. Βασική δομή	19
3.2. Μέθοδοι υπολογισμού των βασικών ζητουμένων.....	20
3.3. Συνδυασμός αποτελεσμάτων.....	25
3.4. Προσομοίωση	28
3.5. Δομή προγράμματος.....	31
Κεφάλαιο 4. Πειραματικά αποτελέσματα κατασκευής	35
4.1. Μετρήσεις και συμπεράσματα.....	35
4.2. Προτάσεις και βελτιώσεις.....	38
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Βασικές εντολές Arduino	41
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Κώδικας προγράμματος	45
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	51

Εικόνες

Εικόνα 1. Σύσταση φορτισμένης (δεξιά) και εκφορτισμένης (αριστερά) μπαταρίας.	2
Εικόνα 2. Ηλεκτροχημικά χαρακτηριστικά μπαταριών μολύβδου οξέος.	3
Εικόνα 3. Εξωτερική και εσωτερική δομή συσσωρευτή μολύβδου.	3
Εικόνα 4. Η μπαταρία του Planté	4
Εικόνα 5. Επίδραση της θειίκωσης σε πλάκα της μπαταρίας ανά κύκλους φόρτισης.	6
Εικόνα 6. Ισοδύναμο ηλεκτρικό μοντέλο συσσωρευτή μολύβδου.	7
Εικόνα 7. Γραφικές παραστάσεις των σύνθετων αντιστάσεων.	10
Εικόνα 8. Βασικά χαρακτηριστικά ArduinoUno.	12
Εικόνα 9. Arduino Uno.	12
Εικόνα 10. Οθόνη LCD 16x2.	16
Εικόνα 11. Το σχηματικό του τελεστικού ενισχυτή.	17
Εικόνα 12. Η Δυαδική λογική AND	18
Εικόνα 13. Σχηματικό διάγραμμα.	20
Εικόνα 14. Σχηματικό διάγραμμα.	21
Εικόνα 15. Κυματομορφές πριν και μετά την ημιανόρθωση.	21
Εικόνα 16. Εξομάλυνση ημιανορθωμένης τάσης για διαφορετικούς πυκνωτές.	22
Εικόνα 17. Καθυστέρηση του AD823 στη σύγκριση ημιτονικής τάσης με τη μηδενική σε συχνότητες Α) 1kHz, Β) 200 kHz, Γ) 1 MHz	23
Εικόνα 18. Σχηματικό διάγραμμα.	24
Εικόνα 19. Κάτοψη της κατασκευής.	25
Εικόνα 20. Το τελικό σχηματικό διάγραμμα της κατασκευής.	26
Εικόνα 21. Η τελική διάταξη σε λειτουργία.	27

Εικόνα 22. Κυματομορφές τάσεων του κυκλώματος που οδηγεί στον υπολογισμό του μέτρου τάσης εξόδου για την περίπτωση Α.	28
Εικόνα 23. Κυματομορφές τάσεων του κυκλώματος που οδηγεί στον υπολογισμό της διαφοράς φάσης τάσεων εισόδου-εξόδου για την περίπτωση Α.	29
Εικόνα 24. Κυματομορφές τάσεων του κυκλώματος που οδηγεί στον υπολογισμό της διαφοράς φάσης τάσεων εισόδου-εξόδου για την περίπτωση Β.....	29
Εικόνα 25. Κυματομορφές τάσεων του κυκλώματος που οδηγεί στον υπολογισμό του μέτρου τάσης εξόδου για την περίπτωση Β.....	30
Εικόνα 26. Κυματομορφές τάσεων του κυκλώματος που οδηγεί στον υπολογισμό της διαφοράς φάσης τάσεων εισόδου-εξόδου για την περίπτωση Γ.	30
Εικόνα 27. Κυματομορφές τάσεων του κυκλώματος που οδηγεί στον υπολογισμό του μέτρου τάσης εξόδου για την περίπτωση Γ.	31
Εικόνα 28. Απλουστευμένο διάγραμμα ροής του προγράμματος.	34

Εισαγωγή

Η μέτρηση της πραγματικής αντίστασης ενός ηλεκτρονικού στοιχείου ή κυκλώματος επιτυγχάνεται εύκολα με τη χρήση απλών πολυμέτρων. Για την μέτρηση της σύνθετης αντίστασης, ωστόσο, συνήθως χρησιμοποιούνται ειδικά μηχανήματα LCR meters αρκετά υψηλότερου κόστους. Τέτοιου είδους μηχανήματα παρέχουν δυνατότητες επιλογής του μοντέλου διάταξης που τίθεται υπο μέτρηση, ώστε να υπολογίζουν, εκτός από τη σύνθετη συνολική αντίσταση, τις τιμές αντιστάσεων-πυκνωτών-αυτεπαγωγών. Η κατασκευή που αναλύεται στην παρούσα εργασία υλοποιείται με χαμηλό κόστος και αποσκοπεί στην μέτρηση της σύνθετης αντίστασης οποιασδήποτε διάταξης.

Η κατασκευή βρίσκει κύρια εφαρμογή σε μετρήσεις συσσωρευτών μολύβδου-οξέος, οι οποίοι παρουσιάζουν χωρητική συμπεριφορά. Ο προσδιορισμός της σύνθετης αντίστασης και κατ' επέκταση, ο χαρακτηρισμός της κατάστασης των συσσωρευτών μέσω αυτής, φαίνεται χρήσιμος σε μελέτες και τεχνικές που αποσκοπούν στην αναζωογόνησή τους.

Κεφάλαιο 1. Έλεγχος κατάστασης συσσωρευτών μολύβδου-οξέος

1.1. Γενικά περί συσσωρευτών

Η μπαταρία ή ηλεκτρικός συσσωρευτής είναι μια διάταξη η οποία αποθηκεύει χημική ενέργεια, και όταν απαιτείται, τη μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια προκειμένου να τροφοδοτείται ένα κύκλωμα. Οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος αποτελούν τον παλαιότερο τύπο επαναφορτιζόμενων συσσωρευτών. Χρησιμοποιούνται ευρέως στην αυτοκινητοβιομηχανία και εγκαθίστανται σε σταθερές μονάδες φόρτισης για την αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ισχύος. Τα βασικά εξαρτήματά τους είναι τα ακόλουθα [1] :

Πλάκες μολύβδου (στοιχεία)

Κατασκευάζονται από μόλυβδο ή από κράμα μολύβδου και άλλων μετάλλων. Στη συνέχεια, ένα μείγμα ενεργών συστατικών με κύριο στοιχείο τα οξείδια του μολύβδου, εφαρμόζεται στο πλέγμα των πλακών. Οι πλάκες ξεραίνονται, σκληραίνουν και με ηλεκτροχημική επεξεργασία το ενεργό υλικό των θετικών πλακών μετατρέπεται σε καστανόχρωμο υπεροξείδιο του μολύβδου, ενώ των αρνητικών πλακών σε γκρίζο σπογγώδη μόλυβδο.

Διαχωριστικά

Ως διαχωριστικά μεταξύ των θετικών και αρνητικών πλακών χρησιμοποιούνται λεπτά φύλλα πορώδους, μονωτικού υλικού. Οι λεπτοί πόροι των διαχωριστικών επιτρέπουν τη χημική αντίδραση των υλικών και τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ των πλακών.

Ηλεκτρολύτης

Όλη η διάταξη βυθίζεται σε αραιό διάλυμα θειικού οξέος, το οποίο χρησιμοποιείται ως ηλεκτρολύτης και επιτρέπει την ανταλλαγή ιόντων.

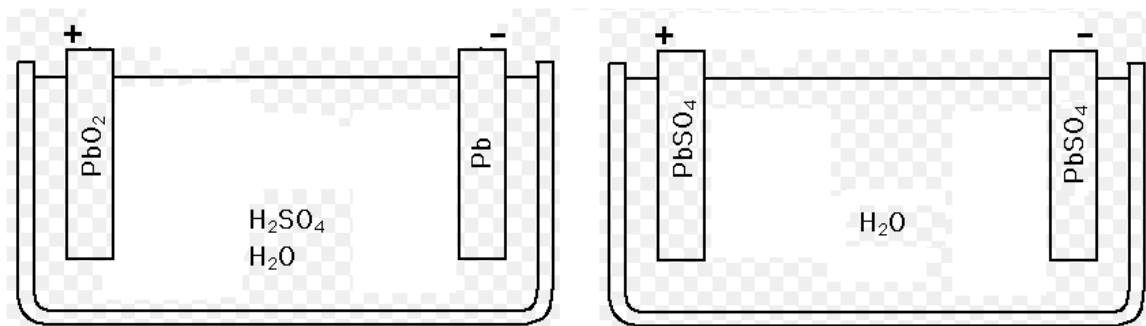
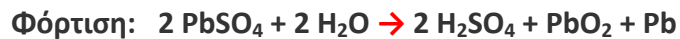
Περίβλημα (κέλυφος)

Το περίβλημα του συσσωρευτή πρέπει να αντέχει τις διαβρωτικές συνθήκες που αναπτύσσονται στο εσωτερικό και στο εξωτερικό του, πρέπει να μην διαβρώνεται από τον ηλεκτρολύτη, τα ενεργά υλικά, καθώς και από το περιβάλλον, στη θερμοκρασία λειτουργίας. Παράλληλα, είναι απαραίτητο να έχει μηχανική αντοχή και μικρό βάρος. Γενικά, επιλέγεται το πολυπροπυλένιο σε συστήματα που ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται οξύ.

Σε μία εκφορτισμένη μπαταρία, το ενεργό υλικό των θετικών πλακών έχει μετατραπεί από υπεροξείδιο του μολύβδου (PbO_2) σε θειικό μολύβδο (PbSO_4), ενώ των αρνητικών πλακών από σπογγώδη γκρίζο μεταλλικό μολύβδο (Pb) σε θειικό μολύβδο (PbSO_4).

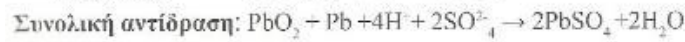
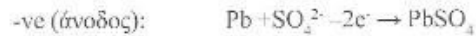
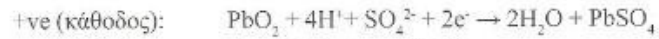


Σε μία φορτισμένη μπαταρία, το ενεργό υλικό των θετικών πλακών έχει μετατραπεί από θειικό μολύβδο (PbSO_4) σε υπεροξείδιο του μολύβδου (PbO_2), ενώ των αρνητικών πλακών από θειικό μολύβδο (PbSO_4) σε σπογγώδη γκρίζο μεταλλικό μολύβδο (Pb) [2].



Εικόνα 1. Σύσταση φορτισμένης (αριστερά) και εκφορτισμένης (δεξιά) μπαταρίας.

Αντιδράσεις κατά την εκφόρτιση:



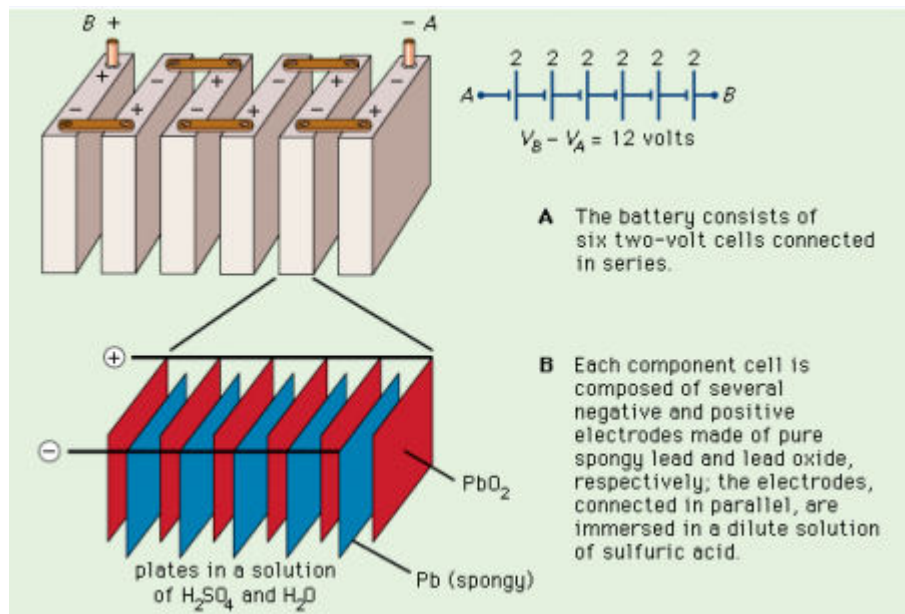
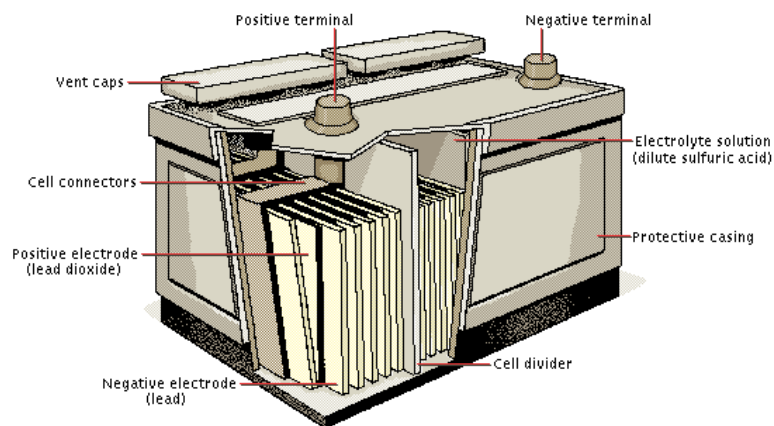
Υδατικός ηλεκτρολύτης: H_2SO_4

Συλλέκτης ρεύματος ή ρευματοσυλλέκτης: μόλυβδος, Pb

Αντιστρεπτό δυναμικό κελιού: 2,05V

$$\Delta G = -394 \text{ kJ/mol}$$

Εικόνα 2. Ηλεκτροχημικά χαρακτηριστικά μπαταριών μολύβδου οξέος [1].

