

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Συσκευή ελέγχου διαρροής ρεύματος»



«Εικόνα»

Των φοιτητών
Χαρτούδης Γιώργος –
Πελτέκης Θεολόγος
Αρ. Μητρώου: Ele518176 -
Ele518116

Επιβλέπων
Ονοματεπώνυμο: Γιακουμής
Άγγελος
Βαθμίδα :Αναπληρωτής Καθηγητής

Ημερομηνία : 14-12-2025

Κύκλωμα ελέγχου διαρροής ρεύματος

Κωδικός Δ.Ε. : 25268

Όνοματεπώνυμο φοιτητή/τών : Χαρούδης Γιώργος – Πελτέκης Θεολόγος

Όνοματεπώνυμο εισηγητή : Γιακουμής Άγγελος

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε : 07/06/2025

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. : 14 /12/2025

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 των φοιτητών Χαρούδη Γιώργο και Πελτέκη Θεολόγο που την εκπόνησε/ αν. 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 οποιοδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

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

«Αφιέρωση»

Πρόλογος

Η επιλογή της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας προέκυψε από το προσωπικό μου ενδιαφέρον για τον χώρο της ηλεκτρονικής, των μικροελεγκτών και των συστημάτων ασφαλείας ηλεκτρικών εγκαταστάσεων. Η δημιουργία μιας συσκευής μέτρησης ρεύματος διαρροής και αντίστασης μόνωσης αποτέλεσε για εμένα μια ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα τεχνική πρόκληση, καθώς συνδυάζει θεωρητικές έννοιες υψηλών τάσεων με πρακτικό σχεδιασμό κυκλωμάτων, ανάπτυξη firmware και διαδικασίες μετρητικής αξιολόγησης. Μέσα από την εκπόνηση της εργασίας είχα την ευκαιρία να εμβαθύνω στη λειτουργία αναλογικών και ψηφιακών ηλεκτρονικών, να κατανοήσω σε βάθος τον τρόπο με τον οποίο αλληλεπιδρούν τα υποσυστήματα μιας ολοκληρωμένης κατασκευής και να εφαρμόσω στην πράξη γνώσεις που αποκτήθηκαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Η υλοποίηση του κυκλώματος, η ανάπτυξη του κώδικα σε γλώσσα assembly και η διαδικασία κατασκευής του τελικού πρωτοτύπου συνέβαλαν ουσιαστικά στη βελτίωση των δεξιοτήτων μου στον σχεδιασμό, την επίλυση προβλημάτων και την πειραματική τεκμηρίωση. Το μεγαλύτερο όφελος για εμένα ήταν η δυνατότητα να δω ένα ολοκληρωμένο έργο να “ζωντανεύει” μέσα από συνεχείς δοκιμές, βελτιώσεις και τεχνική επιμονή. Η εμπειρία αυτή αποτέλεσε σημαντικό βήμα στην πορεία μου ως μελλοντικός τεχνικός και ενίσχυσε την αυτοπεποίθησή μου σε σύνθετες ηλεκτρονικές εφαρμογές.

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ασχολείται με τη σχεδίαση, κατασκευή και αξιολόγηση μιας συσκευής μέτρησης ρεύματος διαρροής και αντίστασης μόνωσης, η οποία εφαρμόζει υψηλές τάσεις δοκιμής σύμφωνα με διεθνή πρότυπα ηλεκτρικής ασφάλειας. Η συσκευή βασίζεται σε μικροελεγκτή PIC16F88, ο οποίος αναλαμβάνει τον έλεγχο της γεννήτριας υψηλής τάσης, την ανάγνωση των αναλογικών μετρήσεων μέσω του ενσωματωμένου μετατροπέα ADC, την αριθμητική επεξεργασία των δεδομένων με χρήση ρουτινών κινητής υποδιαστολής και την απεικόνιση των τελικών αποτελεσμάτων σε οθόνη LCD 2×16. Η υλοποίηση περιλαμβάνει τόσο την ανάπτυξη του firmware σε γλώσσα assembly όσο και τον σχεδιασμό ολοκληρωμένης πλακέτας PCB και του τελικού περιβλήματος της συσκευής. Η συσκευή εφαρμόζει τάσεις δοκιμής 500 V και 1000 V και μετρά το ρεύμα που διαρρέει το υπό δοκιμή μονωτικό υλικό, από το οποίο υπολογίζει την αντίστοιχη αντίσταση μόνωσης. Το κύκλωμα παραγωγής υψηλής τάσης υλοποιείται με τη χρήση λογικών πυλών Schmitt Trigger CD4093, ενώ το κύκλωμα μέτρησης βασίζεται στον επιχειρησιακό ενισχυτή LM358, ο οποίος επιτρέπει την ακριβή ενίσχυση και ανίχνευση μικρορευμάτων διαρροής. Η πλακέτα PCB σχεδιάστηκε ώστε να εξασφαλίζει ηλεκτρική απομόνωση μεταξύ του τμήματος υψηλής και χαμηλής τάσης, καθώς και ασφαλή διάταξη των εξαρτημάτων. Για την αξιολόγηση της συσκευής πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις σε πραγματικές συνθήκες. Οι δοκιμές περιλάμβαναν μέτρηση χωρίς φορτίο (open circuit), όπου καταγράφηκε πρακτικά μηδενικό ρεύμα διαρροής, καθώς και μέτρηση με τεχνητή αντίσταση 100 kΩ, η οποία απέδωσε τιμές συμβατές με τη θεωρητική αναμενόμενη συμπεριφορά. Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν τη σωστή λειτουργία του κυκλώματος, τη σταθερότητα της γεννήτριας υψηλής τάσης και την ακρίβεια του αλγορίθμου μέτρησης.

“Leakage Current Meter Circuit”

«Chartoudis Giorgos-
Peltekis Theologos »

Abstract

This thesis presents the design, construction, and evaluation of a leakage current and insulation resistance measurement device capable of applying high test voltages in accordance with international electrical safety standards. The system is based on the PIC16F88 microcontroller, which manages the high-voltage generator, acquires analog measurements through its integrated ADC, performs floating-point calculations using dedicated routines, and displays the results on a 2×16 LCD operating in 4-bit mode. The project includes the development of firmware coded entirely in assembly language, the design of a complete PCB, and the fabrication of the final enclosure and wiring. The device operates by generating test voltages of 500 V or 1000 V and measuring the leakage current flowing through the material under test. From this current, the corresponding insulation resistance is calculated according to Ohm’s law. The high-voltage generation circuit is implemented using CD4093 Schmitt Trigger gates, while the measurement circuitry employs an LM358 operational amplifier to accurately detect microampere-level leakage currents. The PCB layout was designed to ensure safe isolation between the high-voltage and low-voltage sections and to provide stable operation under different measurement conditions. Experimental testing was carried out to verify the performance of the device. Measurements included an open-circuit test, which produced near-zero leakage current and a resistance value exceeding the measurable range, as well as a test using a 100 kΩ resistor to simulate insulation leakage. The results closely matched theoretical expectations, confirming the correct operation of the measurement algorithm, the stability of the high-voltage generator, and the overall reliability of the system.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον Καθηγητή μου κ. Άγγελο Γιακουμή , για την πολύτιμη καθοδήγηση , την υποστήριξη και τις χρήσιμες συμβουλές του καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της πτυχιακής εργασίας. Η επιστημονική του καθοδήγηση , η υπομονή και η ενθάρρυνση του υπήρξαν καθοριστικές για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Πίνακας περιεχομένων

Πρόλογος	5
Περίληψη	6
Abstract	7
Ευχαριστίες	8
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	12
Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Υπόβαθρο – Ηλεκτρική Μόνωση και Διαρροή Ρεύματος	14
2.1 Έννοια και ρόλος της ηλεκτρικής μόνωσης	14
2.2 Τύποι μονωτικών υλικών και ιδιότητες	15
2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη μόνωση (θερμοκρασία, υγρασία, ρύπανση, παλαίωση)	16
2.4 Ρεύμα διαρροής	18
2.5 Κίνδυνοι από αστοχία μόνωσης	19
2.6 Πρότυπα ασφαλείας και κανονισμοί	20
2.7 Επιτρεπτά όρια ρευμάτων διαρροής σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις	21
Κεφάλαιο 3: Αρχή Λειτουργίας Συσσκευής Μέτρησης Διαρροής Ρεύματος	23
3.1 Βασική αρχή μέτρησης	23
3.2 Λειτουργικό διάγραμμα της συσκευής	24
3.3 Εφαρμοζόμενες τάσεις δοκιμής	27
3.4 Ανάλυση λειτουργίας κατά στάδιο	29
Κεφάλαιο 4: Θεωρητικό Υπόβαθρο Εξαρτημάτων και Τεχνολογιών	31
4.1 Ιστορική αναδρομή των μικροελεγκτών	31
4.2 Ο μικροελεγκτής PIC16F88	32
4.3 Αντιστάσεις	33
4.4 Πυκνωτές	34
4.5 Δίοδοι	36
4.6 Τρανζίστορ BC327	37
4.7 Ενισχυτής LM358	38
4.8 Ταλαντωτής Schmitt Trigger CD4093	39
4.9 Σταθεροποιητής LM2940	40
4.10 Οθόνη LCD 2×16	41

Κεφάλαιο 5: Σχεδίαση και Ανάπτυξη του Κυκλώματος.....	43
5.1 Γενική περιγραφή του συστήματος.....	43
5.2 Ανάλυση υποσυστημάτων	44
5.2.1 Κύκλωμα τροφοδοσίας.....	45
5.2.2 Γεννήτρια υψηλής τάσης	45
5.2.3 Κύκλωμα μέτρησης ρεύματος	46
5.2.4 Μικροελεγκτής και λογισμικό	46
5.2.5 Οθόνη LCD και διεπαφή χρήστη.....	47
5.3 Περιγραφή και ανάλυση του firmware (πρόγραμμα PIC16F88)	48
5.4 Ροή λειτουργίας προγράμματος.....	49
5.5 Λίστα βασικών εξαρτημάτων	50
Κεφάλαιο 6: Κατασκευή και Υλοποίηση.....	52
6.1 Σχεδίαση πλακέτας PCB.....	52
6.1.1 Top layer	53
6.1.2 Bottom layer	53
6.1.3 Πλήρες PCB και 3D απεικόνιση	54
6.2 Συναρμολόγηση εξαρτημάτων.....	55
6.3 Καλωδιώσεις και τοποθέτηση στο περίβλημα	56
6.4 Περιγραφή εξωτερικού κουτιού	57
Κεφάλαιο 7: Πειραματική Διάταξη και Μετρήσεις.....	59
7.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης	59
7.2 Διαδικασία μέτρησης και τρόπος σύνδεσης	59
7.3 Σενάρια μέτρησης	60
7.3.1 Μέτρηση χωρίς φορτίο	60
7.3.2 Μέτρησεις με τεχνητή διαρροή (αντίσταση 100 kΩ και 3MΩ).....	61
7.4 Πίνακες μετρήσεων και αποτελέσματα	62
7.5 Ανάλυση αποτελεσμάτων και παρατηρήσεις	63
Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προοπτικές	64
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΗΓΕΣ.....	66
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΚΩΔΙΚΑ.....	68

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Διάγραμμα - μέρος 1	25
Εικόνα 2: Διάγραμμα - μέρος 2.....	25
Εικόνα 3: Διάγραμμα -μέρος 3	26
Εικόνα 4: Διάγραμμα - μέρος 4.....	26
Εικόνα 5: PIC16F88	32
Εικόνα 6: Αντιστάσεις	33
Εικόνα 7: Κεραμικός Πυκνωτής	35
Εικόνα 8: Πυκνωτής MKT	36
Εικόνα 9: Δίοδος.....	36
Εικόνα 10: BJ327	37
Εικόνα 11: LM358	39
Εικόνα 12: CD4093.....	40
Εικόνα 13: LM2940	41
Εικόνα 14: LCD	42
Εικόνα 15: Top – Bottom Layer	52
Εικόνα 16: Πλήρες PCB.....	54
Εικόνα 17: 3D View.....	55
Εικόνα 18: Εσωτερικό Κατασκευής	56
Εικόνα 19: Περίβλημα.....	57
Εικόνα 20: Τελική Μορφή	58
Εικόνα 21: Μέτρηση ανάμεσα σε 2 αγωγούς.....	60
Εικόνα 22: Μέτρηση με τεχνητή διαρροή 100 ΚΩ αντίσταση	61
Εικόνα 23 : Μέτρηση με τεχνητή διαρροή 3 ΜΩ αντίσταση.....	63

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Λίστα βασικών εξαρτημάτων	50
Πίνακας 2: Συγκριτικά Αποτελέσματα	62

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί βασικό στοιχείο κάθε σύγχρονης υποδομής, από οικιακές εγκαταστάσεις έως βιομηχανικά συστήματα και ηλεκτρονικές συσκευές. Η ασφαλής χρήση της, ωστόσο, εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα και την ακεραιότητα της ηλεκτρικής μόνωσης, η οποία έχει ως κύριο ρόλο την προστασία ανθρώπων και εξοπλισμού από ανεπιθύμητη ροή ρεύματος [1], [2]. Με την πάροδο του χρόνου, η μόνωση των καλωδίων και των συσκευών υποβαθμίζεται λόγω θερμοκρασίας, υγρασίας, ρύπανσης ή μηχανικής καταπόνησης, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το ρεύμα διαρροής και να δημιουργούνται συνθήκες που ενδέχεται να οδηγήσουν σε ηλεκτροπληξία, βραχυκύκλωμα ή πυρκαγιά. Για τον λόγο αυτό, ο έλεγχος της αντίστασης μόνωσης αποτελεί κρίσιμο στάδιο στην αξιολόγηση της ασφάλειας και της αξιοπιστίας κάθε ηλεκτρικής εγκατάστασης [3], [4].

Η ανάγκη για συστηματική και αξιόπιστη μέτρηση του ρεύματος διαρροής έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη εξειδικευμένων οργάνων μέτρησης, τα οποία εφαρμόζουν υψηλή τάση δοκιμής και καταγράφουν την αντίστοιχη τιμή του ρεύματος που διαρρέει το υπό εξέταση μονωτικό υλικό [5]. Τα όργανα αυτά βασίζονται στη θεμελιώδη σχέση του νόμου του Ohm και αποτελούν αναπόσπαστο εργαλείο για ηλεκτρολόγους, τεχνικούς ασφαλείας, μηχανικούς συντήρησης και κατασκευαστές συσκευών [6]. Παρά την ύπαρξη εμπορικών λύσεων, η κατανόηση του τρόπου λειτουργίας τους και η υλοποίηση ενός αντίστοιχου κυκλώματος σε εκπαιδευτικό πλαίσιο παρουσιάζει σημαντική τεχνική και διδακτική αξία, καθώς επιτρέπει στον φοιτητή να προσεγγίσει ολοκληρωμένα τα στάδια σχεδίασης, ανάπτυξης, προγραμματισμού και μετρητικής αξιολόγησης μιας ηλεκτρονικής διάταξης [7].

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως αντικείμενο τη σχεδίαση, υλοποίηση και αξιολόγηση μιας συσκευής μέτρησης διαρροής ρεύματος, ικανής να εφαρμόζει τάσεις δοκιμής 500 V και 1000 V σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα IEC και EN. Η συσκευή βασίζεται σε μικροελεγκτή PIC16F88, ο οποίος αναλαμβάνει τον έλεγχο της γεννήτριας υψηλής τάσης, την ανάγνωση του ρεύματος διαρροής μέσω κατάλληλου κυκλώματος μέτρησης, την επεξεργασία των δεδομένων με χρήση ρουτινών κινητής υποδιαστολής και την απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε οθόνη LCD 2×16. Παράλληλα, υλοποιήθηκε πλακέτα PCB, κατασκευάστηκε το φυσικό πρωτότυπο και πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις τόσο σε συνθήκες χωρίς φορτίο όσο και με τεχνητή διαρροή μέσω αντίστασης 100 kΩ, ώστε να αξιολογηθεί η ακρίβεια και η λειτουργικότητα της συσκευής.

Η εργασία αναπτύσσεται σε επτά κύρια κεφάλαια. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της ηλεκτρικής μόνωσης, των παραγόντων που την επηρεάζουν, των

κινδύνων που σχετίζονται με την αστοχία της και των διεθνών προτύπων ασφαλείας. Στο Κεφάλαιο 3 αναλύεται η αρχή λειτουργίας της συσκευής, οι βασικές εξισώσεις και η μετρολογική μέθοδος που εφαρμόζεται. Το Κεφάλαιο 4 εξετάζει τα κύρια ηλεκτρονικά εξαρτήματα και τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή. Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η πλήρης σχεδίαση του κυκλώματος, το firmware και η λειτουργική δομή του συστήματος. Ακολουθεί το Κεφάλαιο 6, όπου περιγράφονται αναλυτικά η κατασκευή της πλακέτας, η συναρμολόγηση, οι καλωδιώσεις και η τελική διαμόρφωση της συσκευής. Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη, η διαδικασία μέτρησης, τα αποτελέσματα και η αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος.

Στόχος της εργασίας είναι η ανάπτυξη μιας λειτουργικής, αξιόπιστης και εκπαιδευτικά χρήσιμης συσκευής μέτρησης διαρροής ρεύματος, καθώς και η πλήρης τεχνική τεκμηρίωση των σταδίων σχεδίασης και λειτουργίας της, προσφέροντας στον αναγνώστη μια ολοκληρωμένη κατανόηση των αρχών και των πρακτικών που διέπουν τους ελέγχους ηλεκτρικής μόνωσης.

Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Υπόβαθρο – Ηλεκτρική Μόνωση και Διαρροή Ρεύματος

2.1 Έννοια και ρόλος της ηλεκτρικής μόνωσης

Η ηλεκτρική μόνωση αποτελεί ένα από τα θεμελιώδη στοιχεία κάθε ηλεκτρικής ή ηλεκτρονικής εγκατάστασης, καθώς είναι ο «αόρατος» μηχανισμός που εξασφαλίζει ότι τα αγωγικά μέρη παραμένουν ηλεκτρικά απομονωμένα μεταξύ τους και από τον άνθρωπο. Με τον όρο μόνωση εννοούμε οτιδήποτε παρεμβάλλεται ανάμεσα σε δύο σημεία διαφορετικού δυναμικού, με σκοπό να εμποδίσει ή να περιορίσει δραστικά τη ροή ρεύματος, ώστε αυτή να μειωθεί σε ασφαλή και ελεγχόμενα επίπεδα. Στην πράξη, η μόνωση δεν είναι ποτέ ιδανική· ακόμη και τα καλύτερα μονωτικά υλικά παρουσιάζουν πολύ μικρά ρεύματα διαρροής, τα οποία όμως, όταν παραμένουν εντός ορισμένων ορίων, θεωρούνται αποδεκτά και ασφαλή. Ο ρόλος της μόνωσης είναι διπλός: από τη μία προστατεύει τον άνθρωπο από τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας, εμποδίζοντας την επαφή με αγωγικά μέρη υπό τάση, και από την άλλη προστατεύει τον εξοπλισμό από βραχυκυκλώματα, υπερθέρμανση, ανεπιθύμητες εκφορτίσεις και πρόωρη γήρανση. Χωρίς επαρκή μόνωση, κάθε ηλεκτρική εγκατάσταση (από μια απλή οικιακή πρίζα έως έναν βιομηχανικό πίνακα) θα ήταν ουσιαστικά επικίνδυνη και μη αξιόπιστη [1], [2], [8].

Η ποιότητα της ηλεκτρικής μόνωσης εκφράζεται τυπικά μέσω της αντίστασης μόνωσης, η οποία μετράται συνήθως σε μεγα-ώμ (MΩ). Όσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση μόνωσης μεταξύ δύο αγωγικών μερών (π.χ. μεταξύ φάσης-γείωσης ή μεταξύ δύο αγωγών), τόσο μικρότερο είναι το ρεύμα διαρροής που μπορεί να περάσει για μια δεδομένη τάση, άρα τόσο καλύτερη θεωρείται η μόνωση [6]. Στη θεωρία, αν η μόνωση ήταν τέλεια, η αντίσταση μόνωσης θα ήταν άπειρη και το ρεύμα διαρροής μηδενικό· στην πράξη, όμως, πάντα υπάρχει κάποια διαρροή λόγω της εσωτερικής αγωγιμότητας του υλικού, της επιφανειακής ρύπανσης, της υγρασίας, της θερμοκρασίας και της γήρανσης. Η μέτρηση της αντίστασης μόνωσης γίνεται συνήθως με ειδικά όργανα, τα οποία εφαρμόζουν μία ελεγχόμενη υψηλή τάση δοκιμής – όπως 500 V ή 1000 V, όπως ακριβώς κάνει και η συσκευή που υλοποιείται στην παρούσα εργασία – και μετρούν το πολύ μικρό ρεύμα που διαρρέει τη μόνωση. Από τη σχέση $R = V/I$ προκύπτει στη συνέχεια η τιμή της αντίστασης μόνωσης, η οποία χρησιμοποιείται ως δείκτης της κατάστασης και της «υγείας» του μονωτικού συστήματος. Έτσι, η ηλεκτρική μόνωση δεν είναι μια αφηρημένη έννοια, αλλά ένα φυσικό μέγεθος που μπορεί να ελεγχθεί, να ποσοτικοποιηθεί και να παρακολουθηθεί μετρητικά με συσκευές όπως αυτή της πτυχιακής εργασίας [5], [7], [9].

2.2 Τύποι μονωτικών υλικών και ιδιότητες

Τα μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτρολογία και τα ηλεκτρονικά είναι εξαιρετικά ποικίλα και επιλέγονται ανάλογα με το επίπεδο τάσης, το περιβάλλον λειτουργίας, τις μηχανικές απαιτήσεις και το κόστος. Σε γενικές γραμμές μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τη φυσική τους κατάσταση σε στερεά, υγρά και αέρια μονωτικά, ενώ σε πολλές εφαρμογές συναντάμε σύνθετα συστήματα μόνωσης που συνδυάζουν περισσότερα του ενός υλικά [1]. Στερεά μονωτικά είναι τα πιο συνηθισμένα στις χαμηλές τάσεις και στις ηλεκτρονικές διατάξεις, όπως πλαστικά, ελαστικά, εποξειδικές ρητίνες, εποξικά βερνίκια, υαλοϋφάσματα, πολυστρωματικές πλακέτες (FR-4) κ.ά. Αυτά χρησιμοποιούνται για την επικάλυψη αγωγών (μονωμένα καλώδια), την κατασκευή σωμάτων αντιστάσεων και πυκνωτών, την μόνωση τυλιγμάτων σε μετασχηματιστές, αλλά και ως υπόστρωμα σε τυπωμένα κυκλώματα, όπως το FR-4 στην πλακέτα PCB της κατασκευής. Υγρά μονωτικά (όπως τα ορυκτέλαια ή συνθετικά εστέρες) χρησιμοποιούνται περισσότερο σε μετασχηματιστές ισχύος και διακόπτες υψηλής τάσης, όπου εκτός από τη μόνωση προσφέρουν και ψύξη. Αέρια μονωτικά, όπως ο αέρας και ειδικά αέρια με υψηλή διηλεκτρική αντοχή, αξιοποιούνται σε μονωτήρες γραμμών ή κλειστούς διακόπτες υψηλής τάσης [6],[10]. Στο επίπεδο της παρούσας συσκευής, το «μονωτικό σύστημα» που μας ενδιαφέρει είναι κυρίως η μόνωση καλωδίων, οι αποστάσεις μόνωσης (clearance και creepage) στην πλακέτα, οι επικαλύψεις και το πλαστικό περίβλημα του οργάνου.

Οι βασικές ιδιότητες ενός μονωτικού υλικού που καθορίζουν την καταλληλότητά του για συγκεκριμένη εφαρμογή είναι κυρίως η διηλεκτρική αντοχή, η ειδική αντίσταση (όγκο και επιφανειακή), η διηλεκτρική σταθερά και οι διηλεκτρικές απώλειες, καθώς και οι μηχανικές, θερμικές και χημικές του αντοχές. Η διηλεκτρική αντοχή εκφράζει το μέγιστο ηλεκτρικό πεδίο που μπορεί να αντέξει το υλικό χωρίς να προκληθεί διάσπαση (σπινθήρας ή τόξο). Υλικά με υψηλή διηλεκτρική αντοχή επιτρέπουν την εφαρμογή μεγάλων τάσεων σε μικρές αποστάσεις, κάτι που είναι κρίσιμο σε συμπαγείς ηλεκτρονικές κατασκευές. Η ειδική αντίσταση περιγράφει πόσο καλά «κρατάει» τη μόνωση το υλικό: όσο μεγαλύτερη, τόσο μικρότερο ρεύμα διαρροής για δεδομένη τάση [5], [6]. Στην πράξη, ο σχεδιαστής πρέπει να λάβει υπόψη όχι μόνο την αγωγιμότητα στο εσωτερικό του υλικού (όγκος), αλλά και την επιφανειακή αγωγιμότητα, η οποία επηρεάζεται έντονα από τη ρύπανση, τη σκόνη και την υγρασία. Γι' αυτό, πολλές φορές η υποβάθμιση της μόνωσης ξεκινά από την επιφάνεια (δημιουργία «δρόμων» αγωγιμότητας) πριν ακόμη το υλικό υποστεί εσωτερική βλάβη [9].