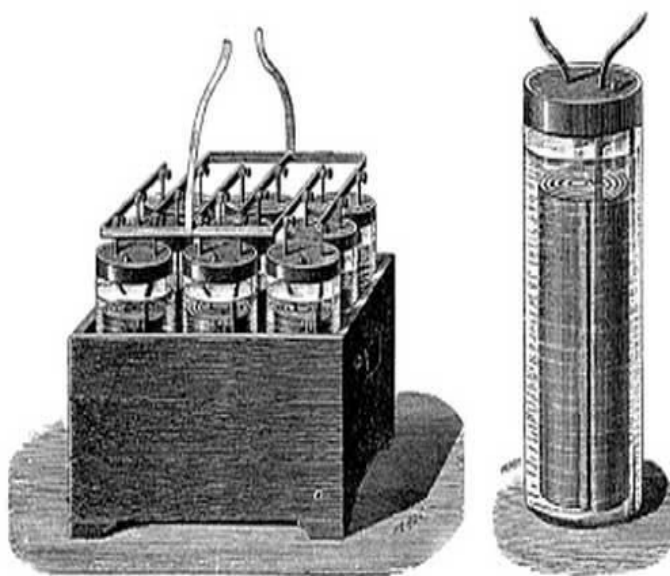


Εικόνα 3. Εξωτερική και εσωτερική δομή συσσωρευτή μολύβδου [3].

Μια σύντομη αναδρομή στο παρελθόν των συσσωρευτών μολύβδου οξέος είναι χρήσιμη για τον σχηματισμό μιας καλύτερης εικόνας του τρόπου λειτουργίας τους.

Έναυσμα αποτέλεσε η παρατήρηση του Nicola Gautherot το 1801, πως κατά την διάρκεια της ηλεκτρόλυσης, τα ηλεκτρόδια πολώνονται ηλεκτρικά, και μάλιστα διαφορετικά λόγω της απορρόφησης οξυγόνου ή υδρογόνου, με αποτέλεσμα τη ροή ενός ‘δευτερεύοντος’ ρεύματος κατά την ένωσή τους.

Ο συσσωρευτής που κατασκευάστηκε από τον Γάλλο φυσικό Gaston Planté εν έτει 1859, ήταν ο πρώτος συσσωρευτής με δυνατότητα επαναφόρτισης μέσω της ροής ρεύματος αντίθετης κατεύθυνσης. Το πρώτο αυτό μοντέλο του Planté λοιπόν δημιουργήθηκε από δύο ‘ταινίες’ μολύβδου μεγάλου μήκους, χωρισμένες με χονδροειδές πανί, σπειροειδώς τυλιγμένες μέσα σε κυλινδρικό δοχείο που περιείχε διάλυμα θειικού οξέος. Οι μπαταρίες αυτές διέθεταν αρκετά μικρή χωρητικότητα, μεγάλο βάρος, και χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για την ρευματοδότηση των τρένων, στην περίπτωση που αυτά ήταν αδρανή σε κάποιο σταθμό.



Εικόνα 4. Η μπαταρία του Planté[4].

Το 1881, μια βελτιωμένη έκδοση εφευρέθηκε από τον Γάλλο μηχανικό Camille Alphonse Faure, κατά την οποία γινόταν επικάλυψη πλεγμάτων με οξείδια του μολύβδου ,σχηματίζοντας τις πλάκες. Από τους πρώτους παραγωγούς τέτοιων μπαταριών υπήρξε ο Henri Tudor (από το 1886).

Στις επόμενες δεκαετίες ακολούθησαν προσπάθειες επικεντρωμένες στην εύρεση των καταλληλότερων δομών και των πιο πρακτικών τεχνικών κατασκευής τους.

Σήμερα, οι μπαταρίες μολύβδου οξέος διακρίνονται σε δύο τύπους με βάση τη μέθοδο κατασκευής τους: Στις ανοικτού τύπου ή πλημμυρισμένες ή εξαεριζόμενες (flooded/vented) και στις κλειστού τύπου ή σφραγισμένες (sealed). Όλες οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος παράγουν αέρια υδρογόνου και οξυγόνου (αεριοποίηση) στα ηλεκτρόδια κατά τη φόρτιση, μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται ηλεκτρόλυση. Αυτά τα αέρια δραπέτεύουν από ένα ανοικτό στοιχείο, ενώ το κλειστό στοιχείο είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε τα αέρια να συγκρατούνται και να ανασυνδυάζονται. Οι ανοικτού τύπου μπαταρίες είναι οι πιο διαδεδομένες σήμερα, λόγω του σχετικά χαμηλού τους κόστους.

Οι κλειστού τύπου μπαταρίες που συχνά αποκαλούνται μπαταρίες VRLA (valve-regulated lead-acid batteries) αποτελούν στην ουσία την βελτιωμένη έκδοση των κλασικών μπαταριών μολύβδου-οξέος, και διαχωρίζονται σε μπαταρίες τύπου AGM και τύπου Gel. AGM (absorbed glass mat) είναι ένας ειδικός διαχωριστής από υαλονήματα. Έχει σχεδιαστεί για να συγκρατεί (σαν σφουγγάρι) τον ηλεκτρολύτη της μπαταρίας μεταξύ των πλακών της μπαταρίας. Οι AGM μπαταρίες περιέχουν μόνο όσο υγρό απαιτείται ώστε να διατηρείται ο διαχωριστής υγρός με ηλεκτρολύτη. Σε περίπτωση που η μπαταρία σπάσει, δεν υπάρχει ελεύθερο υγρό για να διαρρεύσει. Αυτό καθιστά τις μπαταρίες AGM εξαιρετικά ασφαλείς. Οι μπαταρίες τύπου Gel περιέχουν ένα gel πυριτίου μέσα στο οποίο βρίσκεται ο ηλεκτρολύτης της μπαταρίας. Αυτή η παχιά πάστα επιτρέπει τη ροή ηλεκτρονίων μεταξύ των πλακών, αλλά σε περίπτωση που η μπαταρία σπάσει, δεν θα διαρρεύσει υλικό από την μπαταρία [5].

1.2. Το φαινόμενο της θειίκωσης

Η λειτουργία των συσσωρευτών μολύβδου οξέος υπονομεύεται από το φαινόμενο της θειίκωσης, το οποίο μπορεί να μειώσει ή και να εξουδετερώσει την απόδοσή τους σε βάθος χρόνου. Το φαινόμενο της θειίκωσης συντελείται δια του σχηματισμού κρυσταλλικών δομών θειικού άλατος επί των επιφανειών των πλακών άμορφου μολύβδου του συσσωρευτή. Αυτό

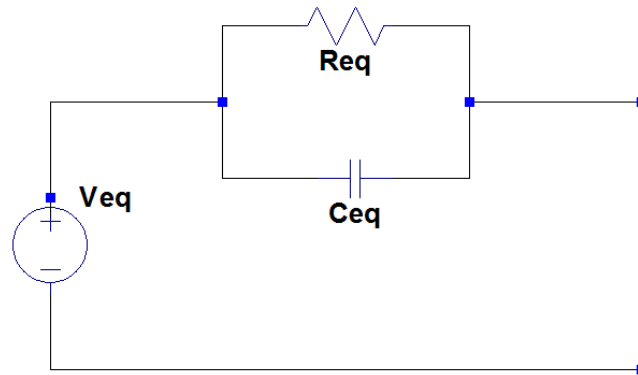
έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της 'ενεργού' επιφάνειας ανταλλαγής ιόντων επί των πλακών μολύβδου του συσσωρευτή, αφού το επικαθήμενο θειικό άλας (σε κρυσταλλική μορφή, έναντι άμορφης) συμπεριφέρεται ως ηλεκτρικός μονωτής. Αιτία της επέκτασης, ίσως και της αρχικής πρόκλησης, της διαδικασίας της θειίκωσης θεωρείται συνήθως είτε η παρατεταμένη παραμονή του ηλεκτρολύτη σε χαμηλή σχετική πυκνότητα είτε η παρατεταμένη λειτουργία του σε κατάσταση αργής (δηλαδή χαμηλής έντασης σε σχέση με την ονομαστική του χωρητικότητα) φόρτισης και εκφόρτισης, είτε η έκθεση του συσσωρευτή σε υψηλές θερμοκρασίες.



Εικόνα 5. Επίδραση της θειίκωσης σε πλάκα της μπαταρίας ανά κύκλους φόρτισης [6].

Θεωρητικά η επίστρωση του θειικού άλατος (σε κρυσταλλική μορφή) επί των πλακών (άμορφου) μολύβδου του συσσωρευτή αποτελεί τον μονωτή-διηλεκτρικό ενός πυκνωτή (κατά το ισοδύναμο ηλεκτρικό του κύκλωμα), χωρητικότητας κυμαινόμενης ανάλογα με το πάχος εναπόθεσης των κρυστάλλων στην εξέλιξη του εκφυλιστικού αυτού φαινομένου. Πλέον αυτού, επειδή το φαινόμενο μπορεί να μην εκτείνεται σε όλη την επιφάνεια των πλακών οπότε πιθανώς να είναι δυνατή η ανταλλαγή κάποιων ιόντων σε επαφή με τον ηλεκτρολύτη, θεωρείται ότι ο ισοδύναμος αυτός πυκνωτής είναι εν παραλλήλω συνδεδεμένος με μια αντίσταση της οποίας η τιμή διαμορφώνεται από την εναπομένουσα ενεργό επιφάνεια των πλακών μολύβδου. Με αυτά τα δεδομένα η ροή συνεχούς ρεύματος δεν είναι εφικτή στον αναμενόμενο βαθμό (δηλαδή στην περίπτωση του μερικά θειικωμένου συσσωρευτή, έως και

καθόλου στην περίπτωση του ολικά θεικωμένου συσσωρευτή). Τούτο όμως δεν ισχύει και για το εναλλασσόμενο ρεύμα που θα διέλθει από το εν σειρά κύκλωμα συσσωρευτή – πυκνωτή.



Εικόνα 6. Ισοδύναμο ηλεκτρικό μοντέλο συσσωρευτή μολύβδου.

1.3. Μετρήσεις σύνθετης αντίστασης

Η σύνθετη αντίσταση (εμπέδηση) επεκτείνει την έννοια της αντίστασης και σε κυκλώματα εναλλασσόμενου ρεύματος όπου η τάση και η ένταση δεν είναι συμφασικά. Σε κυκλώματα συνεχούς ρεύματος ταυτίζεται με την αντίσταση. Η εμπέδηση συμβολίζεται συνήθως με το γράμμα Z και συχνά αναγράφεται σε μιγαδική αριθμητική μορφή. Σύμφωνα με τον γενικευμένο νόμο του Ohm, ισούται με τον λόγο της τάσης προς την ένταση ηλεκτρικού ρεύματος για μία συγκεκριμένη συχνότητα εναλλασσόμενου ρεύματος, όταν η τάση και η ένταση δίνονται σε μιγαδική μορφή.

Η μέτρηση της εμπέδησης των δοκιμίων γίνεται από το LCR meter του εργαστηρίου (HEWLETT PACKARD 4284A). Ως μοντέλο του συσσωρευτή επιλέγεται αντίσταση παράλληλη σε πυκνωτή όπως εξηγήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

Οι μετρήσεις που ακολουθούν αφορούν συσσωρευτές μολύβδου 12 V, 7.2 Ah, για χρήση σε συστήματα UPS, αντιπροσωπευτικούς για πρόβλημα θείκωσης σε προχωρημένο, αλλά και σε πρώιμο στάδιο. Δίπλα σε κάθε συσσωρευτή, αναγράφεται σε παρένθεση το επίπεδο τάσης που μπορεί να δώσει. Σε κάθε συχνότητα αναγράφεται στον πίνακα το μέτρο της εμπέδησης και η χωρητικότητα του ισοδύναμου πυκνωτή.

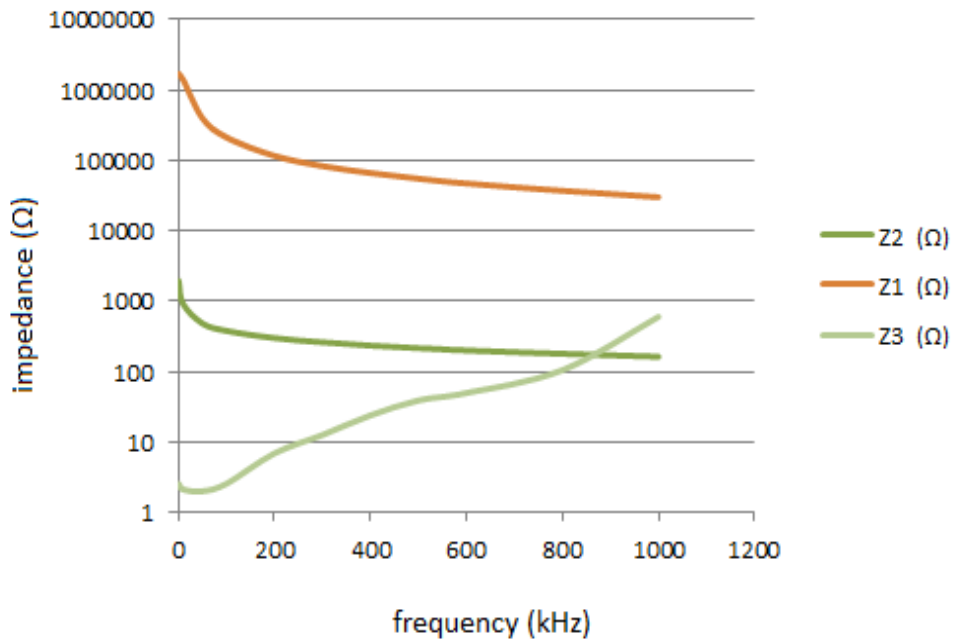
1: B.B. BATTERY (0.1 V)		
Frequency (kHz)	Impedance (Ω)	Capacitance (pF)
1	1700000	7.5
10	1400000	7.5
50	400000	7.2
100	213000	6.6
200	116000	6.18
300	83000	5.8
400	66000	5.65
500	55000	5.5
600	47000	5.3
800	37000	5.2
1000	30000	5

2: B.B. BATTERY (1.9 V)		
Frequency (kHz)	Impedance (Ω)	Capacitance (pF)
1	1950	28000
10	918	9400
50	484	3460
100	380	2100
200	300	1300
300	261	1000

400	234	888
500	216	778
600	200	703
800	179	595
1000	163	527

3: APC (11 V)		
Frequency (kHz)	Impedance (Ω)	Capacitance (pF)
1	2.55	6500000
10	2.13	1000000
50	2.00	382000
100	2.55	365000
200	6.92	101000
300	12.59	42000
400	24.00	15000
500	39.00	6300
600	49.70	3600
800	105.00	473
1000	600.00	10

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι εάν το μηχάνημα επέτρεπε την ανάπτυξη DC συνιστώσας μεγαλύτερης των 2 V, θα μπορούσαν να ληφθούν μετρήσεις υπο την ανάπτυξη DC συνιστώσας ίδιας τιμής με αυτής του συσσωρευτή και αντίθετης πολικότητας, για να εξεταστεί τυχόν απόκλιση των αποτελεσμάτων μετρήσεων, κυρίως στου συσσωρευτές σχετικά καλής κατάστασης.