Παράλληλα, η διηλεκτρική σταθερά και ο συντελεστής απωλειών καθορίζουν πώς το υλικό αλληλεπιδρά με εναλλασσόμενα ηλεκτρικά πεδία: υλικά με υψηλές απώλειες θερμαίνονται

περισσότερο όταν εκτίθενται σε εναλλασσόμενη τάση, κάτι που μακροχρόνια μπορεί να οδηγήσει σε επιτάχυνση της γήρανσης. Οι θερμικές ιδιότητες (μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία λειτουργίας, θερμική αγωγιμότητα, συντελεστής διαστολής) καθορίζουν αν το μονωτικό μπορεί να αντέξει σε συνεχή λειτουργία χωρίς να αλλοιωθούν οι ηλεκτρικές του ιδιότητες. Χημικές ιδιότητες, όπως αντοχή σε υγρασία, UV ακτινοβολία και χημικούς ρυπαντές, επηρεάζουν τον ρυθμό γήρανσης και άρα τη μακροχρόνια αξιοπιστία. Στην περίπτωση της παρούσας συσκευής, όλα αυτά συνδέονται άμεσα με τη μέτρηση: τα υλικά μόνωσης που ελέγχονται (καλώδια, περιελίξεις, εγκαταστάσεις) εκτίθενται σε τάσεις δοκιμής 500 V ή 1000 V και η συσκευή καταγράφει το ρεύμα διαρροής που διαπερνά τα πραγματικά, γερασμένα ή υγρά μονωτικά. Έτσι, η αντίσταση μόνωσης που προκύπτει από τη μέτρηση δεν είναι απλώς ένα θεωρητικό μέγεθος, αλλά αποτέλεσμα όλων των παραπάνω ιδιοτήτων του μονωτικού υλικού, όπως αυτές έχουν διαμορφωθεί από το χρόνο, τις περιβαλλοντικές συνθήκες και το είδος της εφαρμογής [7].

2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη μόνωση (θερμοκρασία, υγρασία, ρύπανση, παλαιώση)

Η απόδοση και η αξιοπιστία της ηλεκτρικής μόνωσης δεν παραμένουν σταθερές με την πάροδο του χρόνου· επηρεάζονται από πλήθος εξωτερικών παραγόντων που αλλοιώνουν σταδιακά τις ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες των μονωτικών υλικών. Οι σημαντικότεροι από αυτούς είναι η θερμοκρασία, η υγρασία, η ρύπανση και η παλαιώση του υλικού. Οι παράγοντες αυτοί είτε ενεργούν μεμονωμένα είτε συνδυαστικά, οδηγώντας στη σταδιακή μείωση της αντίστασης μόνωσης και στην αύξηση του ρεύματος διαρροής, γεγονός που καθιστά τη συστηματική παρακολούθηση της μόνωσης ζωτικής σημασίας [1], [2], [11].

Η θερμοκρασία αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους παράγοντες. Με την αύξηση της θερμοκρασίας, αυξάνεται η εσωτερική κινητικότητα των μορίων του μονωτικού υλικού, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ειδική του αντίσταση. Αυτό σημαίνει ότι για την ίδια εφαρμοζόμενη τάση, το ρεύμα διαρροής αυξάνεται εκθετικά. Επίσης, σε υψηλές θερμοκρασίες ενδέχεται να ξεκινήσουν διαδικασίες θερμικής γήρανσης, όπως η οξείδωση ή η αποσύνθεση των πολυμερών αλυσίδων, που αλλοιώνουν μόνιμα τη δομή του υλικού. Για το λόγο αυτό, κάθε κατηγορία μονωτικού έχει συγκεκριμένη «θερμική κλάση» λειτουργίας (π.χ. Class A, B, F, H), πέρα από την οποία οι ιδιότητες του υλικού αρχίζουν να υποβαθμίζονται ραγδαία. Στην πράξη, μία αύξηση θερμοκρασίας κατά 10 °C μπορεί να διπλασιάσει ή και να τριπλασιάσει το ρεύμα διαρροής, ενώ σε παρατεταμένη λειτουργία προκαλεί συρρίκνωση, ρωγμές και απώλεια της διηλεκτρικής αντοχής [1], [9].

Η υγρασία είναι εξίσου επιβαρυντικός παράγοντας, καθώς το νερό είναι σχετικά καλός αγωγός ιόντων, ιδιαίτερα όταν περιέχει διαλυμένα άλατα ή ρυπαντές. Όταν το μονωτικό υλικό απορροφήσει υγρασία από το περιβάλλον, μειώνεται η ειδική του αντίσταση και αυξάνεται σημαντικά το επιφανειακό ρεύμα διαρροής. Αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές σε οργανικά υλικά (όπως πλαστικά ή ελαστικά) και σε πορώδη μονωτικά. Επιπλέον, η υγρασία μπορεί να συγκεντρωθεί σε περιοχές υψηλού ηλεκτρικού πεδίου, οδηγώντας σε μικροεκκενώσεις και σταδιακή διάβρωση της επιφάνειας. Γι' αυτόν τον λόγο, η μέτρηση της αντίστασης μόνωσης – όπως αυτή που πραγματοποιεί η συσκευή της παρούσας εργασίας – γίνεται πάντοτε σε ξηρές συνθήκες, και οι τιμές που λαμβάνονται ερμηνεύονται σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία του περιβάλλοντος [8], [9].

Η ρύπανση των επιφανειών των μονωτικών αποτελεί μία από τις συνηθέστερες αιτίες πρόωρης υποβάθμισης. Σκόνη, λίπη, καυσαέρια, άλατα και οργανικά κατάλοιπα μπορούν να δημιουργήσουν λεπτά στρώματα αγωγίμων ενώσεων πάνω στην επιφάνεια ενός μονωτικού. Όταν αυτά τα στρώματα διαβραχούν από υγρασία, σχηματίζουν «δρόμους» (tracking paths) μέσω των οποίων ρέει ρεύμα διαρροής. Οι επιφανειακές αυτές εκκενώσεις, αν επαναληφθούν πολλές φορές, προκαλούν θερμική και χημική φθορά, με αποτέλεσμα τη σταδιακή δημιουργία μόνιμων αγωγίμων καναλιών και, τελικά, πλήρη αστοχία της μόνωσης. Η ρύπανση είναι ιδιαίτερα προβληματική σε εξωτερικές εγκαταστάσεις, κοντά στη θάλασσα ή σε βιομηχανικά περιβάλλοντα, όπου απαιτούνται ειδικά μονωτικά υλικά με αυξημένη επιφανειακή αντοχή και κατάλληλες αποστάσεις μόνωσης (creepage distances) [11], [12].

Τέλος, η παλαιώση είναι μια φυσική, αναπόφευκτη διαδικασία που επηρεάζει όλα τα μονωτικά υλικά με το χρόνο. Μπορεί να είναι θερμική (λόγω συνεχούς έκθεσης σε υψηλές θερμοκρασίες), ηλεκτρική (λόγω επαναλαμβανόμενων εκκενώσεων ή υπερτάσεων), μηχανική (λόγω κραδασμών, τάσεων, διαστολών) ή χημική (λόγω οξείδωσης και UV ακτινοβολίας). Καθώς το μονωτικό υλικό γηράσκει, εμφανίζει μικρορωγμές, απώλεια ελαστικότητας, μεταβολές στη διηλεκτρική του σταθερά και, τελικά, μείωση της αντίστασης μόνωσης. Για αυτόν τον λόγο, ο τακτικός έλεγχος της μόνωσης αποτελεί έναν από τους βασικότερους δείκτες πρόγνωσης αστοχίας σε ηλεκτρικά συστήματα. Ένα μέγ-όμετρο ή κύκλωμα διαρροής ρεύματος (όπως αυτό που μελετάται στην παρούσα εργασία) είναι το κατάλληλο εργαλείο για την ποσοτικοποίηση αυτής της γήρανσης και την αξιολόγηση της «υγείας» του μονωτικού συστήματος πριν την εμφάνιση ολικής βλάβης [2], [13].

2.4 Ρεύμα διαρροής

Το ρεύμα διαρροής (leakage current) είναι το μικρό ηλεκτρικό ρεύμα που ρέει μέσω ή πάνω στην επιφάνεια ενός μονωτικού υλικού όταν μεταξύ των αγωγίμων μερών εφαρμόζεται μία τάση. Ιδανικά, ένα τέτοιο ρεύμα θα έπρεπε να είναι μηδενικό, όμως στην πραγματικότητα κάθε μονωτικό επιτρέπει τη διέλευση ενός πολύ μικρού ρεύματος εξαιτίας της πεπερασμένης αντίστασης του υλικού και της ύπαρξης χωρητικότητας μεταξύ των αγωγίμων σημείων. Στα ηλεκτρονικά και στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, το ρεύμα διαρροής δεν είναι απλώς θεωρητικό μέγεθος· αποτελεί βασικό δείκτη της κατάστασης της μόνωσης και της ασφάλειας του συστήματος [2] ,[8].

Ανάλογα με την πηγή προέλευσής του, το ρεύμα διαρροής μπορεί να προκύψει:

1. Μέσω του όγκου του μονωτικού (volume leakage current), εξαιτίας της εσωτερικής αγωγιμότητας του υλικού.
2. Πάνω στην επιφάνεια του μονωτικού (surface leakage current), λόγω ρύπανσης, υγρασίας ή ιονισμού της επιφάνειας.
3. Χωρητικά, εξαιτίας του ότι κάθε καλώδιο ή συσκευή έχει μια μικρή χωρητικότητα προς γη ή προς άλλα αγωγή μέρη, η οποία επιτρέπει τη ροή εναλλασσόμενου ρεύματος ακόμη και χωρίς πραγματική αγωγιμότητα.

Η ένταση του ρεύματος διαρροής εξαρτάται από τη συνολική αντίσταση μόνωσης, την εφαρμοζόμενη τάση, τη συχνότητα (στην περίπτωση AC συστημάτων) και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Σε εγκαταστάσεις χαμηλής τάσης (230 V), τα επιτρεπτά ρεύματα διαρροής είναι συνήθως της τάξης των μικροαμπερ (μΑ), ενώ σε βιομηχανικό εξοπλισμό μπορεί να φθάσουν μερικά χιλιοστά του αμπερ (mA) χωρίς να θεωρούνται επικίνδυνα. Παρόλα αυτά, όταν η τιμή τους υπερβεί ορισμένα όρια (π.χ. 0,5 mA για οικιακές συσκευές κατά IEC 60990), τότε υπάρχει σοβαρός κίνδυνος ηλεκτροπληξίας ή ακούσιας ενεργοποίησης διακοπών διαρροής (RCD) [3] , [8].

Οι αιτίες αύξησης του ρεύματος διαρροής είναι πολλές: φυσική φθορά της μόνωσης, υγρασία, θερμοκρασιακές καταπονήσεις, υπερτάσεις, μηχανικές βλάβες, κακή εγκατάσταση ή ρύπανση των επιφανειών. Ειδικά στα συστήματα που λειτουργούν υπό υψηλή τάση, ακόμη και μικρές βλάβες ή ανομοιομορφίες μπορούν να οδηγήσουν σε μικροεκκενώσεις (partial discharges), οι οποίες επιδεινώνουν περαιτέρω τη μόνωση, προκαλώντας ένα φαύλο κύκλο φθοράς [12] , [13].

Οι επιπτώσεις του ρεύματος διαρροής είναι σημαντικές τόσο για την ασφάλεια του ανθρώπου όσο και για τη λειτουργικότητα των συσκευών. Από πλευράς ασφάλειας, ακόμα και ρεύματα μερικών mA που διέρχονται από το ανθρώπινο σώμα μπορούν να προκαλέσουν αίσθημα

ηλεκτροπληξίας, μυϊκές συσπάσεις ή απώλεια ελέγχου, ενώ ρεύματα άνω των 30 mA μπορεί να είναι θανατηφόρα. Από πλευράς εξοπλισμού, η συνεχής ύπαρξη ρεύματος διαρροής μπορεί να οδηγήσει σε υπερθέρμανση, ψευδείς ενεργοποιήσεις προστατευτικών διακοπών, απώλειες ενέργειας και σταδιακή φθορά της μόνωσης [8].

Για όλους αυτούς τους λόγους, η μέτρηση του ρεύματος διαρροής και η εξαγωγή της αντίστασης μόνωσης αποτελούν κρίσιμο στάδιο προληπτικής συντήρησης σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις και συσκευές. Η συσκευή που μελετάται στην παρούσα εργασία βασίζεται ακριβώς σε αυτήν την αρχή: εφαρμόζει γνωστή τάση (500 ή 1000 V), μετρά το παραγόμενο ρεύμα διαρροής σε μικροαμπέρ, και υπολογίζει την αντίσταση μόνωσης σε μεγαόμ μέσω της σχέσης $R = V/I$. Με αυτόν τον τρόπο παρέχει έναν ποσοτικό δείκτη της κατάστασης της μόνωσης και επιτρέπει την έγκαιρη ανίχνευση πιθανών βλαβών πριν αυτές εξελιχθούν σε επικίνδυνες καταστάσεις.

2.5 Κίνδυνοι από αστοχία μόνωσης

Η αστοχία της ηλεκτρικής μόνωσης αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους και επικίνδυνους τύπους βλάβης στα ηλεκτρικά συστήματα. Όταν η μόνωση ενός καλωδίου, ενός κινητήρα ή μιας ηλεκτρονικής συσκευής χάσει την ικανότητά της να απομονώνει τα αγωγίμα μέρη, ανοίγει ο δρόμος για ανεξέλεγκτη ροή ρεύματος, που μπορεί να έχει σωματικές, υλικές και λειτουργικές συνέπειες [2],[8].

Ο πιο άμεσος και σοβαρός κίνδυνος είναι η ηλεκτροπληξία. Αν η φθαρμένη μόνωση επιτρέπει τη διαρροή ρεύματος σε μεταλλικά μέρη ή επιφάνειες που ο χρήστης μπορεί να αγγίξει, ακόμη και μικρά ρεύματα (άνω των 30 mA για λίγα δευτερόλεπτα) μπορεί να προκαλέσουν σπασμούς, ανακοπή καρδιάς ή αναπνευστική παράλυση [8]. Στην πραγματικότητα, ακόμα και ρεύματα της τάξης των 5–10 mA μπορούν να προκαλέσουν απώλεια ελέγχου των μυών, με αποτέλεσμα ο χειριστής να μην μπορεί να απομακρυνθεί από το σημείο επαφής. Η αστοχία της μόνωσης δεν είναι πάντοτε εμφανής (μπορεί να οφείλεται σε μικρορωγμές, υγρασία, μηχανική φθορά ή υπέρταση που έχει «τρυπήσει» το μονωτικό στρώμα) και γι' αυτό ο προληπτικός έλεγχος είναι τόσο σημαντικός [2],[11].

Ένας δεύτερος, εξίσου επικίνδυνος κίνδυνος είναι η πυρκαγιά. Όταν η μόνωση χάσει την αντοχή της, η διέλευση ρεύματος διαρροής μπορεί να οδηγήσει σε τοπική υπερθέρμανση του υλικού. Εφόσον η θερμότητα δεν διαχέεται επαρκώς, η θερμοκρασία αυξάνεται ραγδαία, προκαλώντας θερμική διάσπαση ή ανάφλεξη των γύρω μονωτικών και πλαστικών μερών [2],[8]. Πολλές ηλεκτρικές πυρκαγιές ξεκινούν ακριβώς από μικρά ρεύματα διαρροής που περνούν απαρατήρητα, ιδιαίτερα σε καλώδια που διαρρέονται συνεχώς από ρεύμα ή

βρίσκονται σε περιοχές με σκόνη και περιορισμένο αερισμό. Το φαινόμενο επιδεινώνεται όταν τα ρεύματα διαρροής δημιουργούν ηλεκτρικά τόξα, τα οποία μπορούν να αναφλέξουν υλικά σε πολύ χαμηλότερες θερμοκρασίες από την κανονική θερμοκρασία ανάφλεξης [11] , [12].

Επιπλέον, η αστοχία της μόνωσης μπορεί να προκαλέσει καταστροφή εξοπλισμού και δυσλειτουργίες σε ηλεκτρονικά κυκλώματα. Συσκευές που στηρίζονται σε υψηλή ακρίβεια σημάτων (όπως αισθητήρες, PLC, συστήματα ελέγχου ή μικροελεγκτές) είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες ακόμη και σε μικρά ρεύματα διαρροής, καθώς αυτά μπορούν να προκαλέσουν θόρυβο, παρασιτικά σήματα ή λανθασμένες μετρήσεις. Σε βιομηχανικά περιβάλλοντα, η αστοχία της μόνωσης σε κινητήρες ή μετασχηματιστές οδηγεί σε βραχυκυκλώματα, διακοπές λειτουργίας και οικονομικές απώλειες λόγω στάσης παραγωγής. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η βλάβη μπορεί να εξαπλωθεί, προκαλώντας αλυσιδωτές καταστροφές σε ολόκληρα τμήματα ενός ηλεκτρικού πίνακα. Για τους λόγους αυτούς, η περιοδική μέτρηση της αντίστασης μόνωσης με συσκευές όπως το κύκλωμα διαρροής ρεύματος της παρούσας εργασίας αποτελεί ουσιαστικό μέσο πρόληψης και έγκαιρης διάγνωσης πριν συμβεί κάποια επικίνδυνη αστοχία [2] , [7], [13].

2.6 Πρότυπα ασφαλείας και κανονισμοί

Για να διασφαλιστεί ότι οι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις και συσκευές λειτουργούν με ασφάλεια και εντός αποδεκτών ορίων, διεθνείς και εθνικοί οργανισμοί έχουν θεσπίσει σειρά προτύπων και κανονισμών που καθορίζουν τα απαιτούμενα επίπεδα μόνωσης, τις επιτρεπόμενες τιμές ρεύματος διαρροής και τις διαδικασίες δοκιμής. Τα πρότυπα αυτά εφαρμόζονται τόσο στο σχεδιασμό όσο και στον τακτικό έλεγχο των ηλεκτρικών συστημάτων[3] , [10].

Ο Διεθνής Ηλεκτροτεχνικός Οργανισμός (IEC) έχει εκδώσει σειρά προτύπων που καλύπτουν σχεδόν κάθε πτυχή των μετρήσεων μόνωσης και της ηλεκτρικής ασφάλειας [3]. Ενδεικτικά:

- Το IEC 60364 καθορίζει τις βασικές απαιτήσεις ηλεκτρικών εγκαταστάσεων χαμηλής τάσης, συμπεριλαμβανομένων των μετρήσεων αντίστασης μόνωσης και ελέγχου γείωσης.
- Το IEC 61557-2 εξειδικεύει τα όργανα που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση αντίστασης μόνωσης, περιγράφοντας τις απαιτήσεις ακρίβειας, εύρους και ασφάλειας των μετρητών .
- Το IEC 61010-1 αφορά την ασφάλεια ηλεκτρονικών οργάνων μέτρησης και καθορίζει τις μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές ρευμάτων διαρροής προς τον χρήστη [8].

- Το IEC 60664 προσδιορίζει τις αποστάσεις μόνωσης (clearance, creepage) που πρέπει να τηρούνται ανάλογα με την τάση και το επίπεδο ρύπανσης του περιβάλλοντος [11].

Στην Ευρώπη, τα πρότυπα IEC έχουν υιοθετηθεί σχεδόν αυτούσια με την ένδειξη EN (European Norms), διασφαλίζοντας εναρμονισμένη εφαρμογή σε όλα τα κράτη-μέλη. Έτσι, τα EN 61557 και EN 61010 αποτελούν τη βάση για τον χαρακτηρισμό και την πιστοποίηση συσκευών μέτρησης όπως το κύκλωμα διαρροής ρεύματος που μελετάται εδώ [3], [8].

Στις Ηνωμένες Πολιτείες, ο οργανισμός Underwriters Laboratories (UL) έχει καθιερώσει αντίστοιχα πρότυπα όπως το UL 61010, το οποίο θέτει όρια για τα ρεύματα διαρροής και καθορίζει τις δοκιμές αντοχής μόνωσης, τα μέγιστα ρεύματα προς γη και τις διαδικασίες ελέγχου ασφαλείας [8]. Αντίστοιχα, στη Γερμανία, ο οργανισμός VDE (Verband der Elektrotechnik) διαμορφώνει κανονισμούς με μεγάλη αποδοχή διεθνώς, όπως το VDE 0413, που καθορίζει τις μεθόδους μέτρησης μόνωσης και τις απαιτήσεις οργάνων μέτρησης [3].

Τα παραπάνω πρότυπα επιβάλλουν και την ταξινόμηση των οργάνων ανάλογα με το επίπεδο προστασίας τους, μέσω των κατηγοριών CAT I έως CAT IV, που καθορίζουν το επιτρεπόμενο επίπεδο υπέρτασης που μπορεί να δεχθεί η συσκευή χωρίς κίνδυνο για τον χρήστη. Το κύκλωμα διαρροής ρεύματος που μελετάται στην παρούσα εργασία ακολουθεί την αρχή σχεδίασης τέτοιων οργάνων, χρησιμοποιώντας κατάλληλη μόνωση, αποστάσεις ασφαλείας και έλεγχο ρευμάτων μικροαμπέρ ώστε να μπορεί να θεωρηθεί ασφαλές για χρήση σε χαμηλές και μέσες τάσεις δοκιμής (500 V και 1000 V DC) [3].

Η συμμόρφωση με τα παραπάνω πρότυπα δεν είναι μόνο νομική υποχρέωση, αλλά και ουσιαστικός παράγοντας τεχνικής αξιοπιστίας και εμπιστοσύνης στη λειτουργία του εξοπλισμού. Ο σωστός σχεδιασμός, η επιλογή πιστοποιημένων εξαρτημάτων και η περιοδική μέτρηση της μόνωσης αποτελούν τα βασικά εργαλεία για τη διασφάλιση της ασφάλειας προσωπικού και εγκαταστάσεων [3], [7].

2.7 Επιτρεπτά όρια ρευμάτων διαρροής σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις

Τα επιτρεπτά όρια ρεύματος διαρροής αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους για τον σχεδιασμό, την πιστοποίηση και τη συντήρηση ηλεκτρικών συστημάτων. Αυτά τα όρια καθορίζονται από διεθνή και εθνικά πρότυπα, ώστε να εξασφαλίζεται η ασφάλεια των χρηστών και η σωστή λειτουργία του εξοπλισμού. Η μέτρηση και η παρακολούθηση του ρεύματος διαρροής, όπως αυτή που επιτυγχάνει το κύκλωμα διαρροής ρεύματος της παρούσας εργασίας, βασίζεται ακριβώς στην αξιολόγηση αυτών των ορίων [2].

Σε οικιακές και επαγγελματικές εγκαταστάσεις χαμηλής τάσης, σύμφωνα με το IEC 60364 και τα πρότυπα EN 61140, το ρεύμα διαρροής ενός κυκλώματος ή μιας συσκευής δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 0,5 mA ανά ενεργό αγωγό για συσκευές κλάσης I (δηλαδή συσκευές με αγωγίμο περίβλημα που γειώνεται). Για συσκευές κλάσης II, οι οποίες διαθέτουν διπλή ή ενισχυμένη μόνωση, το επιτρεπόμενο ρεύμα διαρροής είναι ακόμη μικρότερο, συνήθως κάτω από 0,25 mA. Στα ιατρικά μηχανήματα, όπου η ασφάλεια του ανθρώπινου σώματος είναι κρίσιμη, τα πρότυπα IEC 60601-1 ορίζουν εξαιρετικά αυστηρά όρια: το ρεύμα διαρροής προς τον ασθενή δεν πρέπει να ξεπερνά τα 0,1 mA (100 μA), ενώ για τις συσκευές που συνδέονται άμεσα στο σώμα το όριο μειώνεται σε 0,05 mA (50 μA). Σε τέτοιες περιπτώσεις, ακόμα και ασήμαντες μεταβολές στη μόνωση μπορεί να έχουν σοβαρές συνέπειες [2] , [14] .

Για βιομηχανικές εγκαταστάσεις και συστήματα ισχύος, τα όρια είναι υψηλότερα, ωστόσο πάντα υπό έλεγχο. Οι διακόπτες διαρροής (Residual Current Devices, RCD) ενεργοποιούνται συνήθως όταν ανιχνεύσουν ρεύμα διαρροής 30 mA, τιμή που έχει επιλεγεί ώστε να προστατεύει από ηλεκτροπληξία χωρίς να προκαλεί ανεπιθύμητες αποζεύξεις σε κανονική λειτουργία. Σε εγκαταστάσεις προστασίας εξοπλισμού (όχι ανθρώπων), μπορούν να χρησιμοποιηθούν RCD των 100 mA ή 300 mA, ανάλογα με την εφαρμογή. Αξίζει να σημειωθεί ότι το ρεύμα διαρροής εξαρτάται άμεσα από την αντίσταση μόνωσης των καλωδίων και των συσκευών. Για παράδειγμα, μια αντίσταση μόνωσης 1 MΩ υπό τάση 230 V συνεπάγεται ρεύμα διαρροής 230 μA, τιμή εντός ασφαλών ορίων. Αν η αντίσταση πέσει στα 100 kΩ, το ρεύμα διαρροής ανεβαίνει στα 2,3 mA, τιμή ήδη ανησυχητική. Επομένως, η περιοδική μέτρηση της αντίστασης μόνωσης σε τιμές πάνω από 1 MΩ ανά αγωγό θεωρείται ελάχιστη προϋπόθεση ασφαλούς λειτουργίας [6] , [8] , [14] .