Εικόνα 7. Γραφικές παραστάσεις των σύνθετων αντιστάσεων.

1.4. Εξαγωγή συμπερασμάτων για την κατάσταση των συσσωρευτών

Από τις μετρήσεις γίνεται εμφανές ότι όσο πιο μικρή τάση έχει την δυνατότητα να παράγει μια μπαταρία, τόσο μεγαλύτερη σύνθετη αντίσταση παρουσιάζει και τόσο μικρότερη χωρητικότητα. Μια αρκετά μικρή χωρητικότητα οφείλεται κυρίως στην παχιά στρώση 'διηλεκτρικού' θειικού άλατος που έχει σχηματιστεί επί των πλακών.

Το εύρος τιμών στο οποίο κυμαίνεται λοιπόν η σύνθετη αντίσταση μιας μπαταρίας, αλλά και η μορφή της καμπύλης της γραφικής της παράστασης ως προς τη συχνότητα, μας πληροφορεί για το βαθμό στον οποίο έχει υποστεί το φαινόμενο της θειίκωσης. Λαμβάνοντας έτσι μετρήσεις σύνθετης αντίστασης σε συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων οδηγούμαστε στον χαρακτηρισμό της κατάστασης ενός συσσωρευτή.

Κεφάλαιο 2. Υλικό μέρος κατασκευής(Hardware)

2.1. Arduino

Το Arduino είναι μία πλατφόρμα με “σχέδιο ανοιχτού κώδικα” (open source project), το οποίο έχει δημιουργηθεί ώστε να λειτουργεί βάσει των δυνατοτήτων του μικροελεγκτή που αποτελεί την εκάστοτε πλατφόρμα. Η οικογένεια μικροελεγκτών είναι ATmega της εταιρείας Atmel και όλα τα σχέδια και το απαραίτητο λογισμικό για τη λειτουργία του διανέμονται δωρεάν, ώστε η υλοποίηση να είναι εφικτή από όποιον το επιθυμεί. Μπορεί να προγραμματιστεί ώστε να δέχεται από το περιβάλλον δεδομένα στις εισόδους του, δηλαδή αναλογικά και ψηφιακά σήματα, να τα επεξεργάζεται και ανάλογα με την έξοδο, μπορεί να ελέγξει διάφορες συσκευές και να χρησιμοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Επίσης, για το Arduino έχουν κυκλοφορήσει διάφορα Arduino Shields τα οποία είναι εξαρτήματα που συνδέονται απ’ ευθείας με όλα τα pin του και επεκτείνουν σημαντικά τις λειτουργίες του.

Για την παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η πλακέτα Arduino Uno. Υπάρχει δυνατότητα επιλογής από πλήθος πλακετών Arduino που αναφέρονται στη συνέχεια, με βάση τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής:

- Arduino Uno
- ArduinoDuemilanove
- ArduinoDiecimila
- Arduino Leonardo
- Arduino Extreme
- Arduino Bluetooth
- Arduino Serial
- Arduino Mega
- Arduino Mini
- Arduino Nano
- ArduinoLilypad

- Arduino Due
- Arduino Pro
- ArduinoFio

2.2. Arduino Uno

Το ArduinoUno είναι βασισμένο στον μικροελεγκτή ATmega328P. Διαθέτει 14 ψηφιακά pins και 6 αναλογικά. Επίσης, διαθέτει σειριακό interface και κρυσταλλικό ταλαντωτή συχνότητας 16MHz. Ο μικροελεγκτής ATmega υποστηρίζει σειριακή επικοινωνία, την οποία το Arduino προωθεί μέσα από έναν ελεγκτή Serial-over-USB, ώστε να συνδέεται με τον υπολογιστή μέσω USB. Τροφοδοτείται μέσω σύνδεσης USB από κάποιον υπολογιστή ή μέσω εξωτερικής τροφοδοσίας από κάποιον μετασχηματιστή ή από μπαταρία. Για τη σωστή λειτουργία του, η επιθυμητή τροφοδοσία πρέπει να είναι από 7 έως 12V.

Name	Processor	Operating/Input Voltage	CPU Speed	Analog In/Out	Digital IO/PWM	EEPROM [kB]	SRAM [kB]	Flash [kB]	USB	UART
Uno	ATmega328P	5 V / 7-12 V	16 MHz	6/0	14/6	1	2	32	Regular	1

Εικόνα 8.Βασικά χαρακτηριστικά Arduino Uno [6].



Εικόνα 9. Arduino Uno [7].

2.2.1. Ακροδέκτες

- Στην πάνω πλευρά του Arduino Uno βρίσκονται 12 ψηφιακοί ακροδέκτες (Pins) εισόδου/εξόδου, αριθμημένοι από το 2 έως το 13. Λειτουργούν στα 5V και έχουν τη δυνατότητα να δεχτούν ή να παρέχουν τάση μέχρι 40 mA. Οι ακροδέκτες αυτοί μπορούν να τεθούν ως είσοδοι ή έξοδοι μέσα από το προγραμματιστικό περιβάλλον του Arduino. Ένας ψηφιακός ακροδέκτης (pin) μπορεί να είναι σε μια από τις δυο καταστάσεις, ή σε κατάσταση 5V το οποίο ονομάζουμε HIGH, ή σε κατάσταση 0V, το οποίο ονομάζουμε LOW.
- Οι ακροδέκτες 0 και 1 χρησιμοποιούνται για τη σειριακή επικοινωνία. Το Arduino μπορεί και στέλνει ή δέχεται δεδομένα μέσα από τη θύρα του usb (ελεγκτής serial over usb) και μέσα από τους ακροδέκτες 0 (RX) και 1 (TX). Ο ακροδέκτης 0 (RX) είναι για τη λήψη δεδομένων προς το Arduino και ο ακροδέκτης 1 (TX) είναι για την αποστολή δεδομένων από αυτό. Επίσης, υπάρχουν δύο μικρά LED πάνω στην πλακέτα με την επωνυμία RX και TX τα οποία αναβοσβήνουν όταν το Arduino δέχεται ή στέλνει δεδομένα αντίστοιχα, δίνοντάς μας οπτική επιβεβαίωση της σειριακής επικοινωνίας.
- Οι ακροδέκτες 2 και 3 μπορούν να λειτουργήσουν και ως εξωτερικοί διακόπτες (interrupt). Σαν διακόπτες μπορούν να διακόψουν την κανονική ροή του προγράμματος, όταν ανιχνευτεί αλλαγή στην κατάστασή τους και να εκτελεστεί μια σειρά από εντολές. Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν απαιτείται συγχρονισμός ακριβείας.
- Οι ακροδέκτες 3,5,6,9,10,11 μπορούν να λειτουργήσουν και ως αναλογικές έξοδοι με το σύστημα PWM ή αναλυτικότερα pulse width modulation (διαμόρφωση διάρκειας παλμών).
- Στον ακροδέκτη 13 είναι συνδεδεμένο ένα LED ενσωματωμένο στο Arduino. Όταν το pin είναι σε κατάσταση HIGH το LED ανάβει και όταν είναι LOW σβήνει.

- Το Uno διαθέτει 6 αναλογικές εισόδους A0-A5 με 10 bit ανάλυσης δηλαδή 1024 διαφορετικές τιμές. Κανονικά μετράνε από 0 έως 5 V αλλά είναι δυνατό να μεταβληθεί το άνω άκρο μέσω του ακροδέκτη AREF και της συνάρτησης `analogReference()`. Ο AREF είναι ένας ακροδέκτης που δίνει την τροφοδοσία αναφοράς. Η κύρια λειτουργία των αναλογικών ακροδεκτών είναι να διαβάζουν αναλογικά σήματα αλλά επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως ψηφιακοί.

2.2.2. Μνήμη

Ο μικροεπεξεργαστής ATmega328P έχει τρεις ομάδες μνήμης. Διαθέτει flash memory, στην οποία αποθηκεύονται τα προγράμματα Arduino, SRAM (static random access memory), στην οποία δημιουργείται το sketch και χρησιμοποιεί τις μεταβλητές όταν τρέχει, και EEPROM, η οποία χρησιμοποιείται από τους προγραμματιστές για την αποθήκευση μακροχρόνιων πληροφοριών.

1KB μνήμης EEPROM: Χρησιμοποιείται για τις εγγραφές ή τις αναγνώσεις δεδομένων από τα προγράμματα. Με την απώλεια τροφοδοσίας ή επανεκκίνησης τα περιεχόμενα δεν χάνονται.

2KB μνήμης SRAM: Η SRAM είναι η ωφέλιμη μνήμη που χρησιμοποιείται από τα προγράμματα για την αποθήκευση μεταβλητών, πινάκων κ.α. Η μνήμη χάνει τα δεδομένα της όταν σταματήσει η παροχή ρεύματος στο Arduino ή όταν πατηθεί το κουμπί επανεκκίνησης.

32KB μνήμης Flash: 2 KB χρησιμοποιούνται από το firmware (το λογισμικό της συσκευής γραμμένο σε γλώσσα μηχανής) του Arduino που έχει εγκαταστήσει ήδη ο κατασκευαστής του. Το firmware είναι αναγκαίο για την εγκατάσταση προγραμμάτων στο μικροελεγκτή μέσω της θύρας USB. Τα υπόλοιπα 30KB της μνήμης Flash χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση αυτών ακριβώς των προγραμμάτων, αφού πρώτα μεταγλωττιστούν στον υπολογιστή. Η μνήμη Flash, δεν χάνει τα περιεχόμενά της με απώλεια τροφοδοσίας ή επανεκκίνησης.

2.2.3. Λογισμικό

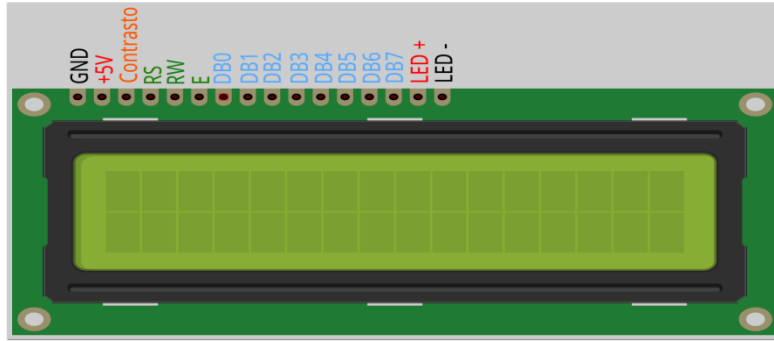
Η πλακέτα του Arduino βασίζεται σε έναν AVR μικροελεγκτή. Το λογισμικό, επομένως, μπορεί να γραφτεί σε οποιαδήποτε γλώσσα προγραμματισμού με ένα μεταγλωττιστή (compiler) που παράγει δυαδικό κώδικα μηχανής. Παρόλα αυτά, το Arduino παρέχει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (Integrated Development Environment – IDE), η οποία είναι μία cross-platform εφαρμογή γραμμένη σε Java.

Το ArduinoIDE υποστηρίζει τις γλώσσες προγραμματισμού C/C++ με τη χρήση ειδικών κανόνων οργάνωσης κώδικα. Το ArduinoIDE παρέχει μια βιβλιοθήκη λογισμικού που ονομάζεται Wiring, από το ομώνυμο project, η οποία παρέχει πολλές κοινές διαδικασίες εισόδου και εξόδου. Ένα τυπικό Arduino C / C ++ πρόγραμμα αποτελείται από δύο συναρτήσεις που καταρτίζονται και συνδέονται σε μία κύρια συνάρτηση main():

- setup(): μια συνάρτηση που εκτελείται μία φορά κατά την έναρξη του προγράμματος και προετοιμάζει τις ρυθμίσεις.
- loop(): μια συνάρτηση η οποία εκτελείται συνεχώς μέχρι τη διακοπή της τροφοδοσίας της πλακέτας. Η φόρτωση του λογισμικού στο Arduino γίνεται από τον υπολογιστή μέσω της USB θύρας που διαθέτει η πλακέτα.

2.3. Οθόνη LCD

Η οθόνη LCD που επιλέχθηκε είναι τύπου HitachiHD44780, 16 χαρακτήρων και 2 γραμμών με πράσινο φόντο και μαύρους χαρακτήρες. Λειτουργεί με τροφοδοσία 5V και παρέχει τη δυνατότητα ρύθμισης της αντίθεσης.



Εικόνα 10.Οθόνη LCD 16x2

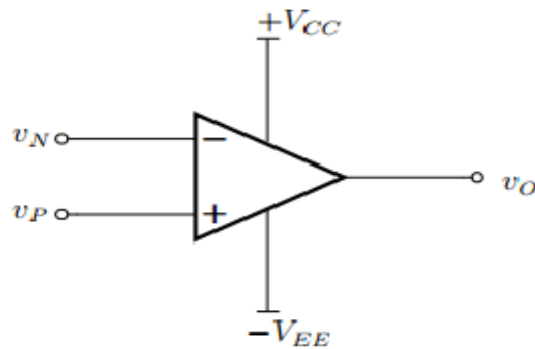
Η ορθή επικοινωνία οθόνης – Arduino επιτυγχάνεται μέσω των παρακάτω συνδέσεων:

Arduino Uno	LCD screen
2	D7
3	D6
4	D5
5	D4
~6	Vo (contrast)
5v	VDD
GND	Vcc, RW, LED-
9	LED+
11	E (enable)
12	RS (Register Select)

2.4. Ηλεκτρονικά υλικά

Τελεστικοί ενισχυτές

Ενισχυτής ονομάζεται η ηλεκτρική ή ηλεκτρονική συσκευή που ενισχύει το ηλεκτρικό σήμα. Ο τελεστικός ενισχυτής είναι ένας ενισχυτής τάσης με πολύ μεγάλο κέρδος που αποτελεί το βασικό δομικό στοιχείο σε πληθώρα αναλογικών εφαρμογών [2].



Εικόνα 11. Το σχηματικό του τελεστικού ενισχυτή.

Η κύρια λειτουργία του είναι να ενισχύει τη διαφορά δυναμικού μεταξύ V_p (positive) και V_n (negative) η οποία ορίζεται ως $V_d = V_p - V_n$ και ονομάζεται διαφορική τάση εισόδου. Έτσι η έξοδος του τελεστικού ενισχυτή είναι ίση με $V_o = a \cdot V_d = a \cdot (V_p - V_n)$ όπου με a συμβολίζεται το κέρδος του τελεστικού ενισχυτή. Φυσικά η έξοδος του δεν μπορεί να ξεπεράσει τα όρια που θέτουν οι τάσεις τροφοδοσίας $+V_{CC}$ και $-V_{EE}$.

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας είναι το AD823 της εταιρίας Analog Devices, καθώς διαθέτει υψηλό δείκτη slew rate $22 \text{ V}/\mu\text{s}$, υποστηρίζει τη λειτουργία μονής τροφοδοσίας και απαιτεί αρκετά μικρό ρεύμα στην είσοδο, της τάξης των $25 \mu\text{A}$ (JFET-input).

Δίοδοι Schottky

Οι δίοδοι Schottky επιλέχθηκαν έναντι απλών διόδων, διότι έχουν την δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλότερη συχνότητα, εμφανίζοντας μικρότερη πτώση τάσης.

Λογικές πύλες AND

7408 της εταιρίας Texas Instruments δύο εισόδων, τεσσάρων καναλιών.

Y = AB

Inputs		Output
A	B	Y
L	L	L
L	H	L
H	L	L
H	H	H

Εικόνα 12.Η Δυαδική λογική AND

Κεφάλαιο 3. Περιγραφή και ανάλυση της κατασκευής

3.1. Βασική δομή

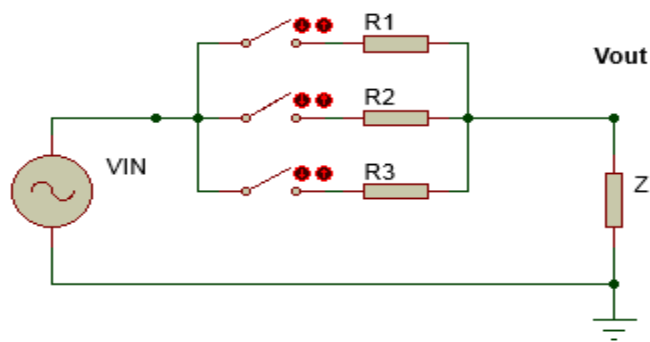
Το πρώτο στάδιο του κυκλώματος είναι ο διαιρέτης τάσης της εικόνας 13. Η τάση εισόδου V_{in} ημιτονικής μορφής πλάτους 5V και μεταβλητής συχνότητας, παρέχεται από τη γεννήτρια συχνοτήτων. Μέσω των διακοπών, επιλέγεται κάθε φορά μία αντίσταση από την σειρά αντιστάσεων με τιμές 200, 820 και 6600 Ω , ώστε να κλείσει το κύκλωμα μέσω της αντίστασης Z της μπαταρίας. Κατά την έναυση της λειτουργίας, μόνο ο διακόπτης της αντίστασης 200 Ω πρέπει να είναι κλειστός, ενώ με τεχνική που θα εξηγηθεί σε επόμενη παράγραφο, το κύκλωμα ζητά από τον χρήστη μέσω της οθόνης να κλείσει τον κατάλληλο διακόπτη, η αντίσταση του οποίου θα είναι και η πλησιέστερη στην αντίσταση της μπαταρίας, ώστε να επιτευχθεί ακριβέστερη μέτρηση.

Ακολουθεί η ανάλυση του κυκλώματος με βάση την οποία εξαγάγουμε την τιμή της σύνθετης αντίστασης Z . Με R συμβολίζεται η οποιαδήποτε αντίσταση έχει επιλεγθεί από τις R_1, R_2, R_3 . Επιπλέον, Z, V_{in} και V_{out} είναι μιαδικοί αριθμοί.

$$V_{out} = V_{in} \frac{Z}{Z+R} \Leftrightarrow \frac{Z+R}{Z} = \frac{V_{in}}{V_{out}} \Leftrightarrow \frac{R}{Z} = \frac{V_{in}}{V_{out}} - 1 \Leftrightarrow Z = \frac{R}{\frac{V_{in}}{V_{out}} - 1}$$

$$\Leftrightarrow Z = R \frac{V_{out}}{V_{in} - V_{out}} \quad (1)$$

Είναι προφανές ότι για να προσδιοριστεί το μέτρο και η γωνία της αντίστασης Z , χρειάζονται ως δεδομένα το μέτρο της τάσης V_{out} και η διαφορά φάσης της με την τάση εισόδου, εφόσον η τάση εισόδου είναι η τάση αναφοράς $5\angle 0^\circ$ (V). Στις επόμενες παραγράφους αναλύονται οι τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν, ώστε η υπολογιστική πλατφόρμα να είναι σε θέση να «αντιλαμβάνεται» τα ζητούμενα αυτά.



Εικόνα 13. Σχηματικό διάγραμμα

3.2. Μέθοδοι υπολογισμού των βασικών ζητουμένων

➤ Υπολογισμός μέτρου τάσης εξόδου

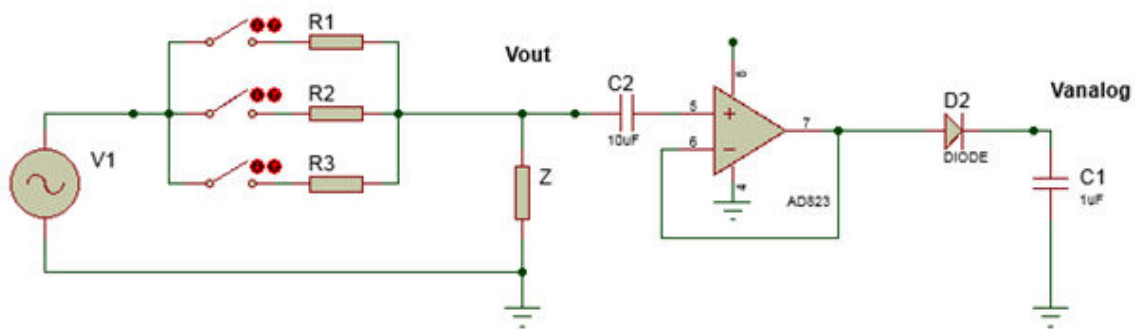
Το Arduino δεν παρέχει την δυνατότητα απευθείας ανάγνωσης ημιτονικής κυματομορφής. Για την μέτρηση του πλάτους της διαφοράς δυναμικού στα άκρα του φορτίου Z (στην ηλεκτρική ανάλυση αντιμετωπίζουμε την αντίσταση της μπαταρίας ως φορτίο), χρησιμοποιείται τεχνική ημιανόρθωσης, στην έξοδο της οποίας προκύπτει η σταθερή τιμή του, έτοιμη να συνδεθεί σε αναλογική είσοδο της υπολογιστικής πλατφόρμας.

Η εξομάλυνση της ημιανορθωμένης τάσης επιτυγχάνεται τοποθετώντας πυκνωτή ως φίλτρο εξόδου. Η τιμή του πυκνωτή $1\mu\text{F}$ είναι κατάλληλη για την δραστική μείωση της κυμάτωσης στις συχνότητες λειτουργίας της διάταξης.

Πριν από την ανόρθωση, το σήμα περνάει από απομονωτή (buffer), ώστε η αντίδραση του πυκνωτή (σημαντική στις υψηλές συχνότητες) να μην μεταβάλλει την σύνθετη αντίσταση του φορτίου. Ο απομονωτής κατασκευάζεται πολύ εύκολα συνδέοντας την αρνητική είσοδο του τελεστικού ενισχυτή με την έξοδο, ενώ την θετική του είσοδο με το σήμα εισόδου (Σχήμα 14). Επειδή ο τελεστικός ενισχυτής είναι μονής τροφοδοσίας, στην έξοδό του θα περνάει μόνο το

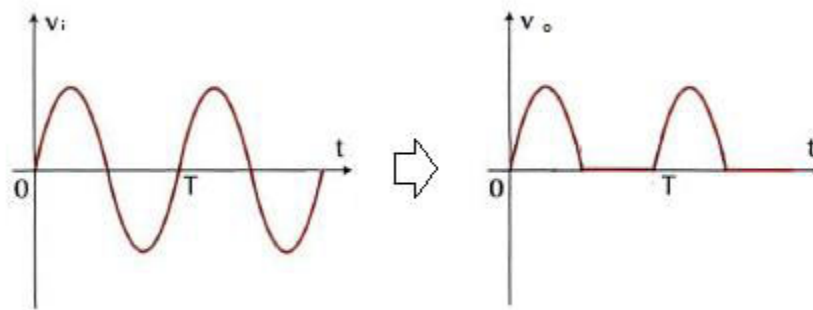
θετικό μέρος του σήματος, που σημαίνει ότι το σήμα ημιανορθώνεται μέσω του απομονωτή. Η διόδος είναι ωστόσο απαραίτητη, διότι ο πυκνωτής εξομάλυνσης δεν μπορεί να συνδεθεί απ' ευθείας στην έξοδο του τελεστικού ενισχυτή.

Το τελικό σήμα που προκύπτει στην έξοδο της διάταξης αποτελεί τη σταθερή τιμή του πλάτους της ημιτονικής τάσης φορτίου (δηλαδή το μέτρο της) μειωμένη κατά την τιμή πτώσης τάσεως της διόδου.



Εικόνα 14. Σχηματικό διάγραμμα

Ο πυκνωτής C2 της εικόνας 14 μπλοκάρει την DC συνιστώσα της τάσης στην είσοδο του ενισχυτή, την οποία δημιουργεί ο συσσωρευτής (σχηματικά θα ήταν μια πηγή τάσης σε σειρά με το φορτίο).



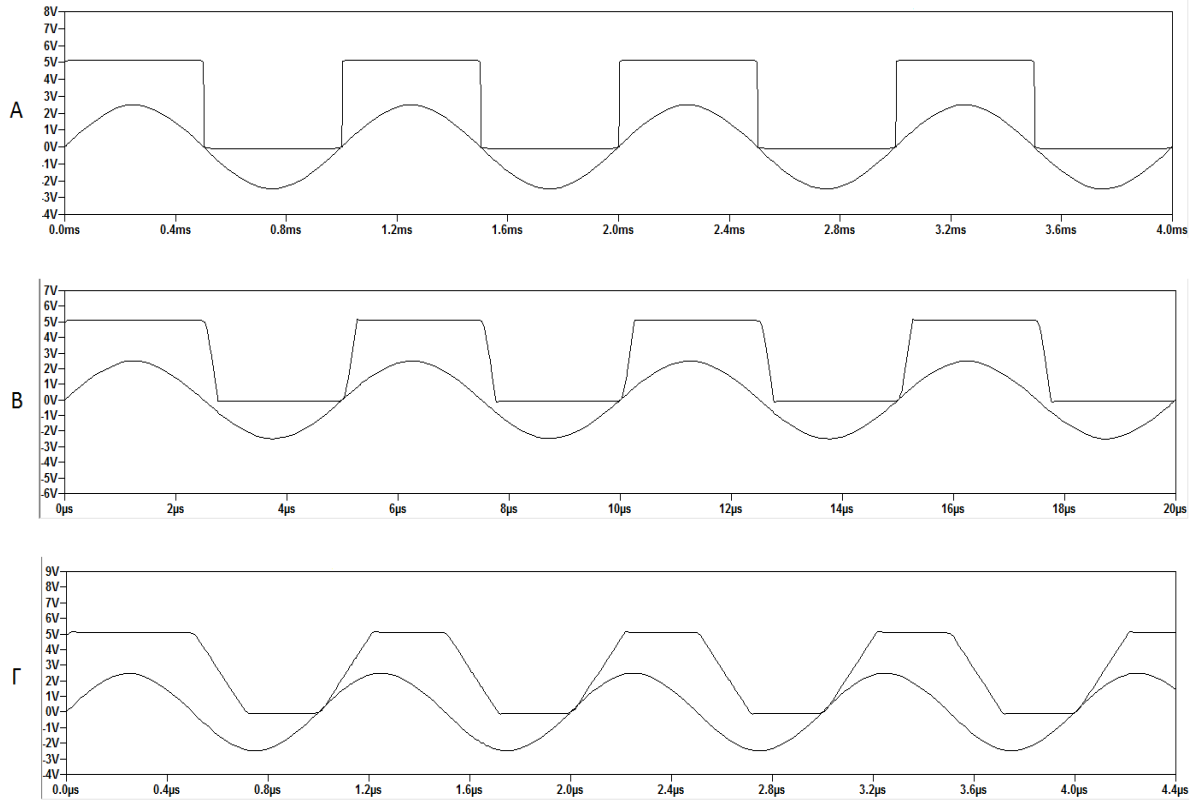
Εικόνα 15. Κυματομορφές πριν και μετά την ημιανόρθωση.



Εικόνα 16. Εξομάλυνση ημιανορθωμένης τάσης για διαφορετικούς πυκνωτές.

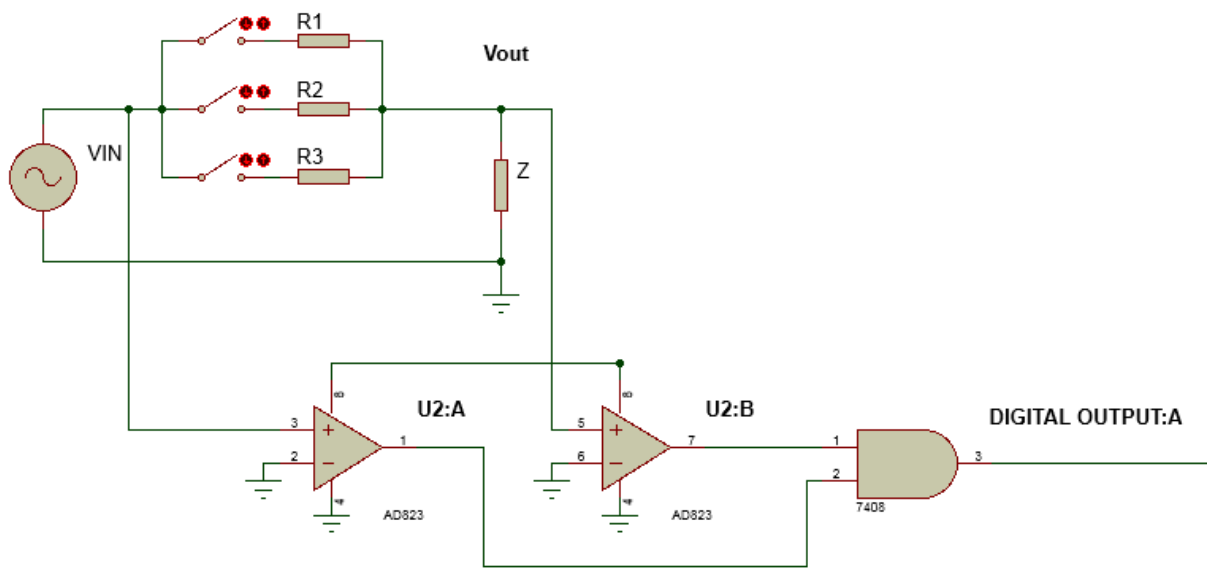
➤ Υπολογισμός διαφοράς φάσης τάσεων εισόδου – εξόδου.