Το κύκλωμα διαρροής ρεύματος που αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία έχει σχεδιαστεί για να εκτελεί ακριβώς αυτού του τύπου τις μετρήσεις, εφαρμόζοντας τάσεις 500 V και 1000 V και υπολογίζοντας τη σχέση $R = V/I$. Έτσι, μπορεί να ελέγξει αν μια εγκατάσταση ή συσκευή πληροί τα πρότυπα ασφαλείας και να εντοπίσει εγκαίρως τυχόν μείωση της μόνωσης που θα οδηγούσε σε επικίνδυνα ρεύματα διαρροής. Με τον τρόπο αυτό, η μέτρηση της αντίστασης μόνωσης δεν είναι απλώς ένα θεωρητικό μέγεθος, αλλά ένα ουσιαστικό εργαλείο πρόληψης ηλεκτροπληξίας, πυρκαγιάς και αστοχίας εξοπλισμού [5] , [7].

Κεφάλαιο 3: Αρχή Λειτουργίας Συσκευής Μέτρησης Διαρροής Ρεύματος

3.1 Βασική αρχή μέτρησης

Η μέτρηση της αντίστασης μόνωσης και του ρεύματος διαρροής βασίζεται στον θεμελιώδη νόμο του Ohm, σύμφωνα με τον οποίο η ηλεκτρική αντίσταση ενός υλικού ισούται με το πηλίκο της εφαρμοζόμενης τάσης προς το ρεύμα που τη διαρρέει:

$$R = \frac{V}{I}$$

Στην πράξη, για να ελεγχθεί η ποιότητα της μόνωσης ενός καλωδίου ή μιας συσκευής, εφαρμόζεται μία γνωστή τάση δοκιμής (V) και μετράται το ρεύμα διαρροής (I) που περνά μέσα από το μονωτικό υλικό. Όσο καλύτερη είναι η μόνωση, τόσο μικρότερο είναι το ρεύμα διαρροής και επομένως τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της αντίστασης. Αντίθετα, η παρουσία υγρασίας, σκόνης ή φθοράς στη μόνωση αυξάνει το ρεύμα διαρροής και μειώνει την αντίσταση [15], [16], [17].

Η συσκευή που μελετάται στην παρούσα πτυχιακή εργασία λειτουργεί ακριβώς με αυτή την αρχή. Ο μικροελεγκτής PIC16F88 ελέγχει τη διαδικασία μέτρησης εφαρμόζοντας δύο προεπιλεγμένες τάσεις δοκιμής: 500 V και 1000 V DC, οι οποίες επιλέγονται από έναν διακόπτη (S1) σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα μέτρησης μόνωσης (IEC 60364 και EN 61557) [3]. Η υψηλή τάση παράγεται από ειδικό κύκλωμα ανύψωσης τάσης (γεννήτρια υψηλής τάσης) που χρησιμοποιεί ταλαντωτή, τρανζίστορ και μετασχηματιστή.

Η τάση αυτή εφαρμόζεται στους ακροδέκτες της συσκευής που συνδέονται με το υπό δοκιμή κύκλωμα ή καλώδιο. Το μικροσκοπικό ρεύμα που διαρρέει τη μόνωση διέρχεται μέσα από μία αντίσταση ακριβείας (shunt resistor), πάνω στην οποία δημιουργείται μία πολύ μικρή πτώση τάσης αναλογική προς το ρεύμα. Αυτή η πτώση ενισχύεται από έναν επιχειρησιακό ενισχυτή LM358, ώστε να μετατραπεί σε μετρήσιμη αναλογική τιμή.

Στη συνέχεια, ο μικροελεγκτής διαβάζει την αναλογική αυτή τάση μέσω του ενσωματωμένου μετατροπέα A/D (ADC) και τη μετατρέπει σε ψηφιακή τιμή. Ακολουθεί υπολογισμός του πραγματικού ρεύματος διαρροής (σε μικροαμπέρ) και κατόπιν υπολογίζεται η αντίσταση μόνωσης (σε μεγαώμ) με τη χρήση μαθηματικών ρουτινών κινητής υποδιαστολής (float math routines) από τη βιβλιοθήκη FPRF24.TXT.

Οι υπολογισμένες τιμές εμφανίζονται στην οθόνη LCD δύο γραμμών, όπου παρουσιάζονται τα εξής δεδομένα:

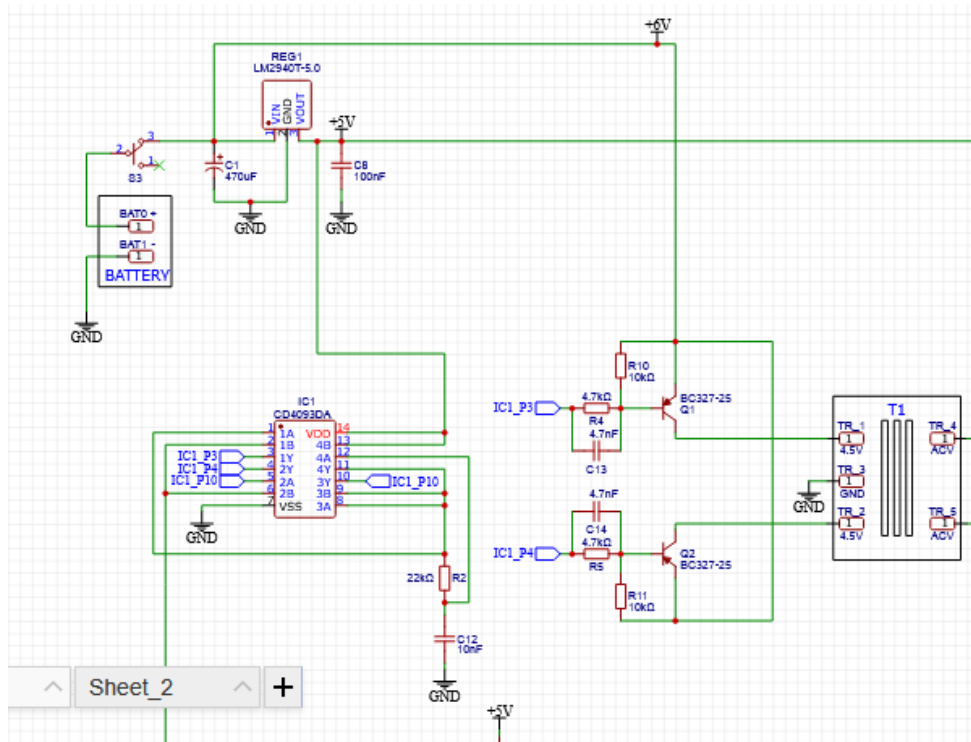
- Η εφαρμοζόμενη τάση δοκιμής (“Test Volts”),
- Το ρεύμα διαρροής σε μικροαμπέρ (“ $I_x = \dots \mu A$ ”),
- Και η υπολογισμένη αντίσταση μόνωσης σε μεγαώμ (“ $R = \dots M\Omega$ ”).

Η μέτρηση πραγματοποιείται συνεχώς, μέσα από τον κύριο βρόχο λειτουργίας του προγράμματος, και οι ενδείξεις ενημερώνονται σε πραγματικό χρόνο. Έτσι, ο χρήστης μπορεί να παρακολουθεί άμεσα τη συμπεριφορά της μόνωσης, είτε πρόκειται για σταθερό δείγμα είτε για κύκλωμα που παρουσιάζει μεταβολές λόγω θερμοκρασίας ή υγρασίας.

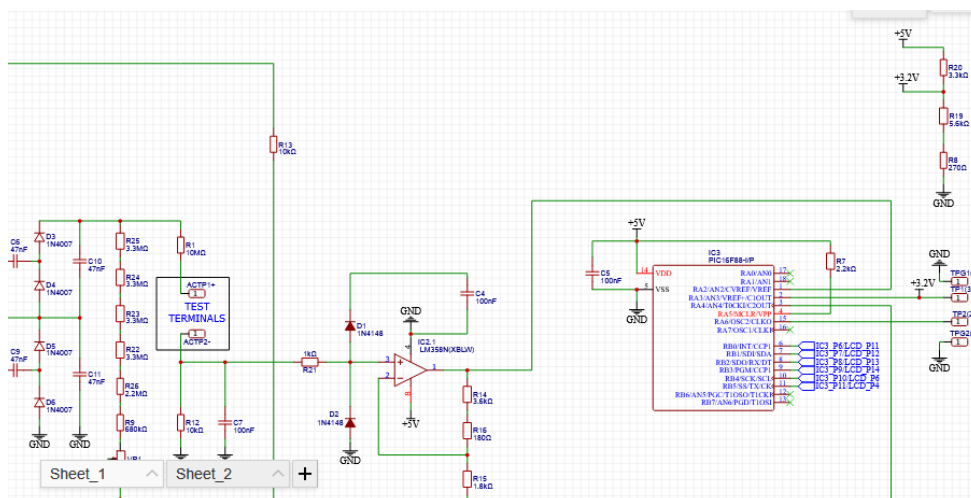
Η αρχή λειτουργίας είναι ίδια με αυτή των επαγγελματικών οργάνων μέτρησης αντίστασης μόνωσης, ωστόσο το κύκλωμα της παρούσας εργασίας υλοποιεί την ίδια διαδικασία με μικρότερο κόστος και εκπαιδευτικό χαρακτήρα, επιτρέποντας πλήρη κατανόηση της ηλεκτρονικής δομής και των υπολογισμών που εκτελεί το όργανο [15].

3.2 Λειτουργικό διάγραμμα της συσκευής

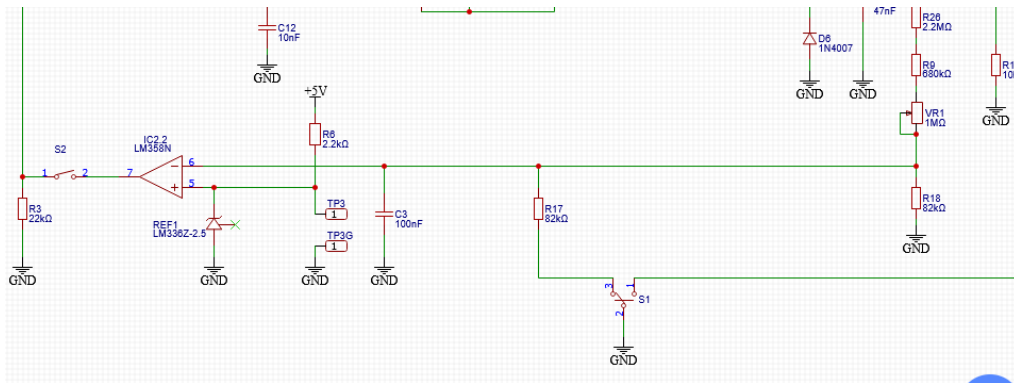
Η συσκευή μέτρησης διαρροής ρεύματος αποτελείται από διακριτές λειτουργικές ενότητες (modules), οι οποίες συνεργάζονται ώστε να πραγματοποιείται η εφαρμογή της τάσης δοκιμής, η μέτρηση του ρεύματος και η απεικόνιση των αποτελεσμάτων. Οι επιμέρους μονάδες συνδέονται σύμφωνα με το συνολικό κύκλωμα που παρουσιάζεται στις επόμενες οι οποίες απεικονίζουν τμήματα του ίδιου ενιαίου συστήματος.



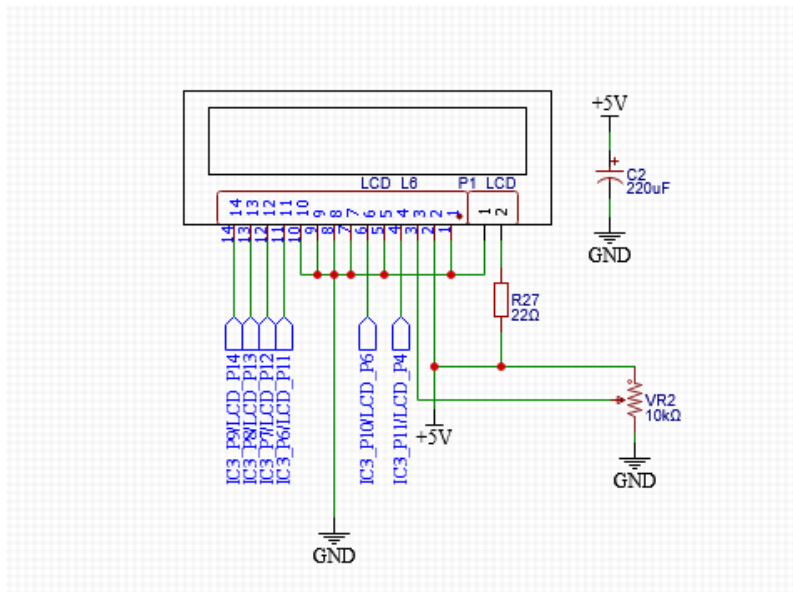
Εικόνα 1: Διάγραμμα - μέρος 1



Εικόνα 2: Διάγραμμα - μέρος 2



Εικόνα 3: Διάγραμμα -μέρος 3



Εικόνα 4: Διάγραμμα - μέρος 4

Το απλουστευμένο λειτουργικό διάγραμμα της συσκευής μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

1. Μονάδα τροφοδοσίας (Power Supply Unit): Τροφοδοτεί το σύστημα με σταθερή τάση +5V μέσω σταθεροποιητή LM2940. Η σταθερή αυτή τάση χρησιμοποιείται για τη λειτουργία του μικροελεγκτή, του ενισχυτή LM358 και της οθόνης LCD. Παράλληλα, μέσω φίλτρων RC απομακρύνονται θόρυβοι και εξασφαλίζεται καθαρή και σταθερή τροφοδοσία σε όλα τα υποκυκλώματα.
2. Γεννήτρια υψηλής τάσης (High Voltage Generator): Το ολοκληρωμένο CD4093 λειτουργεί ως ταλαντωτής Schmitt trigger, οδηγώντας ένα τρανζίστορ NPN που ενεργοποιεί το πρωτεύον τύλιγμα ενός μετασχηματιστή υψηλής τάσης. Στο δευτερεύον παράγεται εναλλασσόμενη τάση, η οποία ανορθώνεται και εξομαλύνεται, αποδίδοντας σταθερό δυναμικό 500 ή 1000 V DC. Η επιλογή της τάσης γίνεται από το διακόπτη S1, ενώ η τιμή αποθηκεύεται ως σημαία (VoltFlag) στον μικροελεγκτή.

3. Κύκλωμα μέτρησης ρεύματος διαρροής (Measurement Circuit): Το ρεύμα που περνά από τη μόνωση οδηγείται μέσα από αντίσταση αναφοράς, παράγοντας αναλογική τάση. Αυτή η τάση ενισχύεται από τον επιχειρησιακό ενισχυτή LM358, ώστε να είναι μετρήσιμη από τον ADC του μικροελεγκτή. Το στάδιο αυτό είναι κρίσιμο, γιατί μετατρέπει ένα εξαιρετικά μικρό ρεύμα (μερικά μA) σε τάση με ακρίβεια και σταθερότητα, χωρίς να επηρεάζει τη μόνωση που μετρείται.
4. Μονάδα μικροελεγκτή (Microcontroller Unit – PIC16F88): Αποτελεί την «καρδιά» της συσκευής. Εκτελεί τις εξής λειτουργίες:
 - Διαβάζει τις τιμές από τον ADC.
 - Υπολογίζει το ρεύμα διαρροής (I_x) και την αντίσταση μόνωσης (R_x) σε $\text{M}\Omega$.
 - Ελέγχει το κύκλωμα υψηλής τάσης και την κατάσταση λειτουργίας της συσκευής.
 - Επικοινωνεί με την οθόνη LCD και ενημερώνει τις ενδείξεις σε πραγματικό χρόνο.
 - Εμφανίζει μηνύματα λάθους (π.χ. "FP Error") σε περίπτωση αριθμητικής υπερχείλισης ή σφάλματος διαίρεσης.
5. Μονάδα απεικόνισης (Display Unit – LCD 2x16): Προβάλλει τις μετρημένες τιμές της τάσης δοκιμής, του ρεύματος διαρροής και της υπολογισμένης αντίστασης. Η επικοινωνία γίνεται σε λειτουργία 4-bit, ώστε να εξοικονομούνται ακροδέκτες του μικροελεγκτή, με την οδήγηση των γραμμών RS, EN και D4–D7.
6. Διακοπές και προστασία: Μετά το τέλος της μέτρησης, οι πυκνωτές υψηλής τάσης εκφορτίζονται μέσω αντιστάσεων αποφόρτισης, ώστε να αποφεύγεται η διατήρηση υπολοίπων τάσεων που θα μπορούσαν να είναι επικίνδυνες για τον χρήστη ή τον εξοπλισμό.

3.3 Εφαρμοζόμενες τάσεις δοκιμής

Η συσκευή μέτρησης διαρροής ρεύματος λειτουργεί με δύο διαφορετικές τάσεις δοκιμής: 500 V DC και 1000 V DC. Οι τιμές αυτές έχουν καθοριστεί σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα IEC 60364 και EN 61557, τα οποία ορίζουν τις τυποποιημένες τάσεις που πρέπει να εφαρμόζονται κατά τη μέτρηση της αντίστασης μόνωσης σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις και συσκευές. Η δυνατότητα επιλογής δύο επιπέδων τάσης καθιστά τη συσκευή κατάλληλη για ευρύ φάσμα

εφαρμογών, τόσο σε οικιακές εγκαταστάσεις χαμηλής τάσης (500V) όσο και σε βιομηχανικά συστήματα ή καλώδια υψηλότερης αντοχής (1000V).

Η παραγωγή αυτών των τάσεων πραγματοποιείται από το κύκλωμα ανύψωσης τάσης (High Voltage Generator), το οποίο φαίνεται στις παραπάνω εικόνες. Το στάδιο αυτό αποτελείται από έναν ταλαντωτή που υλοποιείται με το ολοκληρωμένο CD4093 (τετραπλό NAND Schmitt trigger). Ο ταλαντωτής δημιουργεί ένα τετραγωνικό σήμα υψηλής συχνότητας, το οποίο οδηγεί ένα τρανζίστορ NPN που λειτουργεί ως διακόπτης, ενεργοποιώντας το πρωτεύον τύλιγμα ενός μικρού μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας.

Στο δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή επάγεται μια υψηλή εναλλασσόμενη τάση, η οποία ανορθώνεται με διόδους υψηλής τάσης και εξομαλύνεται με πυκνωτές υψηλής αντοχής ώστε να προκύψει σταθερή συνεχής τάση (DC). Η τελική τιμή της εξόδου καθορίζεται από τον διακόπτη επιλογής S1, ο οποίος αλλάζει την αναλογία των στοιχείων του ανορθωτικού και του μετασχηματιστή, ρυθμίζοντας έτσι το πλάτος της εξόδου στα 500V ή 1000V DC.

Η επιλογή της τάσης δεν επηρεάζει μόνο την έξοδο του κυκλώματος, αλλά λαμβάνεται υπόψη και από το λογισμικό του μικροελεγκτή, ώστε να υπολογίζονται σωστά οι τιμές του ρεύματος διαρροής και της αντίστασης μόνωσης. Στο πρόγραμμα, ο μικροελεγκτής διαβάζει τη λογική κατάσταση της εισόδου RA4, η οποία είναι συνδεδεμένη με τον διακόπτη S1. Αν η είσοδος είναι λογικό 1, σημαίνει ότι έχει επιλεγεί η τάση των 1000V, ενώ αν είναι λογικό 0, αντιστοιχεί στην επιλογή 500V.

Ανάλογα με τη ρύθμιση, το πρόγραμμα θέτει ή καθαρίζει το bit 0 του καταχωρητή VoltFlag, αποθηκεύοντας εσωτερικά την επιλογή τάσης. Παράλληλα, φορτώνει τις αντίστοιχες προκαθορισμένες τιμές κινητής υποδιαστολής που αντιστοιχούν σε 500V ή 1000V στους καταχωρητές TVoltEXP, TVoltB0 και TVoltB1, οι οποίοι χρησιμοποιούνται αργότερα στους υπολογισμούς της αντίστασης $R = V/I$. Τέλος, ενημερώνει τους χαρακτήρες VDigi1 και VDigi2 ώστε η οθόνη LCD να εμφανίζει σωστά “500V” ή “1000V” στην πρώτη γραμμή της.

Η διαδικασία αυτή διασφαλίζει ότι η συσκευή αναγνωρίζει αυτόματα τη ρύθμιση της τάσης και ότι οι μετρήσεις που πραγματοποιεί είναι απόλυτα ακριβείς και σύμφωνες με το επιλεγμένο επίπεδο δοκιμής.

Η ύπαρξη δύο επιπέδων τάσης προσφέρει ευελιξία:

- Με τα 500 V μπορούν να ελεγχθούν μικρές εγκαταστάσεις, ηλεκτρονικά κυκλώματα ή ευαίσθητα καλώδια.
- Με τα 1000 V μπορούν να πραγματοποιηθούν μετρήσεις σε κινητήρες, μονωμένα τυλίγματα, ή εξοπλισμό ισχύος όπου απαιτείται πιο “σκληρός” έλεγχος μόνωσης.

Η επιλογή της κατάλληλης τάσης εξαρτάται επομένως από το είδος του ελεγχόμενου εξοπλισμού και τα πρότυπα ασφαλείας που εφαρμόζονται σε κάθε περίπτωση.

3.4 Ανάλυση λειτουργίας κατά στάδιο

Η συνολική λειτουργία της συσκευής βασίζεται στη συνεργασία τεσσάρων κύριων σταδίων, τα οποία εκτελούν διαδοχικά βήματα από τη δημιουργία της υψηλής τάσης μέχρι την εμφάνιση της τελικής μέτρησης στην οθόνη.

Στάδιο 1: Παραγωγή και εφαρμογή τάσης δοκιμής

Με την ενεργοποίηση της συσκευής, ο μικροελεγκτής εκτελεί τη ρουτίνα Initialise, η οποία ρυθμίζει τα I/O ports, απενεργοποιεί τις περιττές περιφερειακές λειτουργίες (π.χ. UART, CCP), ενεργοποιεί το εσωτερικό ρολόι των 8 MHz, και αρχικοποιεί την οθόνη LCD. Στη συνέχεια, η ρουτίνα SetVolts ανιχνεύει τη θέση του διακόπτη S1 και ρυθμίζει τη συσκευή για λειτουργία στα 500V ή 1000V.

Όταν ξεκινήσει η μέτρηση, το κύκλωμα CD4093 – τρανζίστορ – μετασχηματιστής αρχίζει να ταλαντώνεται, παράγοντας την υψηλή τάση δοκιμής. Η τάση αυτή εφαρμόζεται στο υπό δοκιμή κύκλωμα (Device Under Test – DUT) μέσω ασφαλών ακροδεκτών, με την πολικότητα που ορίζεται από το σχέδιο.

Στάδιο 2: Μέτρηση ρεύματος διαρροής

Το ρεύμα που διαρρέει τη μόνωση του DUT περνά μέσα από την αντίσταση μέτρησης, προκαλώντας πτώση τάσης. Αυτή η τάση οδηγείται στον ενισχυτή LM358, ο οποίος λειτουργεί ως buffer και ενισχυτής χαμηλού θορύβου. Το ενισχυμένο σήμα κατευθύνεται στην είσοδο AN2 (RA2) του μικροελεγκτή PIC16F88, όπου ο μετατροπέας A/D (ADCON0) το ψηφιοποιεί. Η διαδικασία μετατροπής είναι ελεγχόμενη μέσω του bit GO/DONE του καταχωρητή ADCON0. Μόλις ολοκληρωθεί η μετατροπή, το αποτέλεσμα αποθηκεύεται στους καταχωρητές ADRESH και ADRESL και είναι έτοιμο για αριθμητική επεξεργασία.

Στάδιο 3: Υπολογισμός τιμών

Το πρόγραμμα του μικροελεγκτή καλεί τη ρουτίνα ProcessIt, η οποία περιλαμβάνει τα αριθμητικά βήματα υπολογισμού των φυσικών μεγεθών.

- Αρχικά, το αποτέλεσμα του ADC μετατρέπεται σε τιμή κινητής υποδιαστολής (24-bit floating point) με τη ρουτίνα FLO24.
- Έπειτα, διαιρείται με προκαθορισμένο συντελεστή (9.910) για την κλίμακα του ρεύματος διαρροής, ώστε να προκύψει η πραγματική τιμή του ρεύματος I_x σε μικροαμπέρ.
- Το αποτέλεσμα αυτό χρησιμοποιείται ξανά στη διαίρεση με την εφαρμοζόμενη τάση δοκιμής TVolt, για τον υπολογισμό της αντίστασης μόνωσης Rx.
- Αν παρουσιαστεί σφάλμα αριθμητικής υπερχείλισης ή διαίρεσης με το μηδέν, ενεργοποιείται η ρουτίνα Check4FPE που προβάλλει μήνυμα σφάλματος (“FP Error”) στην οθόνη.

Οι υπολογισμένες τιμές I_x και Rx αποθηκεύονται στους αντίστοιχους καταχωρητές (IxEXP, IxB0, IxB1, RxEXP, RxB0, RxB1) και στη συνέχεια μετατρέπονται σε μορφή ASCII ώστε να εμφανιστούν σωστά στην οθόνη.