Οι κυματομορφές και των δύο τάσεων οδηγούνται σε συγκριτές τάσης οι οποίοι έχουν ως αναφορά τη γείωση. Οι συγκριτές είναι τελεστικοί ενισχυτές με την αρνητική τους είσοδο συνδεδεμένη στη γείωση. Όταν το σήμα στην θετική τους είσοδο είναι μεγαλύτερο του μηδενός, η έξοδος οδηγείται στην θετική τάση κορεσμού, δηλαδή στη μέγιστη θετική τάση που μπορεί να δώσει ο ενισχυτής, πλησίον στην τάση τροφοδοσίας. Όταν το σήμα είναι αρνητικό, η έξοδος οδηγείται αντίστοιχα στην αρνητική τάση κορεσμού, η οποία όμως είναι μηδενική διότι ο ενισχυτής χρησιμοποιείται ως μονής τροφοδοσίας (ο αρνητικός ζυγός είναι γειωμένος). Οι συγκριτές λειτουργούν ικανοποιητικά σε χαμηλές συχνότητες. Σε υψηλές συχνότητες ωστόσο, παρουσιάζουν καθυστέρηση κατά την μετάβαση από τη μία κατάσταση κορεσμού στην άλλη. Ο δείκτης *slew rate* δείχνει το μέγεθος της καθυστέρησης, αναγράφεται φυσικά στο φύλλο δεδομένων (22V/μs για τον AD823) και έχει καθοριστική σημασία για τις δυνατότητες της κατασκευής [8].



Εικόνα 17. Καθυστέρηση του AD823 στη σύγκριση ημιτονικής τάσης με τη μηδενική σε συχνότητες Α) 1kHz, Β) 200 kHz, Γ) 1 MHz

Μέσω της σύγκρισης, απόημιτονικές κυματομορφές δημιουργούνται τετραγωνικές. Στη συνέχεια, τα δύο τετραγωνικά πλέον σήματα οδηγούνται στις εισόδους της ίδιας λογικής πύλης AND.



Εικόνα 18. Σχηματικό διάγραμμα

Το Arduino έχει τη δυνατότητα να μετρήσει το χρόνο που μια ψηφιακή είσοδος του παραμένει σε μία κατάσταση (HIGH ή LOW). Συνεπώς, η μέτρηση της εξόδου ενός συγκριτή, δίνει ως αποτέλεσμα την ημιπερίοδο του αναλογικού σήματος στην είσοδό του. Η συχνότητα στην οποία η διάταξη λειτουργεί (συχνότητα γεννήτριας) προκύπτει μετά από υπολογισμούς που εκτελούνται στον επεξεργαστή, πιο συγκεκριμένα, με πολλαπλασιασμό επί δύο και αντιστροφή. Η μέτρηση της εξόδου της πύλης AND, εάν αφαιρεθεί από την ημιπερίοδο, δίνει τη χρονική διαφορά μεταξύ τάσης πηγής (εισόδου) και τάσης φορτίου (εξόδου). Η επιθυμητή διαφορά φάσης τους υπολογίζεται από τον τύπο:

$$d\phi = 180 - 360 * f * dt \quad (2)$$

όπου:

$d\phi$ = διαφορά φάσης (μοίρες)

f = συχνότητα (Hz)

dt = χρονική διαφορά (s)

3.3. Συνδυασμός αποτελεσμάτων

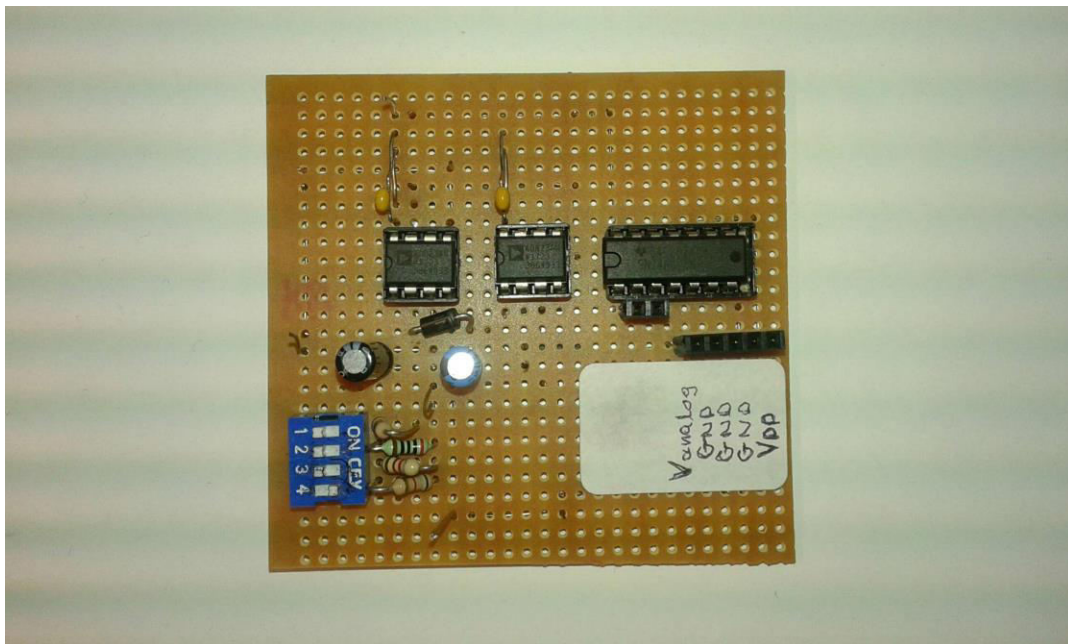
Η τάση φορτίου V_{out} είναι πλέον γνωστή και μπορεί να εκφραστεί ως μιγαδικός αριθμός σύμφωνα με την εξίσωση του Euler $e^{ix} = \cos x + i \sin x$, ως εξής:

$$V_{out} = |V_{out}| \angle \phi = |V_{out}| \cos \phi + i |V_{out}| \sin \phi \quad (3)$$

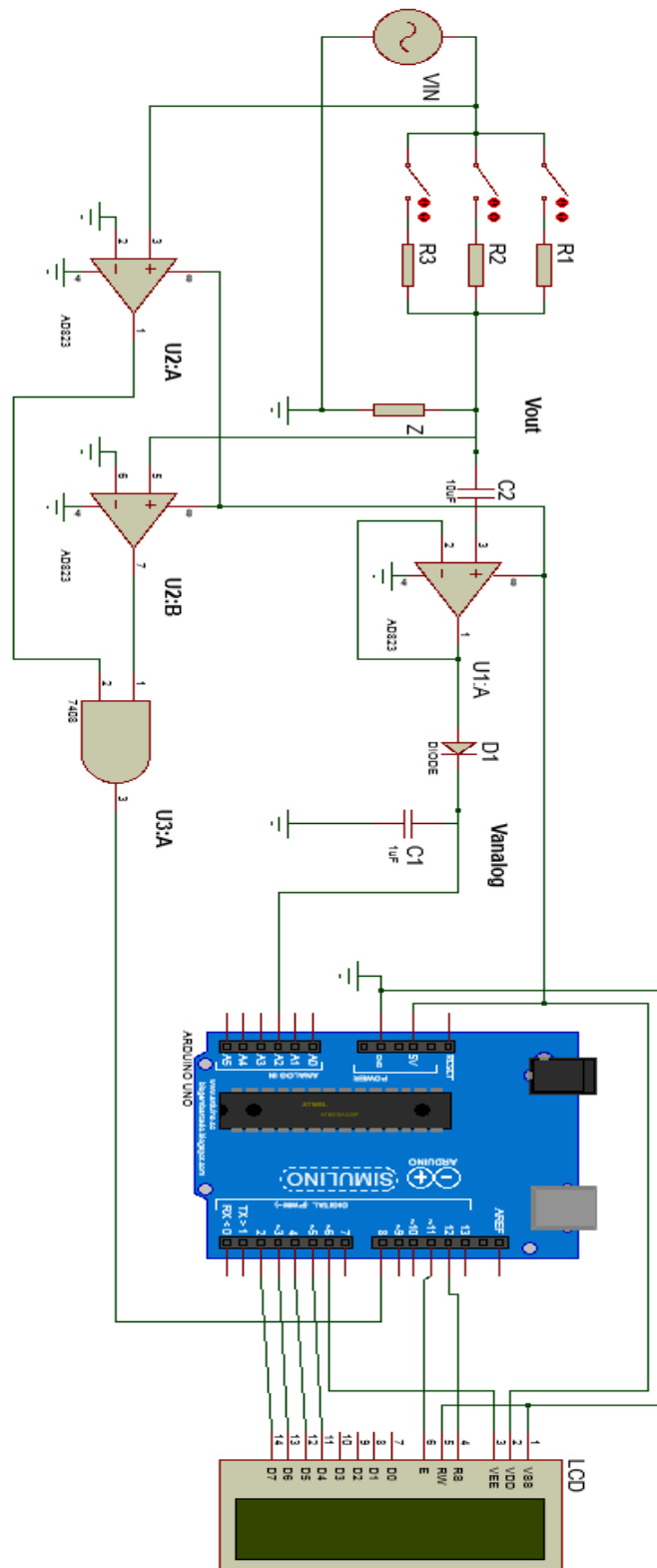
Η σύνθετη αντίσταση τελικά προκύπτει από τη σχέσεις (1), (3):

$$Z = R \frac{V_{out}}{V_{in} - V_{out}} = R \frac{|V_{out}| \cos \phi + i |V_{out}| \sin \phi}{5 - |V_{out}| \cos \phi - i |V_{out}| \sin \phi} \quad (4)$$

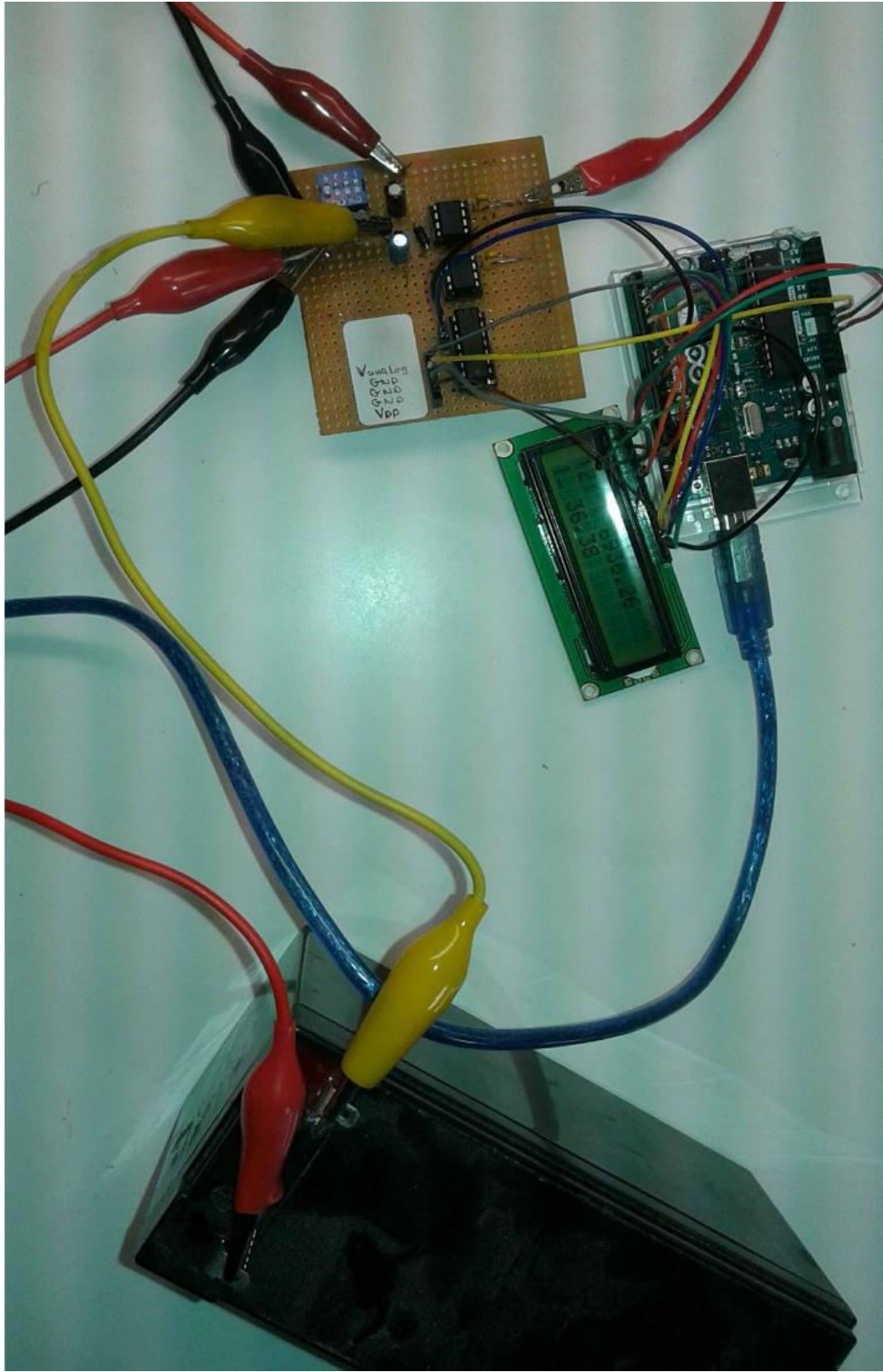
Η εκτέλεση των υπολογισμών γίνεται στον επεξεργαστή. Ακολουθεί το σχέδιο του συνολικού κυκλώματος.