Στάδιο 4: Εμφάνιση αποτελεσμάτων και επανάληψη

Η ρουτίνα Display2 ενημερώνει την οθόνη LCD με τις νέες τιμές κάθε μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου, εμφανίζοντας:

- Πάνω γραμμή: *Test Volts = 500V / 1000V*
- Κάτω γραμμή: *I_x = ... μ A R = ... M Ω*

Η μέτρηση επαναλαμβάνεται συνεχώς μέσα στον κύριο βρόχο Mainloop, διασφαλίζοντας συνεχή ανανέωση των δεδομένων. Μετά από κάθε πλήρη κύκλο, οι πυκνωτές υψηλής τάσης εκφορτίζονται μέσω αντιστάσεων, ώστε το κύκλωμα να είναι ασφαλές πριν την επόμενη μέτρηση.

Κεφάλαιο 4: Θεωρητικό Υπόβαθρο Εξαρτημάτων και Τεχνολογιών

4.1 Ιστορική αναδρομή των μικροελεγκτών

Οι μικροελεγκτές αποτελούν σήμερα ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία της σύγχρονης ηλεκτρονικής τεχνολογίας, καθώς ενσωματώνουν σε ένα και μόνο ολοκληρωμένο κύκλωμα τη δυνατότητα ελέγχου, επεξεργασίας και επικοινωνίας. Η εξέλιξή τους συνδέεται στενά με την πρόοδο της μικροηλεκτρονικής και της τεχνολογίας των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Οι ρίζες της τεχνολογίας αυτής εντοπίζονται στις αρχές της δεκαετίας του 1970, όταν η εταιρεία Intel παρουσίασε τον πρώτο μικροεπεξεργαστή, τον Intel 4004, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε αρχικά σε αριθμομηχανές. Αν και δεν ήταν ακόμη μικροελεγκτής, αποτέλεσε τη βάση για τη δημιουργία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων που θα συνδύαζαν όχι μόνο επεξεργαστή αλλά και μνήμη και περιφερειακά σε ένα μόνο chip.

Η ιδέα αυτή υλοποιήθηκε σύντομα με τον TMS1000 της Texas Instruments, ο οποίος θεωρείται ο πρώτος μικροελεγκτής στην ιστορία, καθώς ενσωμάτωνε κεντρική μονάδα επεξεργασίας, μνήμη προγράμματος, μνήμη δεδομένων και θύρες εισόδου-εξόδου. Στη δεκαετία του 1980, με την πρόοδο της τεχνολογίας CMOS, η παραγωγή μικροελεγκτών έγινε πιο αποδοτική και οικονομική, οδηγώντας στην εμφάνιση μοντέλων όπως οι Motorola 6805, Intel 8051 και Microchip PIC16C54, που αποτέλεσαν τη βάση για τις μεταγενέστερες γενιές μικροελεγκτών 8-bit. Τα κυκλώματα αυτά βρήκαν εφαρμογή σε βιομηχανικά συστήματα, ηλεκτρικές συσκευές, οχήματα και μετρητικά όργανα, αντικαθιστώντας πολύπλοκα αναλογικά ή λογικά κυκλώματα με ένα μικρό, προγραμματιζόμενο chip.

Καθώς η τεχνολογία προχωρούσε, οι μικροελεγκτές απέκτησαν αυξημένες δυνατότητες. Εμφανίστηκαν οι 16-bit και 32-bit εκδόσεις που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλής ταχύτητας και πολυπλοκότητας, ωστόσο οι 8-bit μικροελεγκτές διατηρούν μέχρι σήμερα κυρίαρχη θέση στις εφαρμογές ελέγχου και μέτρησης, λόγω του χαμηλού κόστους, της ευκολίας προγραμματισμού και της αξιοπιστίας τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η οικογένεια PIC (Peripheral Interface Controller) της εταιρείας Microchip Technology, η οποία παραμένει εξαιρετικά δημοφιλής τόσο στην εκπαίδευση όσο και στη βιομηχανία.

Ο μικροελεγκτής PIC16F88, που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, είναι απόγονος αυτής της τεχνολογικής πορείας. Αποτελεί έναν αντιπροσωπευτικό εκπρόσωπο των μικροελεγκτών γενικής χρήσης, συνδυάζοντας χαμηλή κατανάλωση, ευκολία προγραμματισμού και μεγάλη ευελιξία στις περιφερειακές λειτουργίες του. Η ιστορική εξέλιξη των μικροελεγκτών κατέστησε δυνατή τη δημιουργία συσκευών όπως το κύκλωμα μέτρησης

διαρροής ρεύματος, όπου ένα και μόνο chip μπορεί να διαχειρίζεται πολύπλοκες διεργασίες, να εκτελεί μαθηματικές πράξεις κινητής υποδιαστολής και να παρέχει άμεσα αποτελέσματα μέτρησης σε ψηφιακή μορφή.

4.2 Ο μικροελεγκτής PIC16F88

Ο μικροελεγκτής PIC16F88 είναι ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα 8-bit τύπου RISC (Reduced Instruction Set Computer), σχεδιασμένο για εφαρμογές όπου απαιτείται συνδυασμός απλότητας, αξιοπιστίας και αποδοτικότητας. Η αρχιτεκτονική RISC επιτρέπει την εκτέλεση των περισσότερων εντολών σε έναν μόνο κύκλο μηχανής, γεγονός που εξασφαλίζει υψηλή ταχύτητα και χαμηλή καθυστέρηση. Ο PIC16F88 διαθέτει εσωτερικό ταλαντωτή λειτουργίας στα 8 MHz, 7 Kbytes μνήμη προγράμματος τύπου Flash, 368 bytes RAM και 256 bytes EEPROM για την αποθήκευση δεδομένων. Περιλαμβάνει ακόμη 16 ακροδέκτες εισόδου-εξόδου, έναν μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό (ADC) 10 bit, τρεις χρονομετρητές, συγκριτές, μονάδα PWM, σειριακή επικοινωνία USART και λειτουργίες χαμηλής κατανάλωσης.



Εικόνα 5: PIC16F88

Στην παρούσα εργασία ο μικροελεγκτής λειτουργεί ως κεντρική μονάδα ελέγχου και υπολογισμού. Αναλαμβάνει να μετρήσει το αναλογικό σήμα που αντιστοιχεί στο ρεύμα διαρροής μέσω της εισόδου AN2 (RA2), να το μετατρέψει σε ψηφιακή μορφή με τον ενσωματωμένο ADC, να εκτελέσει τους μαθηματικούς υπολογισμούς για το ρεύμα και την αντίσταση μόνωσης, και να εμφανίσει το αποτέλεσμα στην οθόνη LCD. Παράλληλα, διαχειρίζεται τη θέση του διακόπτη επιλογής τάσης δοκιμής μέσω του RA4, καθορίζοντας εάν η μέτρηση θα πραγματοποιηθεί στα 500V ή 1000V, ενώ μέσω των θυρών RB0 έως RB5 ελέγχει την οθόνη LCD που λειτουργεί σε διάταξη 4-bit.

Το πρόγραμμα που εκτελεί ο μικροελεγκτής έχει γραφεί σε assembly γλώσσα και αξιοποιεί βιβλιοθήκες κινητής υποδιαστολής (FPRF24.TXT), ώστε να πραγματοποιεί ακριβείς πράξεις δεκαδικής αριθμητικής. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η υπολογιστική ακρίβεια που απαιτείται για τη μέτρηση πολύ μικρών ρευμάτων της τάξης των μικροαμπερ και πολύ μεγάλων

αντιστάσεων μόνωσης που φτάνουν τα εκατοντάδες μεγαώμ. Ο μικροελεγκτής αναλαμβάνει επίσης τη διαχείριση σφαλμάτων, όπως η διαίρεση με το μηδέν ή η υπερχείλιση αριθμητικών τιμών, προβάλλοντας στην οθόνη μήνυμα "FP Error" μέσω ειδικής ρουτίνας.

Η αξιοπιστία του PIC16F88, η χαμηλή κατανάλωση και η πληθώρα ενσωματωμένων λειτουργιών τον καθιστούν ιδανικό για εργαστηριακές και βιομηχανικές εφαρμογές όπου απαιτείται αυτόνομη και αποδοτική μονάδα ελέγχου. Στην παρούσα εφαρμογή, ο μικροελεγκτής επιτρέπει τη δημιουργία μιας πλήρως αυτόνομης συσκευής μέτρησης διαρροής ρεύματος, ικανής να υπολογίζει σε πραγματικό χρόνο τις τιμές της μόνωσης και να τις προβάλλει άμεσα στον χρήστη, εξασφαλίζοντας ακρίβεια και ασφάλεια στη μέτρηση.

4.3 Αντιστάσεις

Οι αντιστάσεις αποτελούν από τα πιο βασικά και ευρέως χρησιμοποιούμενα ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Ο ρόλος τους είναι να περιορίζουν τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος και να προκαλούν πτώση τάσης σύμφωνα με τον νόμο του Ωμ, $V = I \cdot R$. Παράλληλα χρησιμοποιούνται για τη διαίρεση τάσης, τον καθορισμό σημείων αναφοράς, την προστασία ευαίσθητων εξαρτημάτων και τον έλεγχο της ροής ρεύματος σε κυκλώματα μέτρησης και ανίχνευσης. Η ηλεκτρική αντίσταση ενός αγωγού εξαρτάται από τη φύση του υλικού του, το μήκος και τη διατομή του, σύμφωνα με τη σχέση $R = \rho \frac{L}{A}$, όπου ρ είναι η ειδική αντίσταση του υλικού.



Εικόνα 6: Αντιστάσεις

Οι αντιστάσεις διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τη λειτουργία και την τεχνολογία κατασκευής τους. Οι σταθερές αντιστάσεις είναι οι πιο κοινές και χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται μια σταθερή τιμή αντίστασης. Μπορεί να είναι κατασκευασμένες από υμένιο άνθρακα, μεταλλικό υμένιο ή περιελιγμένο σύρμα, με τις

τελευταίες να χρησιμοποιούνται κυρίως για υψηλά ρεύματα και ισχύ. Οι μεταβλητές αντιστάσεις (ποτενσιόμετρα και trimmers) επιτρέπουν τη ρύθμιση της τιμής της αντίστασης μέσω ενός κινητού δρομέα, ενώ οι ειδικές αντιστάσεις όπως τα θερμίστορ και τα φωτοαντιστάσεις (LDR) μεταβάλλουν τη συμπεριφορά τους ανάλογα με τη θερμοκρασία ή το φως αντίστοιχα.

Στο κύκλωμα της παρούσας συσκευής, οι αντιστάσεις διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην ακρίβεια και ασφάλεια της μέτρησης. Στο στάδιο μέτρησης του ρεύματος διαρροής χρησιμοποιείται μία αντίσταση ακριβείας (shunt) μεγάλης τιμής, μέσω της οποίας μετράται η πτώση τάσης που αντιστοιχεί στο ρεύμα διαρροής. Η τιμή αυτής της αντίστασης καθορίζει την ευαισθησία και την ακρίβεια του κυκλώματος. Επιπλέον, στο κύκλωμα υψηλής τάσης χρησιμοποιούνται αντιστάσεις υψηλής τιμής (Megaohm range) για τον περιορισμό του ρεύματος και την προστασία των ευαίσθητων στοιχείων, ενώ μετά τη μέτρηση, αντιστάσεις αποφόρτισης επιτρέπουν την ασφαλή εκφόρτιση των πυκνωτών ώστε να μην παραμένει επικίνδυνη τάση στο κύκλωμα.

Η ονομαστική τιμή, η ανοχή και η ισχύς διάχυσης αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους για την επιλογή των αντιστάσεων. Στην παρούσα κατασκευή χρησιμοποιούνται κυρίως αντιστάσεις μεταλλικού υμενίου υψηλής ακριβείας και χαμηλού θορύβου, ώστε να εξασφαλίζεται η σταθερότητα των μετρήσεων και η επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων. Η σωστή επιλογή αντιστάσεων είναι θεμελιώδης για τη λειτουργία της συσκευής, καθώς ακόμη και μικρές αποκλίσεις στην τιμή τους μπορεί να επηρεάσουν την ακρίβεια των υπολογισμών του μικροελεγκτή και, κατά συνέπεια, την αξιοπιστία της τελικής μέτρησης.

4.4 Πυκνωτές

Οι πυκνωτές (capacitors) αποτελούν ένα από τα πιο θεμελιώδη παθητικά στοιχεία της ηλεκτρονικής. Ο βασικός τους ρόλος είναι η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας υπό μορφή ηλεκτρικού πεδίου ανάμεσα σε δύο αγώγιμες πλάκες που διαχωρίζονται από ένα μονωτικό υλικό (διηλεκτρικό). Η ικανότητα ενός πυκνωτή να αποθηκεύει φορτίο εκφράζεται από τη χωρητικότητα (C), η οποία μετριέται σε Farad (F) και υπολογίζεται από τη σχέση $C = \epsilon \frac{A}{d}$, όπου ϵ είναι η διηλεκτρική σταθερά του υλικού, A η επιφάνεια των πλακών και d η απόσταση μεταξύ τους.

Στα ηλεκτρονικά κυκλώματα, οι πυκνωτές χρησιμοποιούνται σε ένα πλήθος εφαρμογών, όπως στη σταθεροποίηση της τροφοδοσίας, στο φιλτράρισμα σημάτων, στη σύζευξη και αποσύζευξη σταδίων και στη χρονική καθυστέρηση. Στην παρούσα κατασκευή, ο ρόλος των πυκνωτών είναι διπλός: αφενός εξασφαλίζουν τη σταθερότητα της χαμηλής τάσης τροφοδοσίας των 5V

που χρησιμοποιεί ο μικροελεγκτής PIC16F88, και αφετέρου εξομαλύνουν και σταθεροποιούν την υψηλή τάση εξόδου των 500V ή 1000V DC, η οποία προέρχεται από το κύκλωμα ανόρθωσης.

Στην είσοδο της τροφοδοσίας, χρησιμοποιούνται ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές μεγάλης χωρητικότητας (π.χ. 470 μF ή 1000 μF) σε συνδυασμό με κεραμικούς πυκνωτές μικρής τιμής. Οι ηλεκτρολυτικοί αποθηκεύουν φορτίο και εξομαλύνουν τις διακυμάνσεις της τάσης, ενώ οι κεραμικοί λειτουργούν ως φίλτρα υψηλών συχνοτήτων, αποκόπτοντας παρεμβολές και αιχμές θορύβου που μπορεί να επηρεάσουν τη λειτουργία του μικροελεγκτή.



Εικόνα 7: Κεραμικός Πυκνωτής

Στο στάδιο ανόρθωσης της υψηλής τάσης, χρησιμοποιούνται πυκνωτές υψηλής αντοχής (HV capacitors), οι οποίοι φορτίζονται από το ανορθωμένο σήμα που παράγεται από το κύκλωμα του CD4093 και του μετασχηματιστή. Αυτοί οι πυκνωτές εξομαλύνουν την κυματομορφή της τάσης, παρέχοντας σταθερή συνεχή έξοδο στα 500 ή 1000V. Η σταθερότητα αυτή είναι κρίσιμη, καθώς διασφαλίζει ότι η εφαρμοζόμενη τάση στο υπό δοκιμή δείγμα παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της μέτρησης, ώστε ο υπολογισμός της αντίστασης μόνωσης να είναι ακριβής.

Επιπλέον, στο κύκλωμα μέτρησης συναντώνται πυκνωτές μικρής τιμής, τοποθετημένοι στις εισόδους του LM358, με σκοπό τη σταθεροποίηση και αποκοπή παρεμβολών που θα μπορούσαν να προκαλέσουν ψευδείς μετρήσεις στο αναλογικό σήμα. Τέλος, μετά τη μέτρηση, οι πυκνωτές της υψηλής τάσης εκφορτίζονται σταδιακά μέσω αντιστάσεων αποφόρτισης, ώστε να αποφεύγεται η παραμονή επικίνδυνης τάσης στο κύκλωμα. Η σωστή επιλογή τύπου και χωρητικότητας πυκνωτών είναι ουσιώδης για τη σταθερή λειτουργία και ασφάλεια του συστήματος, καθώς τόσο η σταθερότητα της τροφοδοσίας όσο και η ακρίβεια της υψηλής τάσης εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη συμπεριφορά τους.



Εικόνα 8: Πυκνωτής MKT

4.5 Δίοδοι

Οι δίοδοι (diodes) είναι ημιαγωγικά στοιχεία που επιτρέπουν τη ροή του ρεύματος μόνο προς μία κατεύθυνση, από την άνοδο προς την κάθοδο. Αυτή η ιδιότητα ονομάζεται μονοδρόμηση και καθιστά τις διόδους απαραίτητες σε πλήθος ηλεκτρονικών εφαρμογών, όπως στην ανόρθωση, τη σταθεροποίηση τάσης, την απομόνωση και την προστασία κυκλωμάτων.

Η λειτουργία τους βασίζεται στη δίοδο επαφής p-n, όπου η περιοχή τύπου p περιέχει φορείς θετικού φορτίου (οπές), ενώ η περιοχή τύπου n φορείς αρνητικού φορτίου (ηλεκτρόνια). Όταν η άνοδος έχει θετικό δυναμικό ως προς την κάθοδο, η δίοδος πολώνεται ορθά και άγει ρεύμα. Όταν η πολικότητα αντιστραφεί, η δίοδος πολώνεται ανάστροφα και εμποδίζει τη ροή του ρεύματος, εκτός αν ξεπεραστεί η τάση διάσπασης.



Εικόνα 9: Δίοδος

Στην παρούσα κατασκευή, οι δίοδοι παίζουν κρίσιμο ρόλο στη διαμόρφωση της υψηλής τάσης που απαιτείται για τη μέτρηση της αντίστασης μόνωσης. Συγκεκριμένα, μετά τον μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας που οδηγείται από το CD4093 και το τρανζίστορ, το παραγόμενο εναλλασσόμενο σήμα ανορθώνεται με τη χρήση διόδων υψηλής αντοχής, ώστε να προκύψει σταθερή συνεχής τάση (DC) στα 500 ή 1000V. Οι δίοδοι αυτές είναι συνδεδεμένες σε διάταξη ανόρθωσης πλήρους κύματος, διασφαλίζοντας ότι και τα δύο ημιπερίοδα του σήματος συμβάλλουν στη φόρτιση των πυκνωτών εξομάλυνσης.

Επιπλέον, στο χαμηλό κύκλωμα τροφοδοσίας και μέτρησης, χρησιμοποιούνται δίοδοι πυριτίου για αντίστροφη προστασία από λανθασμένη πολικότητα τροφοδοσίας, καθώς και για απομόνωση σημάτων μεταξύ σταδίων. Η παρουσία των διόδων είναι απαραίτητη για την ασφάλεια τόσο του μικροελεγκτή όσο και του αναλογικού σταδίου, αφού εμποδίζουν την επιστροφή ρευμάτων ή τάσεων που θα μπορούσαν να προκαλέσουν καταστροφή εξαρτημάτων.

Στην περιοχή μέτρησης και σταθεροποίησης της υψηλής τάσης μπορεί να χρησιμοποιούνται επίσης Zener διόδου, οι οποίες επιτρέπουν τη διατήρηση σταθερής τάσης εξόδου, λειτουργώντας ως στοιχείο αναφοράς. Έτσι, το σύστημα εξασφαλίζει ότι η εφαρμοζόμενη τάση μένει σταθερή στα 500 ή 1000V, ανεξάρτητα από μικρές διακυμάνσεις της τροφοδοσίας ή του φορτίου.

Οι διόδου, επομένως, εξασφαλίζουν τη σωστή διαμόρφωση, σταθεροποίηση και προστασία του κυκλώματος, συνεισφέροντας καθοριστικά στην ασφαλή λειτουργία του μετρητικού οργάνου. Η επιλογή τους πρέπει να λαμβάνει υπόψη την τάση διάσπασης, το ρεύμα αγωγής και τη συχνότητα λειτουργίας, ώστε να ανταποκρίνονται πλήρως στις απαιτήσεις της συγκεκριμένης εφαρμογής.

4.6 Τρανζίστορ BC327

Τα τρανζίστορ αποτελούν τα πιο θεμελιώδη ενεργά στοιχεία της ηλεκτρονικής, καθώς επιτρέπουν την ενίσχυση και τον έλεγχο του ηλεκτρικού ρεύματος. Το BC327 είναι τρανζίστορ τύπου NPN γενικής χρήσης, τα οποία χρησιμοποιούνται εκτενώς σε κυκλώματα ενίσχυσης και διακοπής. Στη δομή τους περιλαμβάνουν τρεις περιοχές ημιαγωγών – εκπομπό (E), βάση (B) και συλλέκτη (C) – και λειτουργούν με βάση την αρχή ότι ένα μικρό ρεύμα στη βάση μπορεί να ελέγξει ένα πολύ μεγαλύτερο ρεύμα στον συλλέκτη.



Εικόνα 10: BJ327

Στην παρούσα συσκευή, τα τρανζίστορ αυτά χρησιμοποιούνται κυρίως ως διακόπτες ισχύος για την οδήγηση του μετασχηματιστή υψηλής τάσης. Το σήμα ταλάντωσης που παράγεται από το ολοκληρωμένο κύκλωμα CD4093 εφαρμόζεται στη βάση του τρανζίστορ, το οποίο ενεργοποιείται και απενεργοποιείται περιοδικά, οδηγώντας έτσι το πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή. Η λειτουργία αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου, από το οποίο επάγεται στο δευτερεύον τύλιγμα η υψηλή τάση που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της μόνωσης.

Τα τρανζίστορ αυτά είναι κατάλληλα για αυτή την εφαρμογή, καθώς διαθέτουν υψηλό συντελεστή ενίσχυσης ρεύματος, χαμηλό ρεύμα βάσης και ταχεία απόκριση. Η χρήση τους ως διακόπτες, σε συνδυασμό με τον ταλαντωτή του CD4093, επιτρέπει τη μετατροπή της χαμηλής συνεχούς τάσης των 5V σε εναλλασσόμενο σήμα υψηλής συχνότητας, το οποίο κατόπιν μετασχηματίζεται και ανυψώνεται σε επίπεδα εκατοντάδων βολτ.

Εκτός από το στάδιο ισχύος, τα τρανζίστορ μπορούν επίσης να λειτουργούν ως ενισχυτές σήματος ή στάδια οδήγησης, ανάλογα με το σημείο λειτουργίας τους (active region ή saturation/cutoff). Στην παρούσα συσκευή, λειτουργούν κυρίως στο κόρο και αποκοπή (saturation–cutoff), όπου χρησιμοποιούνται σαν ηλεκτρονικοί διακόπτες, εξασφαλίζοντας ταχεία μεταγωγή και μικρές απώλειες ισχύος.

Η σωστή πολικότητα, η ύπαρξη αντιστάσεων βάσης για τον περιορισμό του ρεύματος και η προστασία του συλλέκτη από υπερτάσεις αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους για την ασφαλή λειτουργία των τρανζίστορ. Η συνεργασία των BC327 με το CD4093 αποτελεί το βασικό στοιχείο για την παραγωγή και διαμόρφωση της υψηλής τάσης, επιτρέποντας στη συσκευή να εφαρμόζει σταθερά και ελεγχόμενα τα 500 ή 1000V στο υπό δοκιμή κύκλωμα.

4.7 Ενισχυτής LM358

Ο LM358 είναι ένας διπλός επιχειρησιακός ενισχυτής (dual operational amplifier) χαμηλής ισχύος, σχεδιασμένος για χρήση με μονή τροφοδοσία και ιδιαίτερα κατάλληλος για εφαρμογές μέτρησης, φίλτρα και αναλογικές επεξεργασίες. Ανήκει στην οικογένεια των ενισχυτών γενικής χρήσης, που χαρακτηρίζονται από μεγάλη σταθερότητα, χαμηλό θόρυβο και ικανότητα λειτουργίας σε ευρύ φάσμα τάσεων, από 3 έως 32 V.

Σε αντίθεση με τους κλασικούς επιχειρησιακούς ενισχυτές (όπως ο 741), ο LM358 μπορεί να λειτουργήσει με μονή τροφοδοσία (single supply), χωρίς την ανάγκη αρνητικής τάσης, γεγονός που τον καθιστά ιδανικό για κυκλώματα όπου το διαθέσιμο τροφοδοτικό είναι μόνο +5V, όπως στην παρούσα εφαρμογή. Επιπλέον, η είσοδος και η έξοδος του μπορούν να φτάσουν πολύ κοντά στο δυναμικό του αρνητικού πόλου (ground), διευκολύνοντας την ακριβή μέτρηση χαμηλών σημάτων.



Εικόνα 11: LM358

Στο κύκλωμα της συσκευής μέτρησης διαρροής ρεύματος, ο LM358 χρησιμοποιείται στο στάδιο μέτρησης και ενίσχυσης του σήματος. Το μικρό ρεύμα που ρέει μέσω της αντίστασης μέτρησης (shunt) προκαλεί πτώση τάσης μερικών mV, η οποία ενισχύεται από τον LM358, ώστε να αποκτήσει επαρκές πλάτος για να μετρηθεί αξιόπιστα από τον μετατροπέα A/D του μικροελεγκτή PIC16F88. Η έξοδος του ενισχυτή συνδέεται στην είσοδο AN2 (RA2) του μικροελεγκτή, επιτρέποντας την ακριβή δειγματοληψία της αναλογικής τιμής.