Εικόνα 19. Κάτοψη της κατασκευής



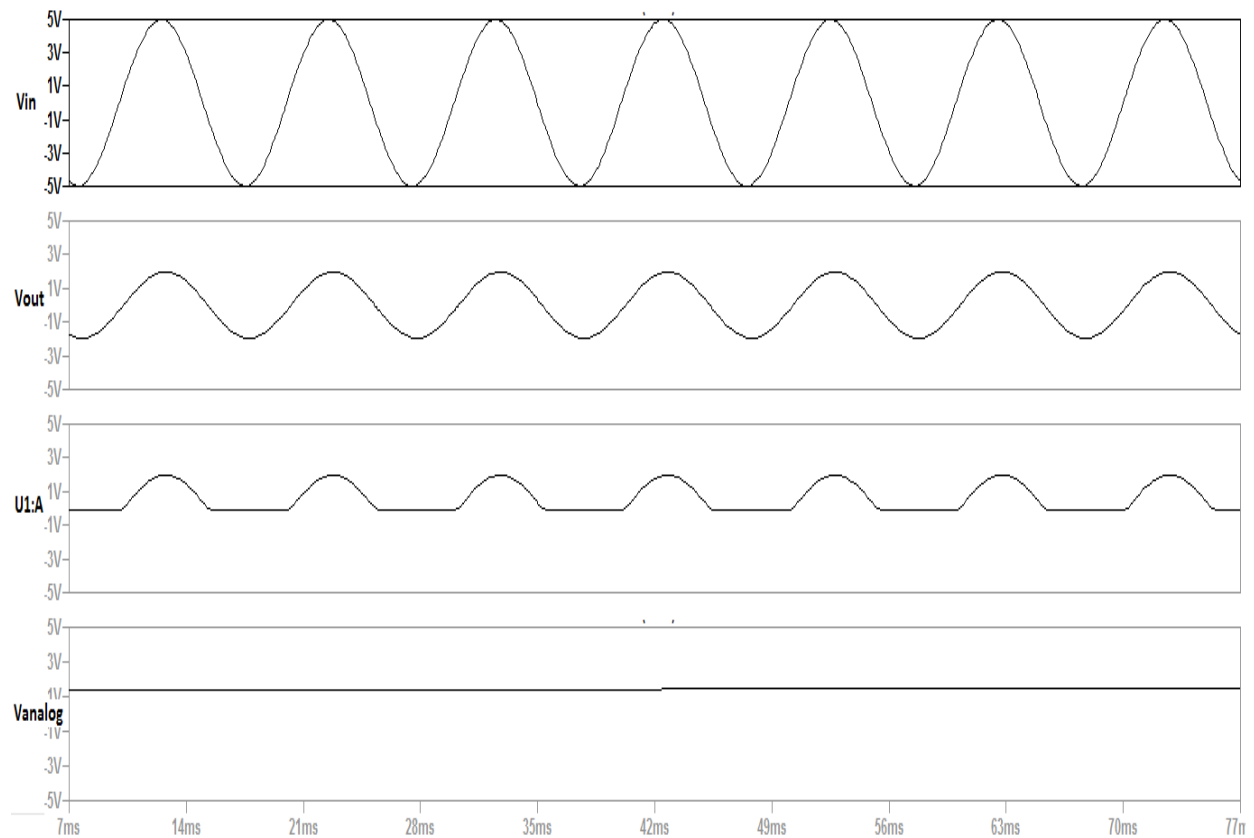
Εικόνα 20. Το τελικό σχηματικό διάγραμμα της κατασκευής.



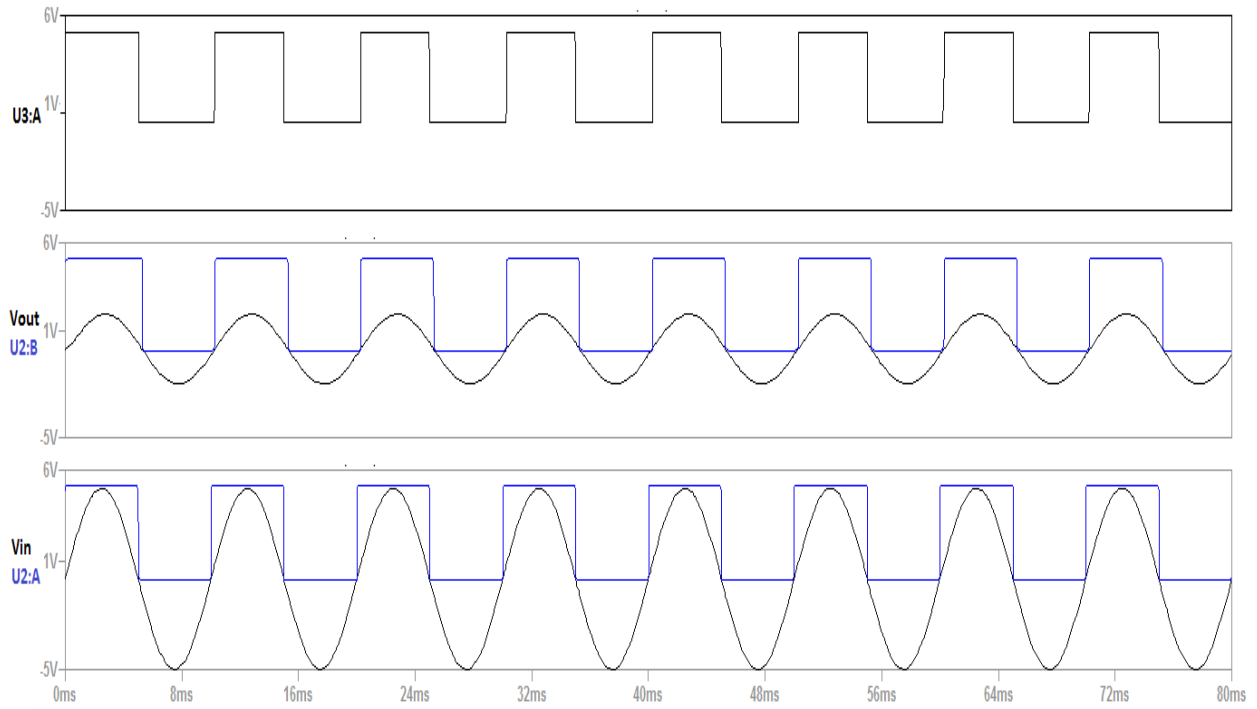
Εικόνα 21. Η τελική διάταξη σε λειτουργία.

3.4. Προσομοίωση

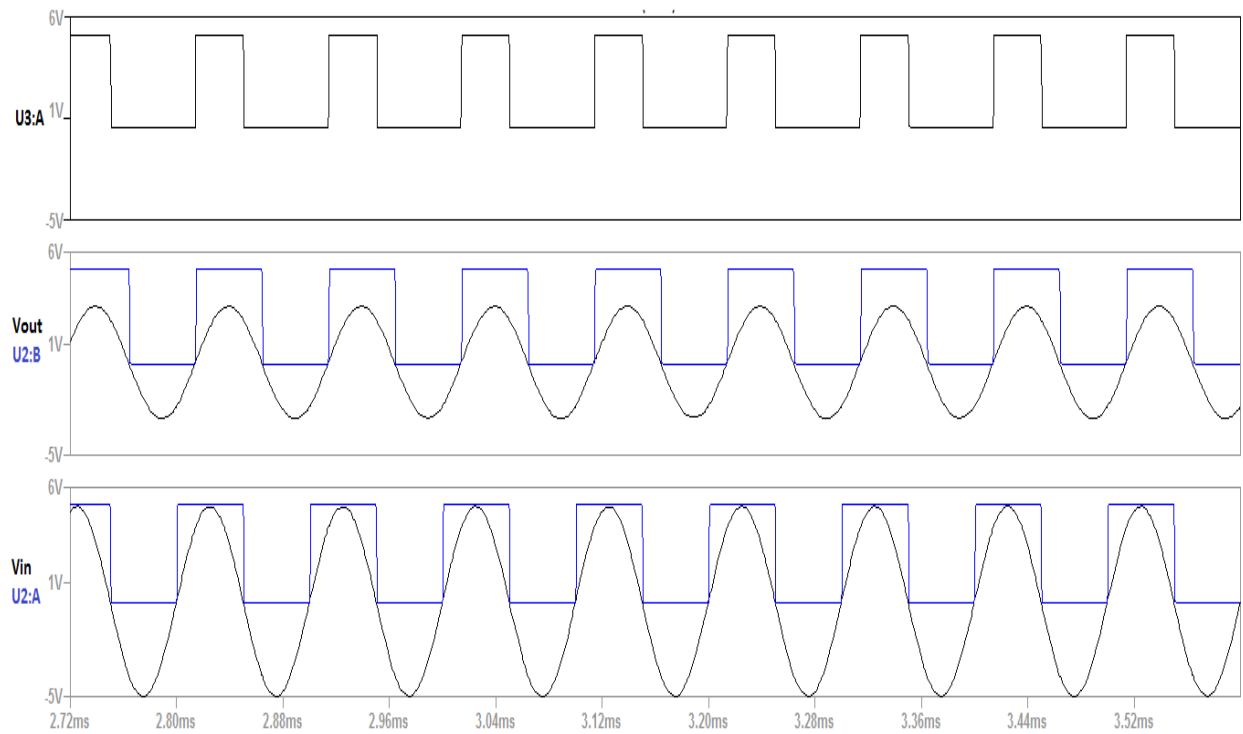
Στην προσομοίωση που ακολουθεί έχει επιλεγθεί ως φορτίο ηλεκτρικό μοντέλο συσσωρευτή με αντίσταση τυχαίας τιμής $4.4\text{k}\Omega$, παράλληλη σε πυκνωτή χωρητικότητας $0.1\mu\text{F}$. Οι συχνότητες λειτουργίας επιλέγονται Α) 100Hz , Β) 10kHz και Γ) 50kHz . Οι επιλεγμένες αντιστάσεις από τη σειρά αντιστάσεων είναι αντίστοιχα 6600 , 200 και $200\ \Omega$. Οποιαδήποτε τιμή DC συνιστώσας του συσσωρευτή, δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα, καθώς μπλοκάρεται από τον πυκνωτή στην είσοδο του τελεστικού ενισχυτή. Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα LTSPICE.



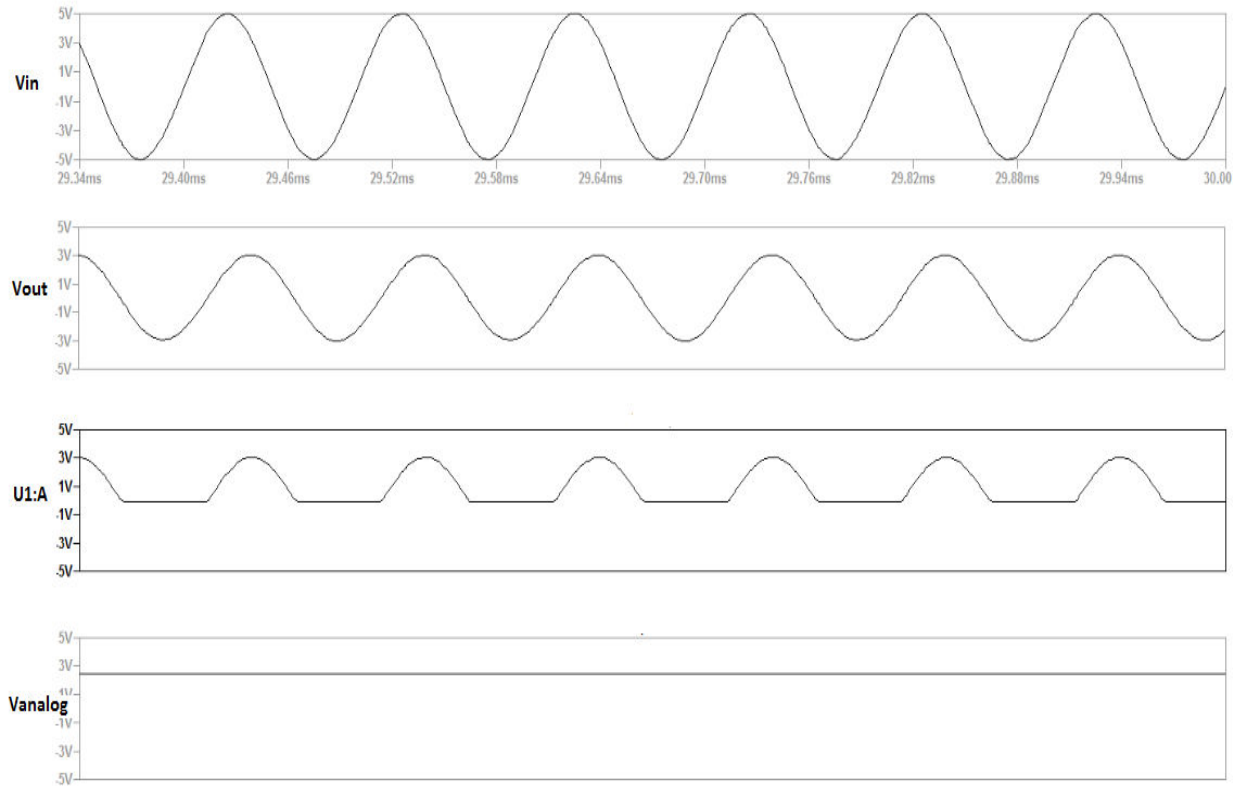
Εικόνα 22. Κυματομορφές τάσεων του κυκλώματος που οδηγεί στον υπολογισμό του μέτρου τάσης εξόδου για την περίπτωση Α.



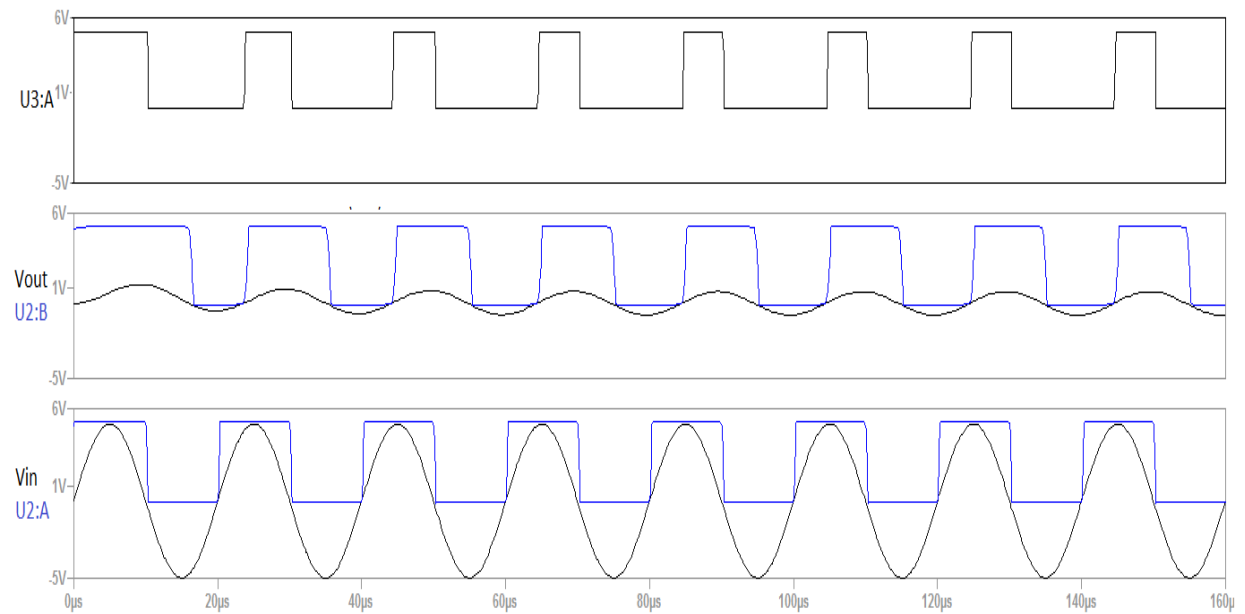
Εικόνα 23. Κυματομορφές τάσεων του κυκλώματος που οδηγεί στον υπολογισμό της διαφοράς φάσης τάσεων εισόδου-εξόδου για την περίπτωση Α.