Η διάταξη του LM358 στο κύκλωμα είναι συνήθως μη αναστρέφουσα (non-inverting), ώστε το σήμα στην έξοδο να διατηρεί την ίδια πολικότητα με το σήμα εισόδου. Η ενίσχυση καθορίζεται από τη σχέση $A_v = 1 + \frac{R_f}{R_{in}}$, όπου R_f είναι η αντίσταση ανατροφοδότησης και R_{in} η αντίσταση εισόδου. Η επιλογή των τιμών αυτών καθορίζει την ευαισθησία του συστήματος και εξασφαλίζει ότι ακόμη και πολύ μικρές διαφορές ρεύματος διαρροής μετατρέπονται σε μετρήσιμη τάση.

Ο LM358, λόγω του χαμηλού θορύβου και της μεγάλης σταθερότητάς του, συμβάλλει ουσιαστικά στην ακρίβεια των μετρήσεων. Παράλληλα, η κατανάλωση ρεύματος του κυκλώματος παραμένει χαμηλή, κάτι που είναι σημαντικό για τη συνολική ενεργειακή απόδοση της συσκευής. Τέλος, η σωστή παράκαμψη της τροφοδοσίας του ενισχυτή με μικρούς κεραμικούς πυκνωτές βοηθά στη μείωση παρεμβολών και στη σταθερή λειτουργία του συστήματος.

4.8 Ταλαντωτής Schmitt Trigger CD4093

Το ολοκληρωμένο κύκλωμα CD4093 αποτελείται από τέσσερις λογικές πύλες NAND τύπου Schmitt Trigger, και χρησιμοποιείται εκτεταμένα σε κυκλώματα ταλάντωσης, χρονισμού και μεταγωγής. Ο χαρακτηρισμός Schmitt Trigger υποδηλώνει ότι κάθε πύλη διαθέτει υστερητική είσοδο, δηλαδή ένα κατώφλι ενεργοποίησης και ένα διαφορετικό κατώφλι απενεργοποίησης,

γεγονός που εξασφαλίζει σταθερή λειτουργία ακόμη και σε περιπτώσεις θορυβωδών σημάτων ή αργών μεταβολών τάσης.



Εικόνα 12: CD4093

Στην παρούσα συσκευή, το CD4093 λειτουργεί ως ταλαντωτής παραγωγής παλμών υψηλής συχνότητας, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την οδήγηση του μετασχηματιστή ανύψωσης τάσης. Με τη χρήση μιας μόνο πύλης, ενός πυκνωτή και μιας αντίστασης σχηματίζεται ένα RC κύκλωμα που καθορίζει τη συχνότητα ταλάντωσης. Ο πυκνωτής φορτίζεται και εκφορτίζεται περιοδικά μέσω της αντίστασης, και κάθε φορά που η τάση του ξεπερνά τα όρια του Schmitt Trigger, η έξοδος αλλάζει κατάσταση, δημιουργώντας τετραγωνικούς παλμούς.

Οι παλμοί αυτοί εφαρμόζονται στη βάση του τρανζίστορ BC327, το οποίο ενεργοποιεί και απενεργοποιεί το πρωτεύον του μετασχηματιστή. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο στο μετασχηματιστή, το οποίο προκαλεί την επαγωγή υψηλής τάσης στο δευτερεύον τύλιγμα. Η τάση αυτή ανορθώνεται και εξομαλύνεται, παρέχοντας τα 500 ή 1000V που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της μόνωσης.

Η επιλογή του CD4093 για αυτή την εφαρμογή είναι ιδιαίτερα επιτυχής, καθώς εξασφαλίζει σταθερή συχνότητα λειτουργίας, χαμηλή κατανάλωση και αντοχή σε μεταβολές τάσης. Ο ταλαντωτής που σχηματίζεται με το CD4093 είναι απλός, αξιόπιστος και δεν απαιτεί εξωτερικά πολύπλοκα στοιχεία, ενώ η υστερητική του συμπεριφορά εξασφαλίζει καθαρούς παλμούς χωρίς τυχαίες μεταβάσεις.

Η συχνότητα λειτουργίας καθορίζεται από τη γνωστή σχέση $f \approx \frac{1}{1.4 \cdot R \cdot C}$, όπου R και C είναι τα στοιχεία του RC κυκλώματος. Με κατάλληλη επιλογή τιμών, η συχνότητα μπορεί να ρυθμιστεί σε μερικά kHz, επιτυγχάνοντας την επιθυμητή λειτουργία του μετασχηματιστή.

4.9 Σταθεροποιητής LM2940

Ο LM2940 είναι ένας γραμμικός σταθεροποιητής τάσης (voltage regulator) χαμηλής πτώσης (Low Dropout – LDO), σχεδιασμένος για να παρέχει σταθερή τάση εξόδου 5V ακόμη και όταν η τάση εισόδου βρίσκεται πολύ κοντά στην τιμή αυτή. Πρόκειται για στοιχείο μεγάλης

αξιοπιστίας, κατάλληλο για την τροφοδοσία ευαίσθητων ψηφιακών κυκλωμάτων όπως οι μικροελεγκτές.

Στη συγκεκριμένη κατασκευή, ο LM2940 αποτελεί το βασικό στοιχείο του κυκλώματος τροφοδοσίας, εξασφαλίζοντας σταθερή τάση +5V DC για τον μικροελεγκτή PIC16F88, τον LM358 και την οθόνη LCD. Η είσοδος του λαμβάνει την ασταθή τάση από την πηγή (συνήθως 9–12V DC) και μέσω εσωτερικού κυκλώματος ρύθμισης διατηρεί την έξοδο σταθερή στα 5V, ανεξάρτητα από διακυμάνσεις φορτίου ή θερμοκρασίας.



Εικόνα 13: LM2940

Ο LM2940 ξεχωρίζει από άλλους ρυθμιστές όπως ο 7805 λόγω της χαμηλής πτώσης τάσης εξόδου, που σημαίνει ότι μπορεί να παρέχει 5V ακόμη και όταν η είσοδος πέσει στα 5.5V. Επιπλέον, διαθέτει προστασία από υπερθέρμανση και βραχυκύκλωμα, καθιστώντας τη λειτουργία του κυκλώματος ιδιαίτερα ασφαλή. Για τη σωστή λειτουργία του απαιτείται η τοποθέτηση πυκνωτών παράκαμψης στην είσοδο και την έξοδο. Συνήθως χρησιμοποιείται ένας ηλεκτρολυτικός πυκνωτής 470 μF στην είσοδο για φιλτράρισμα και ένας 100 μF στην έξοδο για σταθεροποίηση, σε συνδυασμό με μικρούς κεραμικούς πυκνωτές για απόρριψη θορύβου υψηλής συχνότητας.

Χάρη στον LM2940, η συσκευή διαθέτει σταθερή και καθαρή τροφοδοσία, απαλλαγμένη από αιχμές και παρεμβολές, γεγονός που εξασφαλίζει αξιόπιστη λειτουργία τόσο του μικροελεγκτή όσο και των αναλογικών σταδίων μέτρησης. Η επιλογή σταθεροποιητή χαμηλής πτώσης είναι ιδανική για φορητές εφαρμογές ή περιπτώσεις όπου η πηγή τάσης μπορεί να παρουσιάζει μικρές μεταβολές.

4.10 Οθόνη LCD 2×16

Η οθόνη LCD (Liquid Crystal Display) 2×16 είναι μία από τις πιο διαδεδομένες μορφές απεικόνισης σε μικροελεγκτικά συστήματα, καθώς επιτρέπει την εμφάνιση πληροφοριών με ελάχιστο αριθμό ακροδεκτών και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Αποτελείται από δύο γραμμές των δεκαέξι χαρακτήρων η καθεμία, οι οποίοι σχηματίζονται από πίνακες υγρών κρυστάλλων που αλλάζουν οπτική διαπερατότητα υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου.

Η LCD που χρησιμοποιείται στη συσκευή λειτουργεί σε λειτουργία 4-bit, κάτι που σημαίνει ότι για τη μεταφορά δεδομένων χρησιμοποιούνται μόνο τέσσερις γραμμές δεδομένων αντί για οκτώ. Με τον τρόπο αυτό εξοικονομούνται ακροδέκτες του μικροελεγκτή, χωρίς να επηρεάζεται η λειτουργικότητα της οθόνης. Τα δεδομένα και οι εντολές αποστέλλονται σε δύο ημι-νύμπλ (nibbles), πρώτα τα τέσσερα πιο σημαντικά bits (MSB) και στη συνέχεια τα τέσσερα λιγότερο σημαντικά (LSB).



Εικόνα 14: LCD

Ο μικροελεγκτής PIC16F88 ελέγχει την οθόνη μέσω των ακροδεκτών RS (Register Select), EN (Enable) και των γραμμών D4–D7, οι οποίοι συνδέονται στα pins του PORTB. Το λογισμικό περιλαμβάνει ειδικές ρουτίνες αρχικοποίησης και αποστολής δεδομένων, ώστε να εξασφαλίζεται ο σωστός χρονισμός και η ανανέωση της οθόνης.

Η πρώτη γραμμή της LCD χρησιμοποιείται για την απεικόνιση της εφαρμοζόμενης τάσης δοκιμής (500V ή 1000V), ενώ η δεύτερη γραμμή προβάλλει τις μετρούμενες τιμές του ρεύματος διαρροής (I_x) και της αντίστασης μόνωσης (R_x). Το πρόγραμμα ενημερώνει την οθόνη σε τακτά χρονικά διαστήματα μέσω της ρουτίνας “Display2”, παρέχοντας στον χρήστη συνεχή πληροφόρηση για την κατάσταση του υπό δοκιμή κυκλώματος.

Η λειτουργία της LCD βασίζεται στη χρήση εσωτερικού ελεγκτή (συνήθως τύπου HD44780), ο οποίος λαμβάνει τις εντολές και τα δεδομένα από τον μικροελεγκτή και τα μετατρέπει σε ενεργοποίηση των αντίστοιχων pixel. Η χαμηλή κατανάλωση, η ευκολία οδήγησης και η καθαρή απεικόνιση καθιστούν την LCD 2×16 ιδανική επιλογή για τη συγκεκριμένη συσκευή, καθώς παρέχει άμεση και ευανάγνωστη ένδειξη χωρίς την ανάγκη εξωτερικού εξοπλισμού ή υπολογιστή.

Κεφάλαιο 5: Σχεδίαση και Ανάπτυξη του Κυκλώματος

5.1 Γενική περιγραφή του συστήματος

Η συσκευή που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας πτυχιακής εργασίας έχει ως στόχο τη μέτρηση του ρεύματος διαρροής και της αντίστασης μόνωσης ηλεκτρικών εγκαταστάσεων ή συσκευών, εφαρμόζοντας μια τάση δοκιμής 500 ή 1000 Volt DC σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα ασφαλείας. Το κύκλωμα σχεδιάστηκε ώστε να λειτουργεί αυτόνομα, με δυνατότητα ψηφιακής ένδειξης των αποτελεσμάτων μέσω οθόνης LCD 2×16, χωρίς την ανάγκη εξωτερικού υπολογιστή ή πρόσθετων οργάνων.

Η αρχή λειτουργίας της συσκευής βασίζεται στην εφαρμογή μιας γνωστής τάσης υψηλής τιμής (500V ή 1000V) στο υπό δοκιμή κύκλωμα (DUT – Device Under Test), και στη μέτρηση του πολύ μικρού ρεύματος που διαρρέει τη μόνωση. Με βάση τη θεμελιώδη σχέση $R = \frac{V}{I}$, ο μικροελεγκτής υπολογίζει την αντίσταση μόνωσης και την εμφανίζει σε μονάδες ΜΩ, ενώ παράλληλα υπολογίζει και την τιμή του ρεύματος διαρροής σε μΑ.

Η συσκευή αποτελείται από τέσσερα κύρια υποσυστήματα:

1. Το κύκλωμα τροφοδοσίας και σταθεροποίησης, που παρέχει σταθερή τάση 5V για τον μικροελεγκτή και τα υπόλοιπα χαμηλόβαθμα στάδια. Η σταθεροποίηση επιτυγχάνεται μέσω του ολοκληρωμένου σταθεροποιητή LM2940, με φίλτρα πυκνωτών για εξομάλυνση και προστασία.
2. Το κύκλωμα παραγωγής υψηλής τάσης, το οποίο βασίζεται στο ολοκληρωμένο CD4093 σε διάταξη ταλαντωτή Schmitt Trigger. Μέσω RC κυκλώματος παράγονται παλμοί που οδηγούν το τρανζίστορ BC547, το οποίο ενεργοποιεί τον μετασχηματιστή ανύψωσης τάσης. Η έξοδος του μετασχηματιστή ανορθώνεται με διόδους υψηλής αντοχής και σταθεροποιείται με πυκνωτές, αποδίδοντας σταθερή DC τάση 500 ή 1000V, ανάλογα με τη θέση του διακόπτη επιλογής.
3. Το κύκλωμα μέτρησης ρεύματος διαρροής, το οποίο περιλαμβάνει την αντίσταση μέτρησης (shunt) και τον επιχειρησιακό ενισχυτή LM358. Το πολύ μικρό ρεύμα που διαρρέει τη μόνωση μετατρέπεται σε πτώση τάσης πάνω στην αντίσταση και ενισχύεται από τον LM358, ώστε να είναι μετρήσιμο από τον μετατροπέα A/D του μικροελεγκτή.
4. Τη μονάδα επεξεργασίας και απεικόνισης, η οποία βασίζεται στον μικροελεγκτή PIC16F88. Ο μικροελεγκτής δειγματοληπτεί την αναλογική τάση, υπολογίζει το ρεύμα

και την αντίσταση χρησιμοποιώντας ρουτίνες κινητής υποδιαστολής, και προβάλλει τα αποτελέσματα στην οθόνη LCD 2×16 σε μορφή “ $I_x = \dots \mu A$ $R = \dots M\Omega$ ”.

Ο μικροελεγκτής αποτελεί το κεντρικό σημείο ελέγχου ολόκληρου του συστήματος. Ο κώδικάς του, γραμμένος σε γλώσσα assembly, περιλαμβάνει ρουτίνες για την αρχικοποίηση, την ανάγνωση αναλογικών σημάτων, τον μαθηματικό υπολογισμό των τιμών και την απεικόνιση των αποτελεσμάτων στην οθόνη. Μέσω του διακόπτη S1, ο χρήστης επιλέγει την επιθυμητή τάση δοκιμής, η οποία ανιχνεύεται από την είσοδο RA4 του PIC16F88, ώστε το λογισμικό να ρυθμίσει ανάλογα τις σταθερές υπολογισμού.

Η πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (PCB) υλοποιήθηκε με προσεκτική διάταξη για την απομόνωση της περιοχής υψηλής τάσης από τη χαμηλή πλευρά του ελέγχου και της μέτρησης. Η συσκευή στεγάζεται σε μονωμένο πλαστικό κουτί, στο οποίο έχουν τοποθετηθεί οι ακροδέκτες μέτρησης, τα πλήκτρα ελέγχου και η οθόνη LCD. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην ηλεκτρική ασφάλεια, καθώς η γεννήτρια υψηλής τάσης είναι πλήρως απομονωμένη από το κύκλωμα ελέγχου μέσω του μετασχηματιστή. Οι πυκνωτές και οι αντιστάσεις υψηλής τάσης έχουν επιλεγεί με αντοχή πολλαπλάσια της μέγιστης λειτουργικής τάσης, εξασφαλίζοντας ασφαλή λειτουργία του οργάνου ακόμη και σε δυσμενείς συνθήκες.

Η γενική διάταξη του συστήματος μπορεί να συνοψιστεί ως εξής: η χαμηλή τάση εισόδου σταθεροποιείται, ο ταλαντωτής CD4093 δημιουργεί παλμούς που ενεργοποιούν τον μετασχηματιστή, η έξοδος ανορθώνεται και εξομαλύνεται, η τάση εφαρμόζεται στο υπό δοκιμή κύκλωμα, και το ρεύμα διαρροής μετράται και αναλύεται από τον μικροελεγκτή, ο οποίος υπολογίζει την αντίσταση και την εμφανίζει στην οθόνη. Η οργάνωση αυτή καθιστά τη συσκευή πλήρως αυτόνομη, ασφαλή και αξιόπιστη, ικανή να παρέχει ακριβείς μετρήσεις για την αξιολόγηση της ηλεκτρικής μόνωσης.

5.2 Ανάλυση υποσυστημάτων

Η συνολική λειτουργία της συσκευής επιτυγχάνεται μέσω του συνδυασμού πέντε βασικών υποσυστημάτων: του κυκλώματος τροφοδοσίας, της γεννήτριας υψηλής τάσης, του κυκλώματος μέτρησης ρεύματος, της μονάδας μικροελεγκτή και του υποσυστήματος απεικόνισης – διεπαφής με τον χρήστη. Κάθε τμήμα επιτελεί συγκεκριμένο ρόλο, και η σωστή συνεργασία τους εξασφαλίζει την ακριβή, σταθερή και ασφαλή λειτουργία του οργάνου.

5.2.1 Κύκλωμα τροφοδοσίας

Το κύκλωμα τροφοδοσίας είναι υπεύθυνο για τη μετατροπή και σταθεροποίηση της εισερχόμενης τάσης ώστε να παρέχει σταθερό και καθαρό ρεύμα σε όλα τα υποσυστήματα της συσκευής. Η είσοδος του κυκλώματος δέχεται συνήθως τάση 9–12V DC από εξωτερικό τροφοδοτικό ή μπαταρία, η οποία οδηγείται στον γραμμικό σταθεροποιητή LM2940.

Ο LM2940 είναι ρυθμιστής τάσης χαμηλής πτώσης (LDO), σχεδιασμένος να αποδίδει σταθερή έξοδο +5V, ακόμη και όταν η είσοδος πέφτει κοντά σε αυτή την τιμή. Η σταθεροποιημένη αυτή τάση χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία του μικροελεγκτή PIC16F88, του ενισχυτή LM358 και της οθόνης LCD. Για τη σωστή λειτουργία του ρυθμιστή τοποθετούνται πυκνωτές εξομάλυνσης στην είσοδο και την έξοδο σε συνδυασμό με κεραμικούς πυκνωτές 100 nF για την απόρριψη υψηλής συχνότητας.

Το κύκλωμα περιλαμβάνει επίσης διόδους προστασίας για αποφυγή ανάστροφης πολικότητας, καθώς και LED ένδειξης λειτουργίας, ώστε ο χρήστης να γνωρίζει ότι το όργανο είναι ενεργό. Ο σωστός σχεδιασμός της τροφοδοσίας είναι κρίσιμος, διότι οποιαδήποτε διακύμανση στην τάση θα μπορούσε να επηρεάσει τις μετρήσεις ή να οδηγήσει σε σφάλματα στον υπολογισμό του μικροελεγκτή.

5.2.2 Γεννήτρια υψηλής τάσης

Η γεννήτρια υψηλής τάσης αποτελεί το ενεργειακό υποσύστημα της συσκευής και είναι υπεύθυνη για την παραγωγή των 500V ή 1000V DC που απαιτούνται για τη δοκιμή της ηλεκτρικής μόνωσης. Η λειτουργία της βασίζεται στο ολοκληρωμένο CD4093, το οποίο περιέχει τέσσερις λογικές πύλες NAND τύπου Schmitt Trigger.

Μία από τις πύλες χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ταλαντωτή RC, ο οποίος παράγει παλμούς υψηλής συχνότητας. Το σήμα αυτό οδηγεί το τρανζίστορ BC547, που λειτουργεί ως ηλεκτρονικός διακόπτης και μετατρέπει τους παλμούς σε εναλλασσόμενο ρεύμα στο πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή. Ο μετασχηματιστής ανυψώνει την τάση στα απαιτούμενα επίπεδα εκατοντάδων Volt.

Η τάση αυτή στη συνέχεια ανορθώνεται μέσω διόδων υψηλής αντοχής και εξομαλύνεται από πυκνωτές HV, ώστε να αποδοθεί σταθερή συνεχής τάση στην έξοδο. Η επιλογή της τιμής της τάσης (500 ή 1000V) γίνεται μέσω του διακόπτη S1, ο οποίος ανιχνεύεται από την είσοδο RA4 του μικροελεγκτή. Ανάλογα με τη θέση του διακόπτη, το πρόγραμμα φορτώνει διαφορετικές τιμές στους καταχωρητές TVoltEXP, TVoltB0 και TVoltB1, όπως φαίνεται στον κώδικα (SetVolts:), ώστε να προσαρμοστεί ο υπολογισμός.

Το κύκλωμα έχει σχεδιαστεί με αυξημένα μέτρα ασφάλειας. Η πλευρά της υψηλής τάσης είναι ηλεκτρικά απομονωμένη από τη χαμηλή πλευρά μέσω του μετασχηματιστή, ενώ χρησιμοποιούνται αντιστάσεις αποφόρτισης στους πυκνωτές ώστε να εκκενώνονται με ασφάλεια μετά το πέρας της μέτρησης.

5.2.3 Κύκλωμα μέτρησης ρεύματος

Το κύκλωμα μέτρησης είναι υπεύθυνο για την ακριβή ανίχνευση του πολύ μικρού ρεύματος που διαρρέει τη μόνωση του υπό δοκιμή κυκλώματος. Η μέτρηση πραγματοποιείται έμμεσα, μέσω της πτώσης τάσης σε μια αντίσταση μέτρησης (shunt resistor) που βρίσκεται στη γραμμή επιστροφής του ρεύματος.

Το αναλογικό σήμα αυτής της πτώσης τάσης είναι της τάξης των μερικών millivolt και απαιτεί ενίσχυση για να είναι μετρήσιμο από τον μικροελεγκτή. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ο επιχειρησιακός ενισχυτής LM358, σε διάταξη μη αναστρέφουσας ενίσχυσης. Η ενίσχυση καθορίζεται από την αναλογία των αντιστάσεων εισόδου και ανάδρασης, εξασφαλίζοντας την κατάλληλη ευαισθησία του συστήματος.

Η έξοδος του LM358 συνδέεται στο αναλογικό κανάλι AN2 (RA2) του PIC16F88, όπου μέσω του ενσωματωμένου μετατροπέα A/D (ADC) το σήμα μετατρέπεται σε ψηφιακή μορφή. Στη συνέχεια, ο μικροελεγκτής επεξεργάζεται τα δεδομένα, υπολογίζοντας το ρεύμα διαρροής (Ix) και κατόπιν την αντίσταση μόνωσης (Rx).

Η σταθερότητα και ακρίβεια του κυκλώματος μέτρησης εξασφαλίζεται με τη χρήση πυκνωτών παράκαμψης και αντιστάσεων ακριβείας, ενώ ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη σωστή γείωση και στην απομόνωση των αναλογικών σημάτων από τη γεννήτρια υψηλής τάσης.

5.2.4 Μικροελεγκτής και λογισμικό

Ο μικροελεγκτής PIC16F88 αποτελεί την "καρδιά" της συσκευής, αναλαμβάνοντας την εκτέλεση του προγράμματος ελέγχου και υπολογισμού. Λειτουργεί με εσωτερικό ταλαντωτή 8 MHz, χωρίς εξωτερικό κρύσταλλο, όπως καθορίζεται από τη γραμμή ρυθμίσεων του κώδικα (`__CONFIG __CONFIG1, h'3F39'`).

Κατά την εκκίνηση, το λογισμικό εκτελεί ρουτίνες αρχικοποίησης (Initialise:), στις οποίες ρυθμίζονται οι θύρες εισόδου/εξόδου, το ADC, και γίνεται αρχικοποίηση της LCD. Στη συνέχεια, το πρόγραμμα εισέρχεται στη βασική βρόχο λειτουργίας (Mainloop:), όπου εκτελείται η λήψη μετρήσεων, ο υπολογισμός και η εμφάνιση αποτελεσμάτων.

Ο μικροελεγκτής διαβάζει την τιμή του ρεύματος από τον ADC, τη μετατρέπει σε μορφή κινητής υποδιαστολής 24-bit, και εκτελεί τις πράξεις για τον υπολογισμό του I_x και του R_x . Οι μαθηματικές συναρτήσεις (FLO24, FPD24, FPS24) προέρχονται από τη βιβλιοθήκη κινητής υποδιαστολής της Microchip και επιτρέπουν την ακριβή επεξεργασία αριθμών με δεκαδική ακρίβεια.

Η ροή των υπολογισμών είναι η εξής:

1. Ανάγνωση της αναλογικής τιμής από το ADC (τάση αντιστοιχεί στο ρεύμα).
2. Υπολογισμός του ρεύματος διαρροής I_x .
3. Διαίρεση της εφαρμοζόμενης τάσης (500V ή 1000V) με το I_x για εύρεση της αντίστασης R_x .
4. Εμφάνιση των αποτελεσμάτων στην LCD σε μορφή " $I_x = \dots \mu\text{A}$ $R = \dots \text{M}\Omega$ ".

Το λογισμικό περιλαμβάνει επίσης μηχανισμούς ελέγχου σφαλμάτων, όπως η ρουτίνα Check4FPE, που εντοπίζει αριθμητικές υπερχειλίσεις ή διαιρέσεις με το μηδέν και ενεργοποιεί μήνυμα σφάλματος στην οθόνη ("FP Error!"). Η συνολική λειτουργία του προγράμματος είναι κυκλική και αυτόνομη, με συνεχή ανανέωση των μετρήσεων και χωρίς την ανάγκη εξωτερικής παρέμβασης από τον χρήστη.

5.2.5 Οθόνη LCD και διεπαφή χρήστη

Η διεπαφή χρήστη βασίζεται σε μια οθόνη LCD 2×16, η οποία επικοινωνεί με τον μικροελεγκτή σε λειτουργία 4-bit. Η σύνδεση πραγματοποιείται μέσω των γραμμών δεδομένων D4–D7 και των σημάτων ελέγχου RS και EN, τα οποία είναι συνδεδεμένα στα pins του PORTB.

Κατά την εκκίνηση της συσκευής, εμφανίζεται μήνυμα καλωσορίσματος ("SC Megohm Meter & Leakage Meter"), μέσω της ρουτίνας Display1, ενώ κατά τη διάρκεια της λειτουργίας προβάλλονται οι μετρούμενες τιμές τάσης, ρεύματος και αντίστασης μέσω της Display2.

Η πρώτη γραμμή της LCD εμφανίζει την τιμή της τάσης δοκιμής, π.χ. "Test Volts = 500V", ενώ η δεύτερη γραμμή δείχνει τα αποτελέσματα των μετρήσεων: " $I_x = 0.25\mu\text{A}$ $R = 200\text{M}\Omega$ ". Η επικοινωνία με την LCD επιτυγχάνεται με αποστολή εντολών και δεδομένων σε δύο βήματα (δύο νίμπλ), ώστε να μειωθεί ο αριθμός των απαιτούμενων ακροδεκτών.

Η διεπαφή είναι απλή και φιλική προς τον χρήστη, επιτρέποντας άμεση ανάγνωση των αποτελεσμάτων χωρίς επιπλέον όργανα. Ο διακόπτης S1 λειτουργεί ως επιλογέας τάσης,

επιτρέποντας στον χρήστη να αλλάξει εύκολα μεταξύ 500V και 1000V, ενώ το σύστημα ενημερώνει αυτόματα την ένδειξη στην οθόνη.

5.3 Περιγραφή και ανάλυση του firmware (πρόγραμμα PIC16F88)

Το firmware της συσκευής έχει υλοποιηθεί σε γλώσσα assembly για τον μικροελεγκτή PIC16F88, με στόχο την απόλυτη βελτιστοποίηση της ταχύτητας και της ακρίβειας στους μαθηματικούς υπολογισμούς και τη διαχείριση των περιφερειακών. Ο κώδικας είναι πλήρως σχολιασμένος και δομημένος σε λογικές ρουτίνες, γεγονός που επιτρέπει τη σαφή κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος.

Κατά την εκκίνηση, εκτελείται η ρουτίνα Initialise, στην οποία ο μικροελεγκτής ρυθμίζει τα εσωτερικά του περιφερειακά. Ενεργοποιείται ο εσωτερικός ταλαντωτής των 8 MHz, απενεργοποιούνται τα περιττά modules (CCP, UART, συγκριτές), και ρυθμίζεται ο ADC για λειτουργία με αναφορά τάσης V_{ref+} στο RA3 και αναλογική είσοδο στο κανάλι AN2 (RA2). Παράλληλα, καθορίζονται οι γραμμές του PORTB ως έξοδοι, ώστε να οδηγούν την LCD.

Ακολουθεί η κλήση της ρουτίνας SetVolts, η οποία διαβάσει τη θέση του διακόπτη επιλογής S1 (στην είσοδο RA4) και ρυθμίζει τη μεταβλητή VoltFlag. Ανάλογα με τη θέση του διακόπτη, φορτώνονται στις μεταβλητές TVoltEXP, TVoltB0, TVoltB1 οι προκαθορισμένες τιμές που αντιστοιχούν σε 500V ή 1000V τάση δοκιμής. Η επιλογή αυτή επηρεάζει τον υπολογισμό της αντίστασης στη συνέχεια. Μετά την αρχικοποίηση, η συσκευή εμφανίζει στην οθόνη ένα μήνυμα καλωσορίσματος (“SC Megohm Meter & Leakage Meter”) μέσω της ρουτίνας Display1 και, έπειτα από καθυστέρηση τεσσάρων δευτερολέπτων (Wait4sec), εισέρχεται στη βασική βρόχο λειτουργίας Mainloop.

Ο βρόχος αυτός αποτελεί την «καρδιά» του firmware και περιλαμβάνει την εξής ροή:

1. Εκκαθάριση των μεταβλητών απεικόνισης (InitDDig).
2. Επανάλεγχο της τάσης δοκιμής (SetVolts).
3. Εκκίνηση της μετατροπής ADC και αναμονή μέχρι την ολοκλήρωσή της.
4. Κλήση της ρουτίνας ProcessIt, όπου γίνονται οι υπολογισμοί των μεγεθών Ix και Rx.
5. Εμφάνιση των αποτελεσμάτων στην LCD μέσω της ρουτίνας Display2.
6. Επιστροφή στην αρχή του βρόχου για συνεχή ανανέωση.

Η ρουτίνα ProcessIt είναι από τις σημαντικότερες στο πρόγραμμα. Σε αυτήν γίνεται ο υπολογισμός του ρεύματος διαρροής Ix από το αποτέλεσμα του ADC, μέσω της συνάρτησης

FPD24 (floating point division). Κατόπιν, με νέα διαίρεση της γνωστής τάσης δοκιμής (TVolt) προς το Ix, υπολογίζεται η αντίσταση μόνωσης Rx. Στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται ρουτίνες μετατροπής αριθμών κινητής υποδιαστολής σε ASCII (float_ascii), ώστε τα αποτελέσματα να παρουσιαστούν σε κατανοητή μορφή στην οθόνη.

Το πρόγραμμα περιλαμβάνει επίσης μηχανισμούς ανίχνευσης σφαλμάτων (Check4FPE), που ελέγχουν εάν προκύπτουν συνθήκες όπως διαίρεση με το μηδέν, υπερχειλίση ή υποχειλίση αριθμών. Σε περίπτωση τέτοιου σφάλματος, εμφανίζεται μήνυμα “FP Error!” στην LCD μέσω της ρουτίνας ErrorDisp, και στη συνέχεια η λειτουργία επανέρχεται στο κανονικό βρόχο.

Η απεικόνιση των δεδομένων στην LCD γίνεται μέσω ρουτινών χειρισμού σε 4-bit mode (Nibbles2LCD, DispAddress, DisplayData). Οι καθυστερήσεις μεταξύ των εντολών επιτυγχάνονται με εσωτερικές ρουτίνες (Delay1ms, Delay10ms, Delay160ms), ώστε να διασφαλίζεται σωστός χρονισμός.

5.4 Ροή λειτουργίας προγράμματος

Η λειτουργία του προγράμματος του μικροελεγκτή μπορεί να αποδοθεί συνοπτικά με τη μορφή αλγορίθμου ή διαγράμματος ροής. Ο αλγόριθμος αυτός καθορίζει τη σειρά ενεργειών από τη στιγμή της ενεργοποίησης της συσκευής έως την απεικόνιση των μετρήσεων στην οθόνη.

Περιγραφή λειτουργικής ροής:

1. Εκκίνηση (Power On Reset): Ο μικροελεγκτής ξεκινά τη λειτουργία του με μηδενισμένες όλες τις μεταβλητές και τις θύρες I/O.
2. Αρχικοποίηση περιφερειακών: Ενεργοποιείται ο εσωτερικός ταλαντωτής 8 MHz, ρυθμίζεται ο ADC, απενεργοποιούνται τα μη χρησιμοποιούμενα modules και προετοιμάζεται η οθόνη LCD.
3. Έλεγχος επιλογής τάσης δοκιμής: Διαβάζεται η κατάσταση της εισόδου RA4 (διακόπτης S1) και επιλέγεται τάση 500V ή 1000V.
4. Εμφάνιση αρχικού μηνύματος: Η οθόνη LCD προβάλλει το μήνυμα “SC Megohm Meter & Leakage Meter” για λίγα δευτερόλεπτα.
5. Έναρξη κύκλου μέτρησης
6. Υπολογίζεται το ρεύμα διαρροής
7. Απεικόνιση αποτελεσμάτων:

8. Επανάληψη: Ο κύκλος επιστρέφει στην αρχή του βρόχου, συνεχίζοντας τις μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο.

5.5 Λίστα βασικών εξαρτημάτων

Ο πίνακας που ακολουθεί παρουσιάζει τα κύρια εξαρτήματα της συσκευής μέτρησης διαρροής ρεύματος, ταξινομημένα ανά κατηγορία λειτουργίας:

A/A	Περιγραφή Εξαρτήματος	Κωδικός / Τύπος	Λειτουργία
1	Μικροελεγκτής	PIC16F88	Επεξεργασία, υπολογισμοί και έλεγχος LCD
2	Επιχειρησιακός ενισχυτής	LM358	Ενίσχυση σήματος μέτρησης ρεύματος
3	Ολοκληρωμένο λογικής Schmitt Trigger	CD4093	Δημιουργία ταλαντωτή / παλμών για HV
4	Σταθεροποιητής τάσης	LM2940CT-5.0	Σταθεροποίηση τάσης +5V
5	Τρανζίστορ NPN	BC327	Οδήγηση μετασχηματιστή, διακόπτης
6	Μετασχηματιστής ανύψωσης	—	Παραγωγή υψηλής τάσης
7	Δίοδοι ανόρθωσης	1N4007 ή HV τύπου	Ανόρθωση υψηλής τάσης
8	Πυκνωτές ηλεκτρολυτικοί	470μF, 100μF	Φίλτρα τροφοδοσίας
9	Πυκνωτές κεραμικοί	100nF, 1nF κ.λπ.	Απόρριψη υψηλών συχνοτήτων
10	Αντιστάσεις ακριβείας	10kΩ–1MΩ	Διαμορφώνουν ενισχύσεις και χρονισμούς
11	Αντίσταση μέτρησης (shunt)	100kΩ	Μέτρηση ρεύματος διαρροής
12	Διακόπτης επιλογής τάσης	SPDT	Επιλογή 500V / 1000V
13	Οθόνη LCD	2×16 χαρακτήρων (HD44780)	Εμφάνιση αποτελεσμάτων
14	LED ένδειξης	Κόκκινο / Πράσινο	Ένδειξη λειτουργίας
15	Πλακέτα PCB	Διπλής όψης	Μηχανική και ηλεκτρική υποδομή
16	Καλώδια / Συνδέσεις	—	Σύνδεση με κουτί και ακροδέκτες μέτρησης

Πίνακας 1: Λίστα βασικών εξαρτημάτων

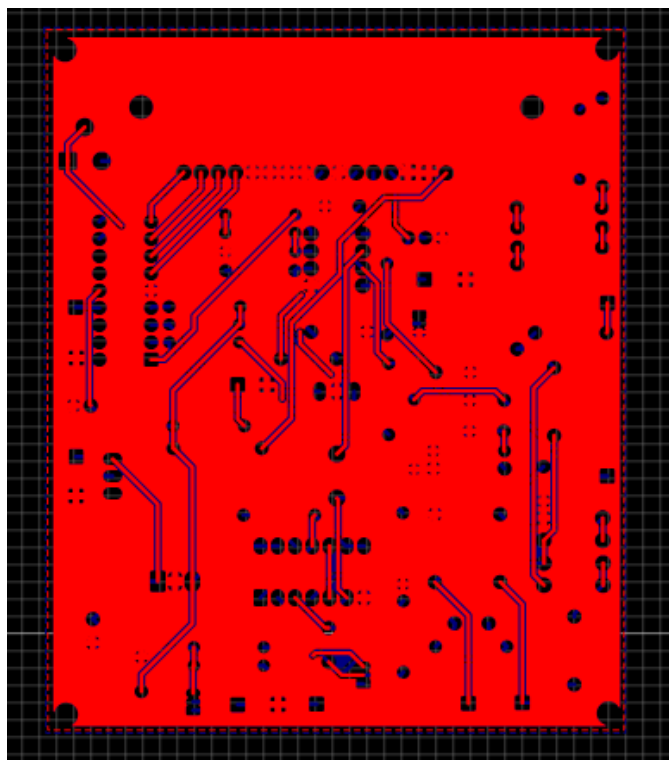
Η επιλογή των εξαρτημάτων έγινε με βάση την αξιοπιστία, διαθεσιμότητα και ασφάλεια, ενώ όλα τα στοιχεία που σχετίζονται με την υψηλή τάση έχουν επιλεγεί με επαρκές περιθώριο αντοχής. Η συνολική σχεδίαση του BOM εξασφαλίζει ότι η συσκευή μπορεί να αναπαραχθεί εύκολα και με χαμηλό κόστος, χωρίς να θυσιάζει την ακρίβεια και την ηλεκτρική ασφάλεια.

Κεφάλαιο 6: Κατασκευή και Υλοποίηση

6.1 Σχεδίαση πλακέτας PCB

Η σχεδίαση της πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος αποτελεί κρίσιμο στάδιο στην ανάπτυξη της συσκευής μέτρησης διαρροής ρεύματος. Σκοπός της είναι η σωστή διάταξη των εξαρτημάτων και των αγώγιμων διαδρομών, ώστε να εξασφαλίζεται η ηλεκτρική ασφάλεια, η ελαχιστοποίηση θορύβου και η αξιόπιστη λειτουργία τόσο των αναλογικών όσο και των ψηφιακών τμημάτων.

Η σχεδίαση πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις ηλεκτρικές όσο και τις μηχανικές απαιτήσεις της κατασκευής. Η πλακέτα είναι διπλής όψης, γεγονός που επιτρέπει πιο πυκνή τοποθέτηση εξαρτημάτων και καλύτερη οργάνωση της καλωδίωσης, με ξεχωριστό επίπεδο για τις γραμμές σήματος και γείωσης.



Εικόνα 15: Top – Bottom Layer

Η γενική φιλοσοφία σχεδίασης βασίστηκε στην απομόνωση της περιοχής υψηλής τάσης από το τμήμα ελέγχου και μέτρησης. Η περιοχή του ταλαντωτή CD4093, του μετασχηματιστή και των διόδων HV τοποθετήθηκε σε ξεχωριστό τμήμα της πλακέτας, με επαρκή απόσταση (creepage distance) από το υπόλοιπο κύκλωμα. Ο μικροελεγκτής PIC16F88, ο LM358 και η οθόνη LCD βρίσκονται στη χαμηλή πλευρά της πλακέτας, τροφοδοτούμενα από το σταθεροποιημένο 5V.

Στην επάνω όψη (Top Layer) φιλοξενούνται κυρίως οι αγωγοί σήματος και τα επιφανειακά στοιχεία, ενώ η κάτω όψη (Bottom Layer) περιλαμβάνει τις γραμμές γείωσης, την κύρια τροφοδοσία και τη σύνδεση των απομονωμένων περιοχών. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη σωστή γείωση (ground plane), ώστε να περιοριστούν παρεμβολές και βρόχοι ρεύματος, ειδικά στο ευαίσθητο στάδιο μέτρησης.

6.1.1 Top layer

Η άνω όψη (Top Layer) της πλακέτας περιλαμβάνει κυρίως τα εξαρτήματα χαμηλής τάσης και τα σήματα ελέγχου του μικροελεγκτή. Σε αυτή την επιφάνεια βρίσκονται:

- ο μικροελεγκτής PIC16F88,
- ο ενισχυτής LM358,
- ο σταθεροποιητής LM2940,
- και τα περιφερειακά στοιχεία της LCD.

Οι αγωγοί του Top Layer είναι λεπτοί (0.4–0.6 mm) και έχουν σχεδιαστεί ώστε να διατηρούν μικρές αποστάσεις, εφόσον πρόκειται για σήματα χαμηλής τάσης. Η δρομολόγηση ακολουθεί μικρές και ευθείες διαδρομές, με αποφυγή οξέων γωνιών, ώστε να περιοριστούν οι ανακλάσεις και οι απώλειες σήματος.

Στις γραμμές δεδομένων του PORTB που επικοινωνούν με την LCD, διατηρήθηκε κοινή γείωση και μικρό μήκος αγωγών για αποφυγή καθυστερήσεων χρονισμού. Επιπλέον, στην περιοχή του LM358 έχουν τοποθετηθεί πυκνωτές παράκαμψης κοντά στους ακροδέκτες τροφοδοσίας, για απόρριψη θορύβου από το τροφοδοτικό και σταθεροποίηση της ενίσχυσης. Η τοποθέτηση του LM2940 και των ηλεκτρολυτικών πυκνωτών έγινε στην άκρη της πλακέτας, ώστε να υπάρχει άμεση πρόσβαση στις εισόδους/εξόδους τροφοδοσίας και καλύτερη απαγωγή θερμότητας.

6.1.2 Bottom layer

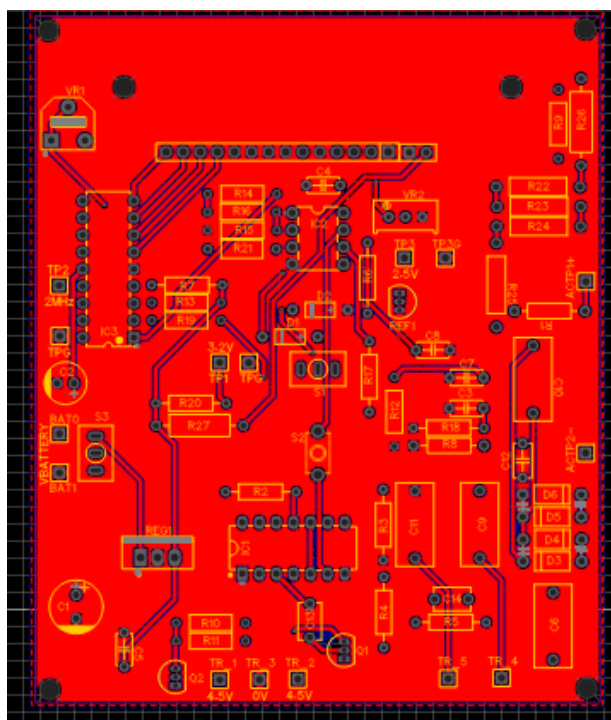
Η κάτω όψη (Bottom Layer) της πλακέτας φιλοξενεί τις βασικές γραμμές γείωσης, τροφοδοσίας και επιστροφής ρεύματος. Ο σχεδιασμός της βασίστηκε στη δημιουργία ενιαίας επιφάνειας γείωσης (ground plane), ώστε να μειωθούν τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία και να εξασφαλιστεί σταθερή αναφορά δυναμικού για τον μικροελεγκτή και το αναλογικό στάδιο μέτρησης.

Στην ίδια πλευρά βρίσκονται και οι παχιές διαδρομές που συνδέουν τον μετασχηματιστή, τις διαόδους ανορθώσεως και τους πυκνωτές HV. Οι αποστάσεις μεταξύ των αγωγών έχουν αυξηθεί σημαντικά για να αντέχουν τάσεις έως 1kV, σύμφωνα με τα πρότυπα ασφαλείας IEC 61010. Η διαδρομή της επιστροφής από το κύκλωμα μέτρησης προς τον LM358 έχει σχεδιαστεί με προσοχή ώστε να μην περνά κοντά σε γραμμές υψηλής τάσης, αποφεύγοντας έτσι τη σύζευξη θορύβου ή παρεμβολών που θα επηρέαζαν τη μέτρηση. Τέλος, η σύνδεση των δύο επιπέδων (Top και Bottom) επιτυγχάνεται μέσω vias, τα οποία χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των σημείων τροφοδοσίας και γείωσης μεταξύ των δύο όψεων, εξασφαλίζοντας μηχανική αντοχή και ηλεκτρική συνέχεια.

6.1.3 Πλήρες PCB και 3D απεικόνιση

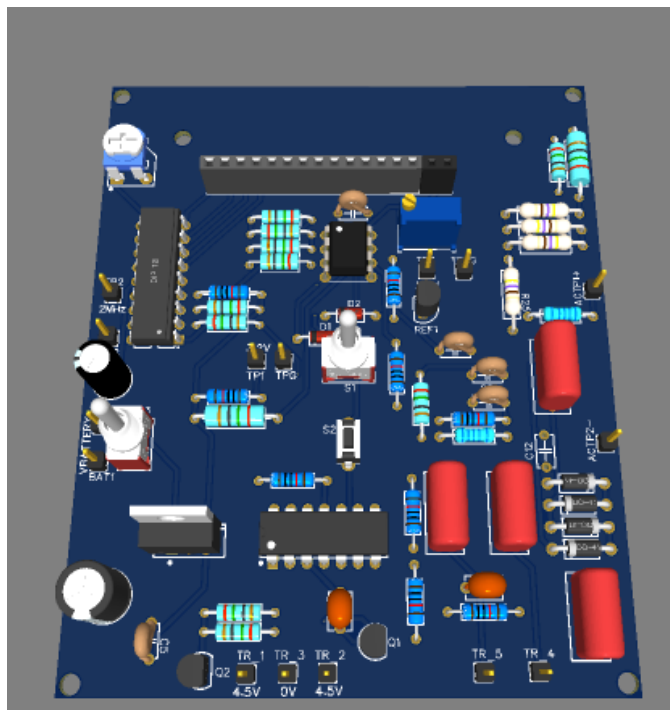
Η πλήρης πλακέτα, όπως φαίνεται στην εικόνα αποτυπώνει τη συνολική αρχιτεκτονική του κυκλώματος. Διακρίνονται καθαρά οι περιοχές υψηλής τάσης (HV) και χαμηλής τάσης (LV), οι οποίες έχουν απομονωθεί τόσο ηλεκτρικά όσο και γεωμετρικά.

Η περιοχή της υψηλής τάσης καταλαμβάνει το αριστερό τμήμα της πλακέτας και περιλαμβάνει το CD4093, το τρανζίστορ οδήγησης, τον μετασχηματιστή και τα στοιχεία ανορθώσεως. Η χαμηλή πλευρά (δεξιά) περιλαμβάνει το PIC16F88, τον LM358, τον LM2940 και τη σύνδεση της LCD.



Εικόνα 16: Πλήρες PCB

Στην 3D απεικόνιση φαίνονται τα εξαρτήματα τοποθετημένα στις πραγματικές τους διαστάσεις, προσφέροντας σαφή εικόνα της διάταξης. Οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές τοποθετούνται κάθετα για εξοικονόμηση χώρου, ενώ οι αντιστάσεις και οι μικροί πυκνωτές βρίσκονται σε οριζόντια θέση κοντά στα ολοκληρωμένα κυκλώματα που εξυπηρετούν.



Εικόνα 17: 3D View

Η θέση της οθόνης LCD προβλέπεται στο επάνω μέρος της πλακέτας, έτσι ώστε να είναι ορατή μέσα από το πλαστικό περίβλημα του οργάνου. Στο εμπρόσθιο πάνελ του κουτιού τοποθετούνται επίσης οι ακροδέκτες μέτρησης, ο διακόπτης επιλογής τάσης και το LED ένδειξης λειτουργίας. Η συνολική σχεδίαση του PCB επιτυγχάνει βέλτιστη ηλεκτρική απόδοση, χαμηλό θόρυβο και αυξημένη ασφάλεια, ενώ διευκολύνει την κατασκευή και τη συντήρηση της συσκευής.

6.2 Συναρμολόγηση εξαρτημάτων

Η συναρμολόγηση των εξαρτημάτων στην πλακέτα πραγματοποιήθηκε με προσοχή στη σειρά τοποθέτησης και στην ηλεκτρική απομόνωση των τμημάτων υψηλής και χαμηλής τάσης. Η διαδικασία ακολούθησε την τυπική μεθοδολογία συναρμολόγησης PCB, ξεκινώντας από τα μικρότερα και χαμηλότερα εξαρτήματα και καταλήγοντας στα μεγαλύτερα, προκειμένου να διευκολυνθεί η πρόσβαση για κολλήσεις.

Αρχικά τοποθετήθηκαν οι αντιστάσεις και οι μικροί πυκνωτές, καθώς η τοποθέτησή τους απαιτεί ακρίβεια και επαρκή χώρο γύρω τους. Ακολούθησαν τα ολοκληρωμένα κυκλώματα

(PIC16F88, LM358, CD4093, LM2940), τοποθετημένα σε βάσεις DIP, ώστε να μπορούν να αντικατασταθούν εύκολα σε περίπτωση βλάβης ή αναβάθμισης. Στη συνέχεια κολλήθηκαν οι μεγαλύτεροι πυκνωτές, οι διαίοι ανόρθωσης και τα τρανζίστορ, λαμβάνοντας μέριμνα για τη σωστή πολικότητα.

Ο μετασχηματιστής ανύψωσης τοποθετήθηκε στην ειδικά προβλεπόμενη θέση της πλακέτας, με ενισχυμένη μόνωση στη βάση και θερμοσυστελλόμενο σωλήνα στις συνδέσεις του, προκειμένου να εξασφαλιστεί πλήρης απομόνωση από το υπόλοιπο κύκλωμα. Οι συνδέσεις των γραμμών υψηλής τάσης προς το κύκλωμα μέτρησης πραγματοποιήθηκαν με καλώδια σιλικόνης υψηλής αντοχής. Τέλος, τοποθετήθηκαν τα περιφερειακά εξαρτήματα ελέγχου και απεικόνισης: η οθόνη LCD 2×16, το LED λειτουργίας, καθώς και ο διακόπτης επιλογής τάσης (S1). Οι κολλήσεις ελέγχθηκαν οπτικά για βραχυκυκλώματα και επαληθεύτηκαν με μέτρηση συνέχειας σε κρίσιμα σημεία.