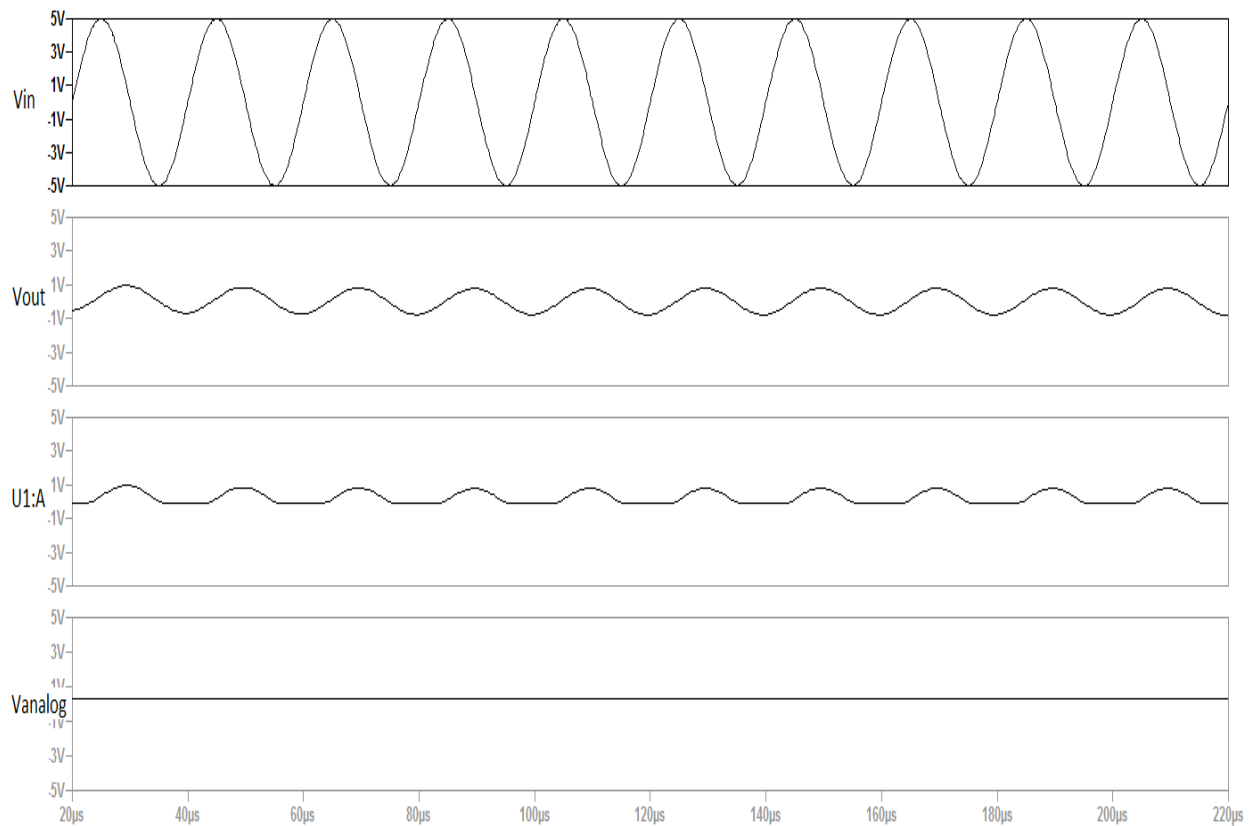
Εικόνα 24. Κυματομορφές τάσεων του κυκλώματος που οδηγεί στον υπολογισμό της διαφοράς φάσης τάσεων εισόδου-εξόδου για την περίπτωση Β.



Εικόνα 25. Κυματομορφές τάσεων του κυκλώματος που οδηγεί στον υπολογισμό του μέτρου τάσης εξόδου για την περίπτωση Β.



Εικόνα 26. Κυματομορφές τάσεων του κυκλώματος που οδηγεί στον υπολογισμό της διαφοράς φάσης τάσεων εισόδου-εξόδου για την περίπτωση Γ.



Εικόνα 27. Κυματομορφές τάσεων του κυκλώματος που οδηγεί στον υπολογισμό του μέτρου τάσης εξόδου για την περίπτωση Γ.

3.5. Δομή προγράμματος

Από τη στιγμή που τα σήματα του κυκλώματος συνδεθούν στις εισόδους του Arduino, θα πρέπει να γίνει σωστή διαχείρισή τους ώστε να παραχθεί το τελικό αποτέλεσμα. Η ανάγνωση των εισόδων επιτυγχάνεται μέσω των παρακάτω συναρτήσεων.

`AnalogRead()`: Διαβάζει την τιμή συγκεκριμένης αναλογικής εισόδου. Αντιστοιχεί τάσεις τάξεως 0 – 5 V σε ακέραιο αριθμό 0 – 1023.

`pulseIn()`: Διαβάζει έναν παλμό (είτε λογικό 0, είτε λογικό 1) μιας ψηφιακής εισόδου και επιστρέφει το μήκος του παλμού σε `microseconds` ή 0, εάν δεν ολοκληρωθεί παλμός σε προκαθορισμένο χρόνο ανάγνωσης.

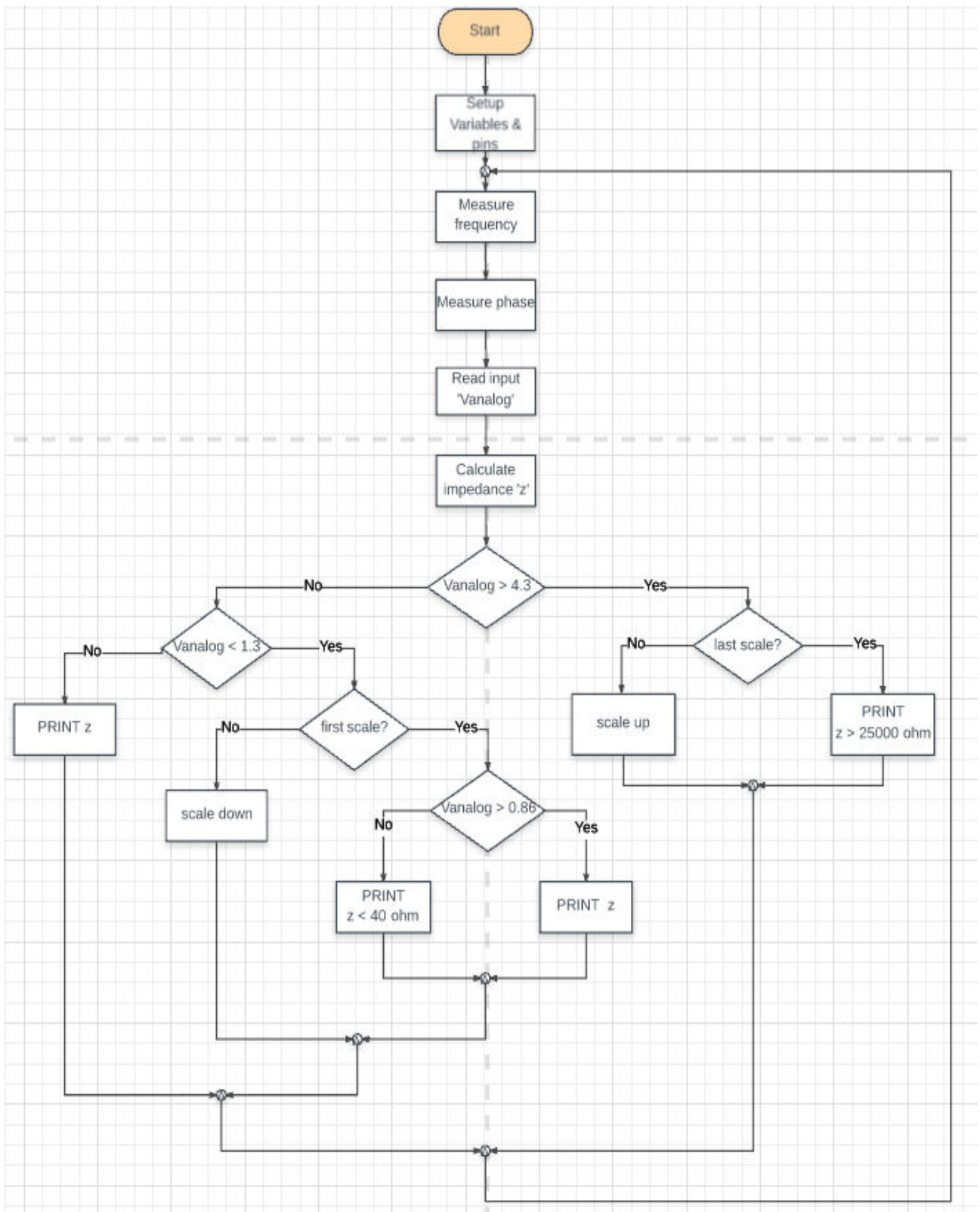
Οι αναγνώσεις που πραγματοποιεί η συνάρτηση `pulseIn` οργανώνονται σε συναρτήσεις στο τέλος του προγράμματος, οι οποίες καλούνται πολλαπλές φορές. Στην συνέχεια υπολογίζεται ο μέσος όρος μετρήσεων. Με τον τρόπο αυτό οι αναγνώσεις γίνονται πιο αξιόπιστες.

Κατά την έναυση της λειτουργίας, πρέπει μόνο η πρώτη αντίσταση των 200Ω να είναι επιλεγμένη. Το Arduino δεν αντιλαμβάνεται μια αλλαγή αντίστασης. Οι τιμές των τριών αντιστάσεων είναι αρχικοποιημένες σε πίνακα στην αρχή του προγράμματος και η πρώτη θέση του πίνακα (200 ohm) είναι προεπιλεγμένη. Στην αναλογική είσοδο τίθενται όρια, ώστε όταν η τάση εξόδου τείνει να λάβει τιμές κοντά στα όρια τροφοδοσίας (0 ή 5V), να εμφανίζεται στον χρήστη μήνυμα αλλαγής κλίμακας αντίστασης για να επιτευχθεί ακριβέστερη μέτρηση. Δίνεται χρονικό περιθώριο στον χρήστη μέσω της συνάρτησης `delay()` για να πραγματοποιήσει την αλλαγή, ενώ η μεταβλητή που δείχνει την τρέχουσα θέση του πίνακα αντιστάσεων ενημερώνεται κατάλληλα, ώστε στο Arduino να χρησιμοποιείται κάθε στιγμή η τιμή αντίστασης που είναι επιλεγμένη στο κύκλωμα.

Η κατασκευή έχει την δυνατότητα μέτρησης σύνθετων αντιστάσεων εύρους 40Ω έως 25kΩ. Όταν η μετρούμενη αντίσταση έχει τιμή εκτός των ορίων αυτών εμφανίζεται κατάλληλο μήνυμα στην οθόνη. Οι τιμές των ορίων της αναλογικής εισόδου έχουν υπολογιστεί πειραματικά και παρουσιάζουν μικρή απόκλιση από τις θεωρητικές τιμές που προκύπτουν από τον διαιρέτη τάσης του σχήματος 13. Το κατώτατο όριο διαφοροποιείται μόνο για την αντίσταση των 200Ω, ώστε να επιτευχθεί μέτρηση σε μεγαλύτερο εύρος.

Η πτώση τάσης της διόδου εξαρτάται από το ρεύμα που διέρχεται από την έξοδο του τελεστικού ενισχυτή, το οποίο αν και πολύ μικρό, είναι διαφορετικό για κάθε κλίμακα και υπολογίζεται πειραματικά για κάθε περίπτωση.

Για συχνότητες άνω των 50 kHz, τα σφάλματα που προκύπτουν είναι σημαντικά. Για παράδειγμα, το Arduino μπορεί να διαβάσει τη συχνότητα 80 kHz με μεγάλη απόκλιση, η οποία θα μεταφερθεί μέσω των υπολογισμών στο τελικό αποτέλεσμα. Για την επέκταση της λειτουργίας της κατασκευής σε μεγαλύτερες συχνότητες, χρησιμοποιείται στον κώδικα αυτόματη διόρθωση η οποία στρογγυλοποιεί τις συχνότητες, υπό την προϋπόθεση ότι ο χρήστης επιλέγει αυστηρά 50, 60, 70, 80, 90 ή 100 kHz και όχι ενδιάμεσες τιμές.



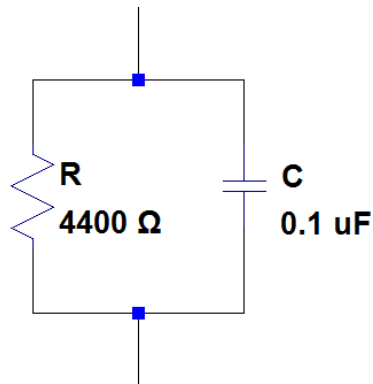
Εικόνα 28. Απλουστευμένο διάγραμμα ροής του προγράμματος.

Κεφάλαιο 4. Πειραματικά αποτελέσματα κατασκευής

4.1. Μετρήσεις και συμπεράσματα

Για τον έλεγχο της απόδοσης του μετρητή που κατασκευάστηκε, χρησιμοποιήθηκαν πέραν των συσσωρευτών, ζεύγη αντιστάσεων και πυκνωτών σε παράλληλη σύνδεση, με σκοπό την προσέγγιση του ηλεκτρικού μοντέλου συσσωρευτή, ώστε οι θεωρητικές τιμές της σύνθετης αντίστασης να μπορούν να υπολογιστούν και να συγκριθούν με τις πρακτικές. Ακολουθούν τα αποτελέσματα οργανωμένα σε πίνακα, ενώ προηγούνται σε κάθε περίπτωση οι τιμές των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν ως φορτίο.