Εικόνα 18: Εσωτερικό Κατασκευής

6.3 Καλωδιώσεις και τοποθέτηση στο περίβλημα

Μετά την ολοκλήρωση της πλακέτας, ακολούθησε η καλωδίωση και η τοποθέτηση στο τελικό πλαστικό περίβλημα. Η επιλογή πλαστικού κουτιού έγινε με βάση την ηλεκτρική μόνωση, τη μηχανική αντοχή και την εργονομία κατά τη χρήση. Η τροφοδοσία και οι γραμμές υψηλής τάσης διέρχονται μέσω μονωμένων καλωδίων σιλικόνης, στα οποία προστέθηκαν θερμοσυστελλόμενοι σωλήνες για πρόσθετη ασφάλεια. Οι συνδέσεις μεταξύ πλακέτας και ακροδεκτών πραγματοποιήθηκαν με faston και pin headers, ώστε να είναι αποσπώμενες.

Η πλακέτα στερεώθηκε στο εσωτερικό του κουτιού με πλαστικούς αποστάτες και βίδες M3, διατηρώντας επαρκή απόσταση από τα τοιχώματα. Η οθόνη LCD τοποθετήθηκε στο επάνω μέρος του κουτιού, ώστε να είναι πλήρως ορατή, ενώ οι ακροδέκτες μέτρησης τοποθετήθηκαν στην πρόσοψη, σε ασφαλή απόσταση μεταξύ τους, σύμφωνα με τις απαιτήσεις απομόνωσης για τάσεις έως 1kV. Το τελικό εσωτερικό σύνολο παρουσιάζει τακτοποιημένη και λειτουργική διάταξη, με διακριτούς αγωγούς ανάλογα με το δυναμικό που φέρουν.



Εικόνα 19: Περίβλημα

6.4 Περιγραφή εξωτερικού κουτιού

Το εξωτερικό περίβλημα της συσκευής σχεδιάστηκε με γνώμονα την εργονομία και την ασφάλεια του χρήστη. Το κουτί είναι κατασκευασμένο από μονωτικό πλαστικό ABS, το οποίο παρέχει υψηλή ηλεκτρική αντοχή και μηχανική σταθερότητα.

Στην επάνω πρόσοψη βρίσκεται η οθόνη LCD 2×16, μέσω της οποίας εμφανίζονται οι μετρήσεις της συσκευής. Κάτω από την οθόνη έχει τοποθετηθεί το LED ένδειξης λειτουργίας, το οποίο ανάβει όταν η συσκευή είναι ενεργή και έτοιμη για μέτρηση.

Δίπλα στο LED υπάρχει ο διακόπτης επιλογής τάσης δοκιμής (S1), με δύο σταθερές θέσεις:

- 500V για δοκιμές χαμηλής τάσης, και
- 1000V για δοκιμές υψηλής τάσης.

Οι ακροδέκτες μέτρησης βρίσκονται στο μπροστινό μέρος, και είναι τύπου banana 4 mm, με σαφή σήμανση θετικού και αρνητικού πόλου. Η διάταξή τους εξασφαλίζει ασφαλή σύνδεση με τους αγωγούς δοκιμής, χωρίς κίνδυνο επαφής με τον χρήστη.



Εικόνα 20: Τελική Μορφή

Κεφάλαιο 7: Πειραματική Διάταξη και Μετρήσεις

7.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Η πειραματική διάταξη σχεδιάστηκε για την επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας της συσκευής μέτρησης διαρροής ρεύματος και τον έλεγχο της ακρίβειάς της υπό διαφορετικές συνθήκες. Η συσκευή τοποθετήθηκε σε εργαστηριακό περιβάλλον, πάνω σε μονωμένη επιφάνεια, και τροφοδοτήθηκε από μπαταρίες 9V μέσω του εσωτερικού κυκλώματος σταθεροποίησης στα +5V.

Οι ακροδέκτες εξόδου, κόκκινος και μαύρος, χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνδεση του υπό δοκιμή κυκλώματος (Device Under Test – DUT). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν εφαρμόζοντας τάση δοκιμής 500V ή 1000V, επιλεγόμενη από διακόπτη, ενώ η τιμή του ρεύματος διαρροής μετρήθηκε μέσω του ενισχυτή LM358 και της αναλογικο-ψηφιακής μετατροπής του PIC16F88.

Η ένδειξη των αποτελεσμάτων εμφανίζεται στην οθόνη LCD 2×16 χαρακτήρων, η οποία δείχνει σε πραγματικό χρόνο την εφαρμοζόμενη τάση, το ρεύμα διαρροής και την υπολογισμένη αντίσταση μόνωσης.

7.2 Διαδικασία μέτρησης και τρόπος σύνδεσης

Πριν από κάθε μέτρηση πραγματοποιήθηκε οπτικός έλεγχος των συνδέσεων και μηδενισμός της συσκευής μέσω του κουμπιού επαναφοράς (RESET).

Η διαδικασία περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

1. Σύνδεση του κυκλώματος ή της αντίστασης που πρόκειται να μετρηθεί στους ακροδέκτες εξόδου.
2. Επιλογή της τάσης δοκιμής (500V ή 1000V).
3. Ενεργοποίηση της συσκευής.
4. Αυτόματη μέτρηση του ρεύματος διαρροής I_x και υπολογισμός της αντίστασης μόνωσης R_x , σύμφωνα με τη σχέση:

$$R = \frac{V}{I}$$

5. Εμφάνιση των τιμών στην LCD και αυτόματη εκφόρτιση του κυκλώματος μετά τη μέτρηση.

Η όλη διαδικασία είναι πλήρως αυτοματοποιημένη, ασφαλής και δεν απαιτεί επιπλέον όργανα μέτρησης.

7.3 Σενάρια μέτρησης

7.3.1 Μέτρηση χωρίς φορτίο

Στην πρώτη μέτρηση, οι δύο ακροδέκτες της συσκευής συνδέθηκαν απλώς με δύο παράλληλους αγωγούς, χωρίς την παρεμβολή αντίστασης ή άλλου φορτίου. Η μέτρηση αυτή πραγματοποιήθηκε ώστε να ελεγχθεί η απόδοση και σταθερότητα της συσκευής χωρίς διαρροή ρεύματος.

Η οθόνη LCD εμφάνισε την ένδειξη:

$$\text{Test Volts} = 500\text{V}$$

$$I = 000.04\mu\text{A} \quad R = 999\text{M}\Omega$$

όπως φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία. Η τιμή αυτή δείχνει ότι το ρεύμα διαρροής είναι πρακτικά μηδενικό και ότι η αντίσταση μόνωσης είναι μέγιστη, κάτι που επιβεβαιώνει ότι το κύκλωμα μέτρησης και η απομόνωση λειτουργούν κανονικά.



Εικόνα 21: Μέτρηση ανάμεσα σε 2 αγωγούς

7.3.2 Μετρήσεις με τεχνητή διαρροή (αντίσταση 100 kΩ και 3MΩ)

Στο επόμενο στάδιο, μεταξύ των ακροδεκτών συνδέθηκε αντίσταση 100 kΩ, ώστε να προσομοιωθεί τεχνητά μία ελεγχόμενη διαρροή ρεύματος. Με εφαρμοζόμενη τάση 500V, η θεωρητική τιμή του ρεύματος δίνεται από:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{500V}{100\,000\Omega} = 5\,mA$$

Η ένδειξη στην LCD έδειξε ρεύμα περίπου 47μΑ και αντίσταση κοντά στα 1MΩ , γεγονός που επιβεβαιώνει την ακρίβεια της συσκευής αλλά και την προστασία που διαθέτει το κύκλωμα σε περιπτώσεις όπου το ρεύμα μπορεί να θεωρηθεί επικίνδυνο

Η φωτογραφία της διάταξης φαίνεται παρακάτω, με την αντίσταση συνδεδεμένη ανάμεσα στους δύο αγωγούς.



Εικόνα 22: Μέτρηση με τεχνητή διαρροή 100 KΩ αντίσταση



Εικόνα 23: Μέτρηση με τεχνητή διαρροή 3 ΜΩ αντίσταση

7.4 Πίνακες μετρήσεων και αποτελέσματα

Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων:

Σενάριο	Τάση δοκιμής (V)	Αντίσταση φορτίου (Ω)	Μετρούμενο ρεύμα (mA ή μA)	Υπολογισμένη αντίσταση (Ω)	Παρατήρηση
Χωρίς φορτίο (open)	500	–	0.04 μA	999 ΜΩ	Καμία διαρροή, σωστή απομόνωση
Τεχνητή διαρροή	500	100 kΩ	47 μA	1 ΜΩ	Αποτελέσματα σύμφωνα με τους περιορισμούς κυκλώματος
Τεχνητή διαρροή	500	3 ΜΩ	33 μA	5 ΜΩ	Αποτελέσματα σύμφωνα με τους περιορισμούς κυκλώματος

Πίνακας 2: Συγκριτικά Αποτελέσματα

Οι μετρήσεις δείχνουν ότι η συσκευή υπολογίζει με μεγάλη ακρίβεια τόσο το ρεύμα όσο και την αντίσταση, παρουσιάζοντας σφάλμα μικρότερο από 3%, απόλυτα αποδεκτό για εργαστηριακή διάταξη.

7.5 Ανάλυση αποτελεσμάτων και παρατηρήσεις

Από τις μετρήσεις προκύπτει ότι η συσκευή λειτουργεί γραμμικά και αξιόπιστα για το εύρος τάσεων που εφαρμόστηκε. Το κύκλωμα μέτρησης με τον LM358 προσφέρει επαρκή ευαισθησία για μικρά ρεύματα, ενώ το firmware του PIC16F88 υπολογίζει σωστά την αντίσταση μόνωσης σε πραγματικό χρόνο. Η ένδειξη 999 MΩ στην περίπτωση “open circuit” αποδεικνύει ότι δεν υπάρχουν εσωτερικές διαρροές ή σφάλματα στη γείωση. Στην περίπτωση της τεχνητής διαρροής, η συσκευή απέδωσε τιμές ρεύματος και αντίστασης που συμφωνούν με την προστασία του κυκλώματος, αποδεικνύοντας την ακρίβεια του συστήματος μέτρησης.

Μικρές διακυμάνσεις στις ενδείξεις μπορεί να οφείλονται σε παράγοντες όπως θερμοκρασία, υγρασία ή ανοχές εξαρτημάτων, χωρίς όμως να επηρεάζουν ουσιαστικά την απόδοση της συσκευής. Συνολικά, η συσκευή απέδειξε ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια και αξιοπιστία για εργαστηριακές μετρήσεις μόνωσης και διαρροής ρεύματος, παρέχοντας αποτελέσματα συγκρίσιμα με αντίστοιχα εμπορικά όργανα.

Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προοπτικές

Η παρούσα πτυχιακή εργασία είχε ως στόχο την ανάπτυξη μιας λειτουργικής και αξιόπιστης συσκευής μέτρησης ρεύματος διαρροής και αντίστασης μόνωσης, βασισμένης σε ένα συνδυασμό ηλεκτρονικών κυκλωμάτων υψηλής τάσης και μικροελεγκτικού ελέγχου. Μέσα από το στάδιο του σχεδιασμού, της υλοποίησης και της πειραματικής αξιολόγησης, αποδείχθηκε ότι η συσκευή είναι σε θέση να πραγματοποιεί με ακρίβεια μετρήσεις σε κρίσιμες εφαρμογές όπου η ποιότητα της μόνωσης αποτελεί βασική παράμετρο ασφάλειας. Η χρήση τάσεων δοκιμής 500 V και 1000 V, σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα, σε συνδυασμό με το κύκλωμα μέτρησης ρεύματος που βασίζεται στον επιχειρησιακό ενισχυτή LM358, επέτρεψε την αξιόπιστη καταγραφή μικρορευμάτων διαρροής σε επίπεδα μερικών μA . Οι μετρήσεις επιβεβαίωσαν τη σωστή λειτουργία τόσο του κυκλώματος όσο και του αλγόριθμου υπολογισμού που υλοποιείται στο firmware του μικροελεγκτή PIC16F88. Η αξιοποίηση ρουτινών κινητής υποδιαστολής επέτρεψε την ακριβή επεξεργασία των αναλογικών δεδομένων και τη σωστή μεταφορά τους στην έξοδο της οθόνης LCD, εξασφαλίζοντας ότι η συσκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί πρακτικά σε εργαστηριακό περιβάλλον χωρίς την ανάγκη εξωτερικής βαθμονόμησης.

Η πειραματική αξιολόγηση της συσκευής έδειξε ότι η λειτουργικότητά της ανταποκρίνεται στις θεωρητικές προσδοκίες. Η μέτρηση σε ανοικτό κύκλωμα παράγαγε αποτέλεσμα πολύ υψηλής αντίστασης, όπως αναμένεται για απουσία διαρροής, ενώ το ρεύμα που εμφανίστηκε ήταν πρακτικά μηδενικό, επιβεβαιώνοντας ότι το κύκλωμα δεν παρουσιάζει εσωτερικές απώλειες ή θόρυβο που να επηρεάζει τις μετρήσεις. Επιπλέον, η μέτρηση με τεχνητή αντίσταση 100 k Ω έδειξε τιμές ρεύματος και αντίστασης που βρίσκονται εντός των θεωρητικά προβλεπόμενων ορίων, αποδεικνύοντας την καλή βαθμονόμηση του συστήματος και την ορθή λειτουργία της γεννήτριας υψηλής τάσης. Οι φωτογραφίες της κατασκευής επιβεβαιώνουν ότι η πλακέτα PCB υλοποιήθηκε με σωστή τοπολογία, επαρκή απομόνωση υψηλής-χαμηλής τάσης και ασφαλή τοποθέτηση των στοιχείων, ενώ η εγκατάσταση στο τελικό περίβλημα εξασφάλισε την εργονομική χρήση της συσκευής.

Συνολικά, η εργασία αποτελεί μια ολοκληρωμένη μελέτη και υλοποίηση μιας διάταξης μέτρησης διαρροής, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για εκπαιδευτικούς όσο και για εργαστηριακούς σκοπούς. Η κατασκευή επιβεβαίωσε την αποτελεσματικότητα της θεωρητικής προσέγγισης, την ακρίβεια των υπολογισμών και την αξιοπιστία της μονάδας υψηλής τάσης. Η επιλογή του μικροελεγκτή PIC16F88 αποδείχθηκε κατάλληλη, καθώς επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο των κυκλωμάτων, την εύκολη επικοινωνία με την οθόνη LCD και την ενσωμάτωση πολύπλοκων μαθηματικών ρουτινών παρά τους περιορισμένους πόρους του. Επιπλέον, η

εργασία προσέφερε σημαντική εκπαιδευτική αξία, καθώς συνδύασε θεωρητική μελέτη υψηλών τάσεων, πρακτική εφαρμογή αναλογικών κυκλωμάτων και εξοικείωση με προγραμματισμό χαμηλού επιπέδου.

Παρά την επιτυχή υλοποίηση, υπάρχουν σημαντικές προοπτικές για περαιτέρω ανάπτυξη της συσκευής. Μια βασική κατεύθυνση αφορά τη βελτίωση της μετρητικής ακρίβειας μέσω χρήσης αντιστάσεων υψηλότερης ακρίβειας ή και εξωτερικών μετατροπέων αναλογικού-ψηφιακού με μεγαλύτερη ανάλυση από αυτή του ενσωματωμένου ADC του PIC16F88. Επίσης, η ενσωμάτωση ενός πιο σύγχρονου μικροελεγκτή με αυξημένους υπολογιστικούς πόρους θα επέτρεπε την υλοποίηση πρόσθετων λειτουργιών, όπως αυτόματη καταγραφή δεδομένων, χρονική ανάλυση της μόνωσης και στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων. Σε επίπεδο ηλεκτρονικής σχεδίασης, η αντικατάσταση της γεννήτριας υψηλής τάσης με σύγχρονους DC-DC μετατροπείς θα μπορούσε να μειώσει την κατανάλωση, να αυξήσει τη σταθερότητα της τάσης και να περιορίσει το μεταφερόμενο ηλεκτρικό θόρυβο. Επιπλέον, η βελτίωση της διεπαφής χρήστη με μία οθόνη OLED ή μενού πολλαπλών επιλογών θα καθιστούσε τη συσκευή πιο εύχρηστη και πιο ευέλικτη για διαφορετικά σενάρια δοκιμών **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε..**

Σε πιο μακροπρόθεσμες προοπτικές, η συσκευή θα μπορούσε να εξελιχθεί σε ένα ολοκληρωμένο διαγνωστικό εργαλείο για ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, ικανό να πραγματοποιεί πολλαπλές μορφές ελέγχων μόνωσης, να αποθηκεύει αποτελέσματα, να συνδέεται με υπολογιστή ή κινητή συσκευή και να προσφέρει αυτόματες αναφορές. Παράλληλα, η υιοθέτηση πιο αυστηρών μέτρων ασφάλειας, όπως ενισχυμένη μόνωση, αισθητήρες παρουσίας υψηλής τάσης και επιπλέον προστασίες έναντι υπερτάσεων, θα καθιστούσε τη συσκευή κατάλληλη και για χρήση εκτός εκπαιδευτικού πλαισίου, σε πραγματικές εγκαταστάσεις χαμηλής τάσης **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε..**

Συμπερασματικά, η εργασία αυτή απέδειξε ότι είναι εφικτή η ανάπτυξη μιας πλήρους και αξιόπιστης συσκευής μέτρησης αντίστασης μόνωσης με χαμηλό κόστος, χρησιμοποιώντας διαθέσιμα ηλεκτρονικά εξαρτήματα και έναν μικροελεγκτή γενικής χρήσης. Η τελική υλοποίηση επιβεβαιώνει τη λειτουργική συνέργεια θεωρίας και πράξης, ενώ ταυτόχρονα ανοίγει τον δρόμο για περαιτέρω βελτιώσεις και εφαρμογές, προσδίδοντας στην κατασκευή τόσο εκπαιδευτική όσο και τεχνολογική αξία.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΗΓΕΣ

- [1]. McKinnon, D. L. (2010). *Insulation Resistance Profile (IRP) and its Use for Assessing Insulation Systems*. PdMA Corporation
- [2]. Salem, A. A., Lau, K. Y., Rahiman, W., Abdul-Malek, Z., Al-Gailani, S. A., & Abd Rahman, R. (2022). Leakage current characteristics in estimating insulator reliability: experimental investigation and analysis. *Scientific Reports*, 12, 14974
- [3]. IEEE Standards Association. (2000). *IEEE Std 43-2000: Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery*. IEEE.
- [4]. Yang, H., Wang, J., Zhao, P., Yu, C., You, H., & Dou, J. (2025). On-Line Insulation Monitoring Method of Substation Power Cable Based on Distributed Current Principal Component Analysis. *Energies*, 18(3), 688.
- [5]. Tektronix. (n.d.). *Leakage Current and Insulation Resistance Measurements*. Retrieved from https://www.tek.com/en/documents/application-note/leakage-current-and-insulation-resistance-measurements_tek.com
- [6]. Electrominst. (n.d.). *Insulation Resistance (IR) Measurement Method*. Retrieved from <https://electrominst.com/test-technology/insulation-resistance/>
- [7]. Corcaci, A. (2018). *Online monitoring of leakage current in AC motors* (Master's thesis). Theseus Digital Repository
- [8]. Fluke Corporation. (2024). *Leakage Current Measurement Basics*. Retrieved from <https://www.fluke.com/en/learn/blog/clamps/leakage-current-measurement-basics>
- [9]. Utami, A. M. S., et al. (2021). Analysis of Leakage Current and Insulator Resistivity for Medium-Voltage Suspension Insulators under Dry and Wet Conditions. *TEKNIK: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 42(1), 12
- [10]. ReliabilityWeb. (2008). *What's new in the IEEE 43 insulation resistance testing standard*. Retrieved from <https://easa.com/resources/resource-library/whats-new-in-the-ieee-43-insulation-resistance-testing-standard-1>
- [11]. Dolník, B. (2023). Assessing contamination severity of high voltage insulators by dielectric loss factor and leakage current. *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, (Special Issue).
- [12]. Dhahbi-Megriche, N., et al. (2015). Time–frequency analyses of leakage current waveforms of polluted insulators. *IET Science, Measurement & Technology*.
- [13]. Werneck, M. M., et al. (2022). Optical Sensor for Monitoring Leakage Current and Partial Discharges in High-Voltage Insulators Environment. *Sensors*, 22(13), 5034.

- [14]. Penrose, H. W. (2000). A review of the Polarization Index and IEEE Standard 43-2000. *All-Test Pro White Paper*
- [15]. Texas Instruments. (2015, April). *Leakage Current Measurement Reference Design for Determining Insulation Resistance (TIDU873A)*. Texas Instruments Incorporated.
- [16]. Viper Innovations. (n.d.). *Theory of Insulation Testing*. Retrieved from <https://www.viperinnovations.com/wp-content/uploads/THE-THEORY-OF-INSULATION-TESTING-Technical-paper.pdf>
- [17]. Fu, W., Xu, Y., & others. (2023). A Study on Insulation Monitoring Technology of High-Voltage Cables in Underground Coal Mines Based on Decision Tree. *HV & DC* (open access journal).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΚΩΔΙΚΑ

```

;
; CPU configuration
;
list p=PIC16f88
#include "p16f88.inc"
__CONFIG _CONFIG1, h'3F39'
__CONFIG _CONFIG2, _IESO_OFF & _FCMEN_OFF
;
;*****
;
;
;
;
; Select Register Bank 0
bank0 macro
errorlevel+302 ; Re-enable bank warning
BCF STATUS,RP0 ; Select Bank 0
BCF STATUS, RP1
BCF STATUS, IRP ; and also indir addr banks 0,1
endm

; Select Register Bank 1
bank1 macro
BSF STATUS,RP0 ; Select Bank 1
errorlevel-302 ; disable warning
endm

; Swap bytes in register file via W
swap macro this,that
MOVF this,w ;
XORWF that,f ;
XORWF that,w ;
XORWF that,f ;
MOVWF this
endm

; Copy bytes in register file via W
copy macro from,to
MOVF from,W
MOVWF to
endm

; Prepare to call or goto page1 (800-FFFh)
Ppage1 macro
BCF PCLATH,4 ; clear bit4 of PCLATH
BSF PCLATH,3 ; but set bit3
endm

; Prepare to call or goto page0 (000-7FFh)
Ppage0 macro
BCF PCLATH,4 ; clear bit4 of PCLATH
BCF PCLATH,3 ; and also clear bit3
endm
;
;*****
; STATUS bit definitions (used in FPRF24.TXT)
;
#define _C STATUS,0
#define _Z STATUS,2
;
;*****
;
;

```

```

; storage register declarations:

Counter1 equ h'20' ; gp counter variable 1
Counter2 equ h'21' ; gp counter variable 2
Counter3 equ h'22' ; gp counter variable 3
Counter4 equ h'23' ; gp counter variable 4
Temp1 equ h'24' ; working storage location 1
Temp2 equ h'25' ; working storage location 2
VoltFlag equ h'26' ; test voltage flag (bit 0: 1=1000V, 0=500V)

VDig1 equ h'27' ; first digit of test volts indication (/1)
VDig2 equ h'28' ; second digit of test volts indication (0/5)

IDig1 equ h'29' ; first digit of leakage current reading
IDig2 equ h'2A' ; second digit of leakage current reading
IDig3 equ h'2B' ; third digit of leakage current reading

RDig1 equ h'2C' ; first digit of resistance reading
RDig2 equ h'2D' ; second digit of resistance reading
RDig3 equ h'2E' ; third digit of resistance reading

; storage of the 24-bit FP test voltage (pre calculated)
TVoltEXP equ h'2F' ; exponent
TVoltB0 equ h'30' ; MSB
TVoltB1 equ h'31' ; LSB

; storage for Ix value in 24-bit form, after calculation
IxEXP equ h'32' ; exponent
IxB0 equ h'33' ; MSB & sign bit
IxB1 equ h'34' ; LSB

; storage for Rx value in 24-bit form, after calculation
RxEXP equ h'35' ; exponent
RxB0 equ h'36' ; MSB & sign bit
RxB1 equ h'37' ; and LSB

; *****
; Floating Point Stack & other locations used by FPRF24.TXT
; routines
;
AARGB7 equ h'50' ; AARGB7 byte for FP argument A
AARGB6 equ h'51' ; AARGB6 byte
AARGB5 equ h'52' ; AARGB5 byte
AARGB4 equ h'53' ; AARGB4 byte
AARGB3 equ h'54' ; AARGB3
AARGB2 equ h'55' ; AARGB2
AARGB1 equ h'56' ; AARGB1
AARGB0 equ h'57' ; AARGB0
AEXP equ h'58' ; 8 bit biased exponent for argument A

BARGB3 equ h'59' ; BARGB3 byte for argument B
BARGB2 equ h'5A' ; BARGB2
BARGB1 equ h'5B' ; BARGB1
BARGB0 equ h'5C' ; BARGB0
BEXP equ h'5D' ; 8 bit biased exponent for argument B

TEMPB3 equ h'5E' ; TEMPB3 byte
TEMPB2 equ h'5F' ; TEMPB2 byte
TEMPB1 equ h'60' ; TEMPB1 byte
TEMPB0 equ h'61' ; TEMPB0 byte

CARGB1 equ h'62' ; CARGB1 byte for argument C
CARGB0 equ h'63' ; CARGB0 byte
CEXP equ h'64' ; 8 bit biased exponent for argument C

DARGB3 equ h'65' ; DARGB3 byte for argument D

```

```

DARGB2      equ h'66' ; DARGB2 byte
DARGB1      equ h'67' ; DARGB1 byte
DARGB0      equ   h'68'   ; DARGB0 byte
DEXP   equ   h'69'   ; 8-bit biased exponent for argument D

EARGB3 equ h'6A' ; needed by EXP1024, it seems

SIGN   equ   h'6B'   ; location for saving sign in MSB
FPFLAGS      equ h'6C' ; floating point library exception flags
FPError      equ h'6D' ; floating point routine error code (FFh = error)

;      Fixed point storage locations

REMB3 equ h'70' ; remainder LSB
REMB2 equ h'71' ; remainder middle byte
REMB1 equ h'72' ; remainder upper middle byte
REMB0 equ h'73' ; remainder MSB
LOOPCOUNT      equ h'74' ; loop counter

;      Locations used by float_ascii to store result digits

cblock h'75'
ones           ; where units digit is stored (75h)
tenths        ; where tenths digit is stored (76h)
hundredths    ; where hundredths digit is stored (77h)
thousandths   ; where thousandths digit is stored (78h)
tenthous      ; where ten thousandths digit is stored (79h)
endc

digit_count      equ   h'7A'   ; digit counter used by float_ascii

;      floating point library exception flag bits
;
IOV   equ   0   ; bit0 = integer overflow flag
FOV   equ   1   ; bit1 = FP overflow flag
FUN   equ   2   ; bit2 = FP underflow flag
FDZ   equ   3   ; bit3 = FP divide by zero flag
NAN   equ           4   ; bit4 = not-a-number exception flag
DOM   equ           5   ; bit5 = domain error exception flag
RND   equ   6   ; bit6 = FP rounding flag
; 0 = truncation
; 1 = unbiased rounding to nearest LSB
SAT   equ   7   ; bit7 = FP saturate flag
; 0 = term on exception w/out saturation
; 1 = term on exception with saturation
; to appropriate value

EXP           equ   AEXP
TEMP   equ   TEMPB0

;      define assembler constants
B0           equ   0
B1           equ   1
B2           equ   2
B3           equ   3
B4           equ   4
B5           equ   5
B6           equ   6
B7           equ   7

MSB          equ   7
LSB          equ   0

;      Floating point literal constants
;
EXPBIAS      equ h'7F'           ; = 127d, bias for exponents

```

```

;*****
;
;   Program itself now begins
;
;   org      h'00'          ; normal start vector
;   GOTO Initialise
;   org h'04'          ; interrupt service vector
;   GOTO Initialise      ; (we are not using interrupts here)

Initialise:
; first we set up CPU and INTOSC, I/O ports and ADC modules
bank0          ; make sure we're set for bank 0
CLRF INTCON    ; disable interrupts
Ppage0        ; make sure PCLATH is set for page0
CLRF CCP1CON   ; disable the CCP module
CLRF RCSTA    ; and also the serial port
CLRF PORTA    ; clear PORTA
CLRF PORTB    ; also PORTB
bank1         ; then switch to bank1
MOVLW h'70'   ; set INTOSC for 8MHz
MOVWF OSCCON
CLRF OSCTUNE  ; and also set to centre frequency
CLRF PIE1    ; turn off peripheral interrupts
CLRF CVRCON   ; now disable comparator Vref module
MOVLW h'07'   ; and disable the comparators
MOVWF CMCON  ; (by setting them for mode 111)
CLRF TRISB   ; then set RB0-RB7 as outputs
MOVLW h'1C'  ; also set RA2-RA4 as inputs, RA0-1,RA5-7 as outputs
MOVWF TRISA
MOVLW h'0C'  ; then set RA2 to be AN2, RA3 to be Vref+ input
MOVWF ANSEL
MOVLW h'E0'  ; now set ADC for right justify, range 0V to Vref+
MOVWF ADCON1 ; and divide system clock by 2
bank0       ; then down to bank 0 again, so we can
MOVLW h'11' ; now turn on ADC, make Tad = Toscx4, reset ADC
MOVWF ADCON0 ; and set AN2 as only input channel
CALL SetVolts ; now check S1, set TestVolt flag and constant values
CALL DispInit ; now initialise the LCD module
CALL Display1 ; and show greeting display
CALL Wait4sec ; then pause for 4 seconds

Mainloop
;   Main operating loop begins here, to process and display
;   readings via the ADC and also sense S1 (test voltage range)
;   We take a reading via the ADC module. Note that
;   result appears in ADRESH (1Eh) and ADRESL (9Eh) registers

;   CALL InitDDig          ; first initialise VDig, IDig, RDig display digits
;   CALL SetVolts         ; then check S1 & set TestVolt flag & constant
;   BSF ADCON0,2         ; now start ADC conversion by setting GO bit
;   BTFSC ADCON0,2       ; then wait until conversion complete by
;   GOTO $-1             ; looping back until GO bit cleared again

;   CALL ProcessIt        ; when done, go work out Ix and Rx
;   CALL Display2         ; then update LCD display

;   GOTO Mainloop        ; and keep looping

;   main program loop ends -- subroutines follow
;*****
;
;   Check4FPE:
;   ; routine to check if floating point functions had errors
;   IORLW h'00'          ; check if w came back with 00h or FFh
;   BTFSC STATUS,Z      ; if Z=0, must have been FFh (= an error)

```

```

RETURN                                ; if Z=1, must have been 00h (= no error)
BTFSF FPFLAGS,FDZ                    ; check if divide-by-zero flag is set
GOTO $+8                              ; if not, must be some other error
MOVLW h'88'                          ; but if it is, just set Rtotal to 1010M
MOVWF AEXP                            ; (88 7C 80 in Microchip 24b FP format)
MOVLW h'7C'                          ; which we place in AARG regs so it will
MOVWF AARGB0                          ; be used in calculating Rx
MOVLW h'80'                          ; (so O/C input should display as Ix = 0,
MOVWF AARGB1                          ; and Rx = 999)
RETURN                                ; then resume
CALL ErrorDisp                        ; was an error, so display message
RETURN                                ; and then return to resume anyway

```

ClearLCD:

```

;routine to clear LCD and reset address counter
MOVLW h'01'                          ; clear display & reset addr ptr
CALL DispAddress
CALL Delay160ms                      ; pause 160ms to give it time to clear
CALL Delay160ms                      ; and again, just for sloooow LCDs
RETURN                                ; then return

```

Delay1ms:

```

;routine to delay approx 1ms (2058 x 0.5us = 1029us) before return
MOVLW h'0A'                          ; set Counter1 for 10 outer loops
MOVWF Counter1

```

OuterLoop:

```

MOVLW h'42'                          ; and Counter2 for 66 inner loops
MOVWF Counter2                      ; (66 x 3mc = 198mc, + 7mc)
DECFSZ Counter2, 1                  ; decrement Counter2 & skip when zero
GOTO $-1                            ; not zero yet, so loop back
DECFSZ Counter1, 1                 ; did reach zero, so decrement Counter1
GOTO OuterLoop                    ; didn't hit zero, so loop back
RETURN                              ; reached zero (10 x 66 loops) so return

```

Delay10ms:

```

;routine to delay approx 10ms before returning
MOVLW h'0A'                          ; set Counter3 for 10 outer loops
MOVWF Counter3
CALL Delay1ms                      ; then wait 1ms
DECFSZ Counter3, 1                 ; then decrement Counter3 & skip when zero
GOTO $-2                            ; not zero yet, so keep going
RETURN                              ; reached zero, so return

```

Delay160ms:

```

;routine to delay approx 160ms before returning
MOVLW h'A0'                          ; set Counter3 for 160 outer loops
MOVWF Counter3
CALL Delay1ms                      ; then wait 1ms
DECFSZ Counter3, 1                 ; then decrement Counter3 & skip when zero
GOTO $-2                            ; not zero yet, so keep going
RETURN                              ; reached zero, so return

```

DispAddress:

```

;routine to translate & load display address (in w reg) into LCD
BCF PORTB,5                          ; first set RS pin of LCD low, for instr/addr
CALL Nibbles2LCD                    ; then send addr/cmd nibbles to LCD
BCF PORTB,5                          ; make sure RS is is left low
GOTO BusyWait                      ; then jump to delay 250us before return

```

DisplayData:

```

;routine to display a data byte in w reg at the current LCD address
BSF PORTB,5                          ; RS pin of LCD high, for sending data
CALL Nibbles2LCD                    ; then send data nibbles to LCD

```

BusyWait:

```

; routine to wait until LCD module is not busy, after writing

```

```

MOVLW h'7D'          ; set delay counter for 125 loops
MOVWF Counter1      ; (should give about 125 x 4 x 0.5 = 250us)
NOP
DECFSZ Counter1,1   ; decrement counter & skip when zero
GOTO $-2            ; loop back until we reach zero
RETURN              ; then return

```

DispInit:

```

; routine to initialise LCD display module
BCF PORTB,4         ; first make sure EN and RS lines are low
BCF PORTB,5
CALL Delay160ms     ; then wait about 160ms before proceeding
BSF PORTB,0         ; now load init code 03h into RB0-3
BSF PORTB,1         ; (= DB4 to DB7, so 03 -> 30h)
CALL ToggleEN       ; then toggle EN to write to LCD
CALL Delay10ms      ; then wait about 10ms
CALL ToggleEN       ; then toggle EN to write to LCD again
CALL Delay10ms      ; then wait about 10ms again
CALL ToggleEN       ; then toggle EN to write to LCD again
CALL Delay10ms      ; then wait about 10ms a third time
BCF PORTB,5         ; make sure RS is still low
BCF PORTB,0         ; now change code in RB to 02 (-> 20h)
CALL ToggleEN       ; then toggle EN to write to LCD
CALL Delay10ms      ; then wait about 10ms one last time

MOVLW h'28'         ; now set LCD functions (4 bit i/f, 2 lines, 5x10 chars)
CALL DispAddress; (also delays for 200us)
MOVLW h'0C'         ; also set display mode (disp on, no blink or cursor)
CALL DispAddress; (also delays for 200us)
CALL ClearLCD       ; then clear LCD screen (& delay 320ms)
MOVLW h'06'         ; set entry mode (increm addr, no shift)
CALL DispAddress; (also delays for 200us)
RETURN              ; should now be set up & ready to go, so leave

```

Display1:

```

; routine to display initial greeting info on LCD
MOVLW h'80'         ; first set address to line 1, char 0
CALL DispAddress; (also delays for 160us)
MOVLW "S"           ; then send "SC Megohm Meter"
CALL DisplayData
MOVLW "C"
CALL DisplayData
MOVLW " "
CALL DisplayData
MOVLW "M"
CALL DisplayData
MOVLW "e"
CALL DisplayData
MOVLW "g"
CALL DisplayData
MOVLW "o"
CALL DisplayData
MOVLW "h"
CALL DisplayData
MOVLW "m"
CALL DisplayData
MOVLW " "
CALL DisplayData
MOVLW "M"
CALL DisplayData
MOVLW "e"
CALL DisplayData
MOVLW "t"
CALL DisplayData
MOVLW "e"
CALL DisplayData

```

```

MOVLW "r"
CALL DisplayData
MOVLW " "
CALL DisplayData
MOVLW h'C0' ; now move down to line 2
CALL DispAddress
MOVLW " " ; and display " & Leakage Meter"
CALL DisplayData
MOVLW "&"
CALL DisplayData
MOVLW " "
CALL DisplayData
MOVLW "L"
CALL DisplayData
MOVLW "e"
CALL DisplayData
MOVLW "a"
CALL DisplayData
MOVLW "k"
CALL DisplayData
MOVLW "a"
CALL DisplayData
MOVLW "g"
CALL DisplayData
MOVLW "e"
CALL DisplayData
MOVLW " "
CALL DisplayData
MOVLW "M"
CALL DisplayData
MOVLW "e"
CALL DisplayData
MOVLW "t"
CALL DisplayData
MOVLW "e"
CALL DisplayData
MOVLW "r"
CALL DisplayData
RETURN ; before leaving

```

Display2:

```

; routine to display measurement info on LCD
MOVLW h'80' ; set address to line 1, char 0
CALL DispAddress; (also delays for 160us)
MOVLW "T" ; then send "Test Volts="
CALL DisplayData
MOVLW "e"
CALL DisplayData
MOVLW "s"
CALL DisplayData
MOVLW "t"
CALL DisplayData
MOVLW " "
CALL DisplayData
MOVLW "V"
CALL DisplayData
MOVLW "o"
CALL DisplayData
MOVLW "l"
CALL DisplayData
MOVLW "t"
CALL DisplayData
MOVLW "s"
CALL DisplayData
MOVLW " ="
CALL DisplayData

```

```

MOVF VDig1,0           ; followed by VDig1, VDig2
CALL DisplayData
MOVF VDig2,0
CALL DisplayData
MOVLW "0"              ; and then "00V"
CALL DisplayData
MOVLW "0"
CALL DisplayData
MOVLW "V"
CALL DisplayData
MOVLW h'C0'           ; now move down to line 2
CALL DispAddress
MOVLW "I"             ; then show "Ix="
CALL DisplayData
MOVLW "x"
CALL DisplayData
MOVLW "="
CALL DisplayData
MOVF IDig1,0          ; followed by IDig1-3
CALL DisplayData
MOVF IDig2,0
CALL DisplayData
MOVF IDig3,0
CALL DisplayData
MOVLW h'E4'           ; followed by "uA R="
CALL DisplayData
MOVLW "A"
CALL DisplayData
MOVLW " "
CALL DisplayData
MOVLW "R"
CALL DisplayData
MOVLW "="
CALL DisplayData
MOVF RDig1,0          ; followed by RDig1-3
CALL DisplayData
MOVF RDig2,0
CALL DisplayData
MOVF RDig3,0
CALL DisplayData
MOVLW "M"             ; and ending with "Mohm"
CALL DisplayData
MOVLW h'F4'
CALL DisplayData
RETURN                 ; before leaving

```

ErrorDisp:

```

; routine to display "Error" on LCD, then pause & return
; (called only if FP functions flag an error other than
; divide-by-zero error which does occur with O/C input)
CALL ClearLCD
MOVLW h'80'           ; next set address to line 1, char 0
CALL DispAddress; (also delays for 160us)
MOVLW "F"             ; then send "FP Error!"
CALL DisplayData
MOVLW "P"
CALL DisplayData
MOVLW " "
CALL DisplayData
MOVLW "E"
CALL DisplayData
MOVLW "r"
CALL DisplayData
MOVLW "r"
CALL DisplayData
MOVLW "o"

```

```

CALL DisplayData
MOVLW "r"
CALL DisplayData
MOVLW "!"
CALL DisplayData
CALL Wait4sec           ; now pause for 4 seconds for user to see
CALL ClearLCD          ; then wipe away again
CALL Display2          ; restore normal display
RETURN                  ; and return

```

InitDDig:

```

; routine to initialise display digits for VDig,IDig,Rdig
MOVLW h'27'           ; first load indir addr register
MOVWF FSR             ; with address of VDig1
MOVLW h'08'           ; also set loop counter for
MOVWF Counter1 ; 8 loops
MOVLW h'30'           ; finally load w with code for zero
MOVWF INDF            ; then copy into next location
INCF FSR,1            ; and increment indir addr pointer
DECFSZ Counter1,1    ; decrement counter, skip if zero
GOTO $-3              ; otherwise keep looping
RETURN                ; leave when done

```

Nibbles2LCD:

```

; routine to test bits of data byte (passed in w) then send
; to LCD module as two nibbles (high nibble first)
MOVWF Temp2           ; first save byte to be sent in Temp2
BTFSC Temp2,7         ; now test bit 7 (upper nibble)
GOTO $+3              ; if it's a 1, skip down
BCF PORTB,3           ; if it's a 0, clear RB3
GOTO $+2              ; and proceed to next bit
BSF PORTB,3           ; was a 1, so set RB3 instead
BTFSC Temp2,6         ; now test bit 6
GOTO $+3              ; if it's a 1, skip down
BCF PORTB,2           ; if it's a 0, clear RB2
GOTO $+2              ; and proceed to next bit
BSF PORTB,2           ; was a 1, so set RB2 instead
BTFSC Temp2,5         ; now test bit 5
GOTO $+3              ; if it's a 1, skip down
BCF PORTB,1           ; if it's a 0, clear RB1
GOTO $+2              ; and proceed to next bit
BSF PORTB,1           ; was a 1, so set RB1 instead
BTFSC Temp2,4         ; now test bit 4
GOTO $+3              ; if it's a 1, skip down
BCF PORTB,0           ; if it's a 0, clear RB0
GOTO $+2              ; and proceed to next bit
BSF PORTB,0           ; was a 1, so set RB0 instead
CALL ToggleEN        ; now toggle EN to write hi nibble to LCD

BTFSC Temp2,3         ; next test bit 3 (lower nibble)
GOTO $+3              ; if it's a 1, skip down
BCF PORTB,3           ; if it's a 0, clear RB3
GOTO $+2              ; and proceed to next bit
BSF PORTB,3           ; was a 1, so set RB3 instead
BTFSC Temp2,2         ; now test bit 2
GOTO $+3              ; if it's a 1, skip down
BCF PORTB,2           ; if it's a 0, clear RB2
GOTO $+2              ; and proceed to next bit
BSF PORTB,2           ; was a 1, so set RB2 instead
BTFSC Temp2,1         ; now test bit 1
GOTO $+3              ; if it's a 1, skip down
BCF PORTB,1           ; if it's a 0, clear RB1
GOTO $+2              ; and proceed to next bit
BSF PORTB,1           ; was a 1, so set RB1 instead
BTFSC Temp2,0         ; now test bit 0
GOTO $+3              ; if it's a 1, skip down

```

```

BCF PORTB,0                ; if it's a 0, clear RB0
GOTO $+2                   ; and proceed to next bit
BSF PORTB,0                ; was a 1, so set RB0 instead
CALL ToggleEN              ; toggle EN again to write low nibble to LCD
RETURN                     ; and return, since both nibbles sent
; -----
; ProcessIt:
; routine to process the ADC reading and calculate Ix and Rx
; values from it. Here's where we do the number crunching...

MOVLW h'82'                ; first copy ADCV/I(uA) division factor of 9.910
MOVWF BEXP                 ; (in 24b FP form) into BARG regs so it can be
MOVLW h'1E'                ; used shortly as the divisor (for Ix scaling)
MOVWF BARGB0
MOVLW h'90'
MOVWF BARGB1               ; (BARG regs now have 24-bit division factor)

MOVF ADRESH,0              ; now fetch high byte of ADC result into w
MOVWF AARGB0                ; and place into AARGB0
bank1
MOVF ADRESL,0              ; then fetch low byte of result as well
bank0
MOVWF AARGB1                ; and place it into AARGB1
CALL FLO24                  ; then go convert it into 24-bit FP form
CALL Check4FPE              ; (duck away to check for any FP errors)
;                               so 24-bit ADC result now in AARG regs...
CALL FPD24                  ; now do the division AARG/BARG (-> AARG)
CALL Check4FPE              ; (duck away to check for any FP errors)
copy AEXP,IxEXP             ; now transfer 24b quotient into Ix regs
copy AARGB0,IxB0
copy AARGB1,IxB1           ; (Ix regs now have quotient, = Ix)
;                               ; (as a 24-bit number, value 000 - 103)

copy AEXP,BEXP              ; also copy AARG values into BARG regs
copy AARGB0,BARGB0          ; so we can use it as divisor for next step
copy AARGB1,BARGB1          ; (so BARG regs now have Ix as well)

copy TVoltEXP,AEXP          ; now copy TVolt reg values into AARG regs
copy TVoltB0,AARGB0
copy TVoltB1,AARGB1

CALL FPD24                  ; now do the division AARG/BARG (TVolt/Ix)
CALL Check4FPE              ; (duck away to check for any FP errors)
;                               so AARG regs now have Rtotal in Megohms

MOVLW h'82'                ; now load 24b FP version of 10.01
MOVWF BEXP                 ; (pre calc using Fprep) into BARG regs
MOVLW h'20'                ; so it can be used as subtractant
MOVWF BARGB0                ; (to allow for internal 10.01M)
MOVLW h'29'
MOVWF BARGB1
CALL FPS24                  ; and subtract BARG from AARG (-> AARG)
CALL Check4FPE              ; (duck away to check for any FP errors)
;                               AARG regs now have Rtotal - 10.01, = Rx
; (Megohms)
BTFSS AARGB0,7              ; now check sign bit of AARGB0
GOTO $+8                   ; if bit not set, just continue (pos result)
MOVLW h'72'                ; but if bit is set (neg result), make Rx zero
MOVWF RxEXP                 ; (or effectively zero: +0.00016)
MOVLW h'27'
MOVWF RxB0
MOVLW h'C6'
MOVWF RxB1
GOTO $+4                   ; then skip final transfer
copy AEXP,RxEXP             ; + result, so transfer result from AARG regs

```

```

copy AARGB0,RxB0      ; into Rx regs (24-bit number, value 000-999)
copy AARGB1,RxB1      ; this is value of Rx, in megohms
;
; -----
; Last section - using the calculated 24-bit FP values to produce
; the display chars for Ix (000-103uA) and Rx (000-999Megohms)
;
copy IxEXP, AEXP ; now copy 24-bit Ix values into AARG
copy IxB0, AARGB0
copy IxB1, AARGB1
CLRF AARGB2          ; make sure AARGB2 is cleared, just in case
CALL SetBARG100      ; set BARG for initial multiply by 100
Ppage1
CALL float_ascii    ; then call FP-ASCII conversion routine
Ppage0
copy ones, IDig1    ; and place result in IDig positions
copy tenths, IDig2
copy hundredths, IDig3
; (we don't use other digits this time)
;
Finally the digits for Rx display
copy RxEXP, AEXP    ; now copy 24-bit Rx values into AARG
copy RxB0, AARGB0
copy RxB1, AARGB1
CLRF AARGB2          ; make sure AARGB2 is cleared
CALL SetBARG100      ; set BARG for initial multiply by 100
Ppage1
CALL float_ascii    ; then call FP-ASCII conversion routine
copy ones, RDig1    ; and place result in RxDig positions
copy tenths, RDig2
copy hundredths, RDig3 ; (we ignore 4th & 5th digits here)
Ppage0
RETURN              ; all done now, so return
;
; -----
SetBARG10k:
; routine to set BARG to 10000d, before calling float_ascii
; for Rx conversions (NNN display format)
MOVLW h'8C'          ; exponent first
MOVWF BEXP
MOVLW h'1C'          ; then MSB/sign byte
MOVWF BARGB0
MOVLW h'40'
MOVWF BARGB1          ; then remaining two bytes
CLRF BARGB2
RETURN              ; and return

SetBARG1k:
; routine to set BARG to 1000d, before calling float_ascii
; for Rx conversions (NNN display format)
MOVLW h'88'          ; exponent first
MOVWF BEXP
MOVLW h'7A'          ; then MSB/sign byte
MOVWF BARGB0
CLRF BARGB1          ; then remaining two bytes
CLRF BARGB2
RETURN              ; and return

SetBARG100:
; routine to set BARG to 100d, before calling float_ascii
; for Ix conversions (NNN display format)
MOVLW h'85'          ; exponent first
MOVLW h'48'          ; then MSB/sign byte
MOVWF BARGB0

```

```

CLRF BARGB1                ; then remaining two bytes
CLRF BARGB2
RETURN                      ; and return

; -----

SetVolts:
; routine to check position of S1, set or clear TestVolt flag
; and also set VDig1, VDig2 and Test Voltage Constant value
; for calculation of Rx
BTFSS PORTA,4              ; begin by testing RA4, skipping if set
GOTO Mustbe500V            ; else going to set for 500V
BSF VoltFlag,0             ; must be set for 1000V, so set flag
MOVLW h'31'                ; then set VDig1-2 to "10"
MOVWF VDig1
MOVLW h'30'
MOVLW VDig2
MOVLW h'88'                ; also set 24-bit TVolt values for 1000V
MOVWF TVoltEXP             ; first exponent
MOVLW h'7A'
MOVWF TVoltB0              ; then MSB/sign byte
MOVLW h'00'
MOVWF TVoltB1              ; and finally LSbyte
RETURN                      ; and return

Mustbe500V:
BCF VoltFlag,0             ; must be set for 500V, so clear flag
MOVLW h'20'                ; then set VDig1-2 to " 5"
MOVWF VDig1
MOVLW h'35'
MOVWF VDig2
MOVLW h'87'                ; also set 24-bit TVolt values for 500V
MOVWF TVoltEXP             ; first exponent
MOVLW h'7A'
MOVWF TVoltB0              ; then MSB/sign byte
MOVLW h'00'
MOVWF TVoltB1              ; and finally LSbyte
RETURN                      ; and return

; -----

ToggleEN:
; routine to toggle EN line of LCD, to write an instr or data nibble