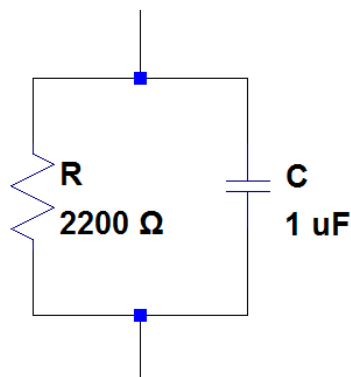
A)



Συχνότητα (Hz)	Εμπέδηση (Ω) (Θεωρητικό αποτέλεσμα)	Εμπέδηση (Ω) (Αποτέλεσμα μέτρησης)
50	4359∠-7.8	4628 ∠ -8.6
100	4241∠-15.4	4477 ∠ -16.9
200	3851∠ -28.9	3965 ∠ -31.1

500	$2579 \angle -54.1$	$2542 \angle -56.3$
1000	$1497 \angle -70.1$	$1497 \angle -73.6$
5000	$318 \angle -85.9$	$320 \angle -87.1$
10000	$159 \angle -87.9$	$149 \angle -85.9$
20000	$80 \angle -88.9$	$79 \angle -87.6$
30000	$53 \angle -89.3$	$56 \angle -89.4$
40000	$40 \angle -89.3$	$44 \angle -90$
50000	$32 \angle -89.6$	< 40

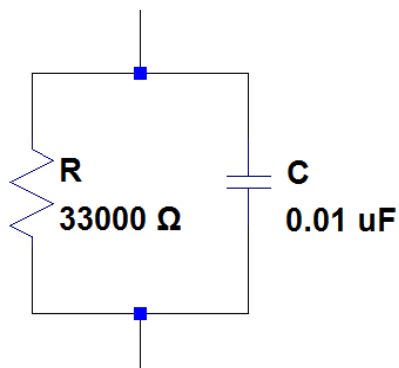
B)



Συχνότητα (Hz)	Εμπέδηση (Ω) (Θεωρητικό αποτέλεσμα)	Εμπέδηση (Ω) (Αποτέλεσμα μέτρησης)
50	$1810 \angle -34.6$	$1919 \angle -38.1$
100	$1290 \angle -54.1$	$1295 \angle -57.3$
200	$749 \angle -70$	$732 \angle -71$
500	$315 \angle -81.8$	$303 \angle -80.5$
1000	$159 \angle -85.9$	$150 \angle -81.6$
5000	$32 \angle -89.2$	< 40

10000	$15.9 \angle -89.6$	< 40
20000	$7.96 \angle -88.8$	< 40
30000	$5.3 \angle -89.7$	< 40
40000	$3.98 \angle -89.9$	< 40
50000	$3.18 \angle -89.9$	< 40

Γ)



Συχνότητα (Hz)	Εμπέδηση (Ω) (Θεωρητικό αποτέλεσμα)	Εμπέδηση (Ω) (Αποτέλεσμα μέτρησης)
50	$32824 \angle -5.9$	>25000
100	$32313 \angle -11.7$	>25000
200	$30485 \angle -22.5$	>25000
500	$22916 \angle -46$	$22503 \angle -46.9$
1000	$14341 \angle -64.2$	$14152 \angle -64.7$
5000	$3170 \angle -84.5$	$3167 \angle -84.9$
10000	$1590 \angle -87.2$	$1595 \angle -83.2$
20000	$796 \angle -88.6$	$807 \angle -87.8$
30000	$531 \angle -89.1$	$540 \angle -87.1$
40000	$399 \angle -89.3$	$404 \angle -90$

50000	318∠ -89.4	336 ∠ -85.9
-------	------------	-------------

Όσον αφορά το μέτρο της εμπέδησης, το μέγιστο σχετικό σφάλμα μέτρησης σημειώθηκε 9.1%, ενώ το κατά μέσο όρο σχετικό σφάλμα υπολογίστηκε 3.1%.

Όσον αφορά τη γωνία, το μέγιστο σχετικό σφάλμα μέτρησης σημειώθηκε 9.3%, ενώ το κατά μέσο όρο σχετικό σφάλμα υπολογίστηκε 3.5%.

Σε μετρήσεις υπό συχνότητα μεγαλύτερη των πενήντα χιλιοκύκλων, παρατηρήθηκε αρκετά μεγάλη απόκλιση του πρακτικού αποτελέσματος της γωνίας από το αναμενόμενο (έως και δέκα μοίρες, λόγω της καθυστέρησης (slew rate) του τελεστικού ενισχυτή (παρ.3.4), ενώ στην ένδειξη του μέτρου το σφάλμα ήταν μικρό.

Σε μετρήσεις υπό συχνότητα μικρότερη των πενήντα κύκλων, το αποτέλεσμα εμφανίζεται στην οθόνη με καθυστέρηση που μεγαλώνει όσο η συχνότητα μειώνεται. Αυτό συμβαίνει λόγω της συνάρτησης που υπολογίζει το μήκος των παλμών. (Για να διαβάσει 100 φορές έναν τετραγωνικό παλμό συχνότητας 10kHz θα χρειαστεί το πολύ 0.01s, αντίστοιχα στα 10kHz θα χρειαστεί το πολύ 10s).

4.2. Προτάσεις και βελτιώσεις

Τα μεγάλα σφάλματα μετρήσεων οφείλονται κυρίως στην ποιότητα ανάγνωσης παλμών και αναλογικών σημάτων που το Arduino παρέχει στις εισόδους του. Η χρήση μιας υπολογιστικής πλατφόρμας καλύτερων δυνατοτήτων και μεγαλύτερης ταχύτητας μπορεί να βελτιώσει την αξιοπιστία και την ακρίβεια των μετρήσεων ακόμα και σε συχνότητες μεγαλύτερες των 50kHz.

Για την επέκταση της λειτουργίας βέβαια σε μεγαλύτερες συχνότητες, είναι απαραίτητη η αντικατάσταση των τελεστικών ενισχυτών με άλλους μεγαλύτερου δείκτη slew rate από

22V/μs, ώστε να παρουσιάζουν μικρότερη καθυστέρηση εναλλαγής της τάσης ανάμεσα στους δύο ζυγούς τροφοδοσίας.

Για την επέκταση της λειτουργίας σε μικρότερες συχνότητες, οι συναρτήσεις που υπολογίζουν τα μήκη των παλμών θα πρέπει να καλούνται ελάχιστες φορές, ακόμη και μία φορά για κάθε παλμό, για τον περιορισμό του χρόνου καθυστέρησης απόδοσης του αποτελέσματος στην οθόνη. Αυτό δεν θα δημιουργούσε πρόβλημα καθώς σε χαμηλές συχνότητες το αποτέλεσμα της ανάγνωσης των συναρτήσεων παρουσιάζει μεγαλύτερη ακρίβεια.

Τέλος, είναι δυνατή η εγκατάσταση επιπρόσθετων λειτουργιών, με σκοπό να υπολογίζονται και να εμφανίζονται εκτός από τη συνολική σύνθετη αντίσταση της διάταξης που τίθεται υπό μέτρηση, οι τιμές των στοιχείων που τη διαμορφώνουν (π.χ. στο μοντέλο συσσωρευτή που χρησιμοποιήθηκε, να υπολογίζονται οι επιμέρους τιμές αντίστασης και πυκνωτή που συνδέονται παράλληλα). Αυτό προϋποθέτει την ύπαρξη επιλογής του μοντέλου της εκάστοτε διάταξης από τον χρήστη από ένα σύνολο μοντέλων εγκατεστημένων στο πρόγραμμα και την επιπλέον ικανότητα της πλατφόρμας να 'διαβάζει' την πραγματική αντίσταση της διάταξης.

Μέσω των προαναφερθέντων προτάσεων, η λειτουργία της κατασκευής θα προσέγγιζε περισσότερο τη λειτουργία ενός LCR μετρητή.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Βασικές εντολές Arduino

Όρισμα	Είδος	Τύπος	Παράμετροι	Περιγραφή
LOW	Σταθερά	Int	-	Έχει την τιμή 0 και είναι αντίστοιχη του λογικού false.
HIGH	Σταθερά	Int	-	Έχει την τιμή 1 και είναι αντίστοιχη του λογικού true.
INPUT	Σταθερά	Int	-	Έχει την τιμή 0 και είναι αντίστοιχη του λογικού false.
OUTPUT	Σταθερά	Int	-	Έχει την τιμή 1 και είναι αντίστοιχη του λογικού true.
analogRead	Συνάρτηση	Int	(pin)	Διαβάζει την τιμή συγκεκριμένης αναλογικής εισόδου. Αντιστοιχεί τάσεις τάξεως 0 – 5 V σε ακέραιο αριθμό 0 – 1023.
				Διαβάζει έναν παλμό (είτε λογικό 0 είτε

pulseIn	Συνάρτηση	Float	(pin, value)	Λογικό 1) μιας ψηφιακής εισόδου και επιστρέφει το μήκος του παλμού σε microseconds ή 0 εάν δεν ολοκληρωθεί παλμός σε προκαθορισμένο χρόνο ανάγνωσης.
delay	Εντολή	-	(time)	Σταματά προσωρινά την ροή του προγράμματος για <i>time</i> ms. Η παράμετρος <i>time</i> είναι unsignedlong (από 0 ως 2 ³²).
pinMode	Εντολή	-	(pin, mode)	Καθορίζει αν το συγκεκριμένο ψηφιακό pin θα είναι pin εισόδου ή pin εξόδου ανάλογα με την τιμή που δίνεται στην παράμετρο mode.
lcd.begin	Μέθοδος κλάσης	-	(cols, rows)	Αρχικοποιεί την επικοινωνία με την οθόνη LCD cols (στηλών) και rows (γραμμών).
lcd.print	Μέθοδος	-	(data)	Διοχετεύει τα

	κλάσης			δεδομένα στην οθόνη.
lcd.clear	Μέθοδος κλάσης	-	-	Καθαρίζει την οθόνη LCD και τοποθετεί τον κέρσορα στην πάνω αριστερή θέση.
lcd.setCursor	Μέθοδος κλάσης	-	(col,row)	Τοποθετεί τον κέρσορα στη θέση της οθόνης με συντεταγμένες (col,row)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Κώδικας προγράμματος

```
#include<LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2);
float current,z;
int f_measure = 0;
int i=0; //R[i,0] = 200
unsigned long duration,duration2;
float frequency,phase,temp;

//initializing scaling resistors
float R[] = {200.0 , 825.0 , 6600.0 };

void setup() {
// put your setup code here, to run once:
Serial.begin(9600);
analogWrite(6, 50);//adjust contrast
pinMode(8,INPUT);
pinMode(7,INPUT);
lcd.begin(16,2);
lcd.print("hello , world!");
delay(1000);
}

void loop() {
float sum = 0.0;
```

```

for (int i=0; i<100; i++){
measure_frequency();
sum = sum + frequency;
}
frequency = sum/100;
lcd.clear();
lcd.print(frequency);
delay(1000);

//fixing the divergence of frequency after 50 kHz
if (frequency>92000 && frequency<102000){frequency=100000;}
if (frequency>83000 && frequency<92000){frequency=90000;}
if (frequency>73000 && frequency<83000){frequency=80000;}
if (frequency>64000 && frequency<73000){frequency=70000;}
if (frequency>55000 && frequency<63000){frequency=60000;}
if (frequency>47000 && frequency<53000){frequency=50000;}

sum = 0.0;
for (int i=0; i<100; i++){
measure_phase();
sum = sum + phase;
}
phase = sum/100;
phase = 180.0 - phase;

//the first analogread because of Arduino bug
int sensorvalue1 = analogRead(A2);
int sensorvalue = analogRead(A2);
float voltage_drop=0.25;

```

```

if(i==2){voltage_drop = 0.19;}
if(i==0){voltage_drop = 0.44;}
float Vanalog = (sensorvalue*(5.0/1023) + voltage_drop);
float vin = 5.00;
//v = vin - Vanalog = a +jb , z=R*Vanalog/(vin-Vanalog);
float a = 5 - Vanalog*cos(phase*3.14/180);
float b = Vanalog*sin(phase*3.14/180);
float vmeter = sqrt(a*a + b*b);
    z = R[i] * Vanalog / vmeter;

floatvangle = atan(b/a)*180/3.14;
floatZangle = phase + vangle ;
//fixing angle error
if(Zangle>90){Zangle = 90;}
if(Zangle<0){Zangle=0;}

lcd.clear();

if ( Vanalog> 4.3 ){
if (i<2){
lcd.print("SCALE UP");
delay(7000);
i++;
}else{
lcd.print("Z>25000");
delay(7000);
}
}else if(Vanalog< 1.3){
if (i > 0){

```

```

lcd.print("SCALE DOWN");
delay(7000);
i--;
}else{
if (Vanalog> 0.86){
lcd.print("|Z| : ");
lcd.print(z);
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("_ ");
lcd.print(Zangle);
delay(2000);
}
else{
lcd.print("Z < 40 ohm");
delay(7000);
}
}
}else{
if (z>25000) {lcd.print("Z>25000"); delay(1000);}
else{
lcd.print("|Z| : ");
lcd.print(z);
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("_ ");
lcd.print(Zangle);
delay(2000);
}
}
}

```

```
floatmeasure_frequency()
{
duration = pulseIn(7,HIGH);
    //read in microseconds
duration = duration*2;
frequency = duration/1000000.0;
frequency = 1/frequency;
}
```

```
floatmeasure_phase()
{
    duration2 = pulseIn(8,HIGH);
//read in microseconds
temp = duration2/1000000.0;
phase = 360*temp*frequency;
}
```


ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κ. Δέρβος, «Φωτοβολταϊκά συστήματα από την θεωρία στην πράξη», Εκδ. Ε.Μ.Π, 2013.
- [2] Η.Α.Kiehne, «Battery technology Handbook second edition», Marcel Dekker Inc, 2001.
- [3] Ιστότοπος www.batteryuniversity.com
- [4] Ιστότοπος <https://computerstories.net/the-evolution-of-rechargeable-batteries-16213>
- [5] M. Mateusz, S. Sobczak, «Development of an algorithm for estimating Lead-Acid Battery State of Charge and State of Health», Blekinge Institute of Technology, 2013.
- [6] Ιστότοπος <https://www.pulsetech.net/pulse-technology>
- [7] Επίσημος ιστότοπος Arduino www.Arduino.cc
- [8] Ν. Θεοδώρου, «Ηλεκτρικές Μετρήσεις: Κλασσικές, Ηλεκτρονικές και Ψηφιακές», Εκδ. Συμμετρία, 2016.
- [9] Α. Sedra – Κ. Smith, «Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα, Τόμος 1», Εκδ. Παπασωτηρίου, 2011.
- [10] AD823, Analog devices Datasheet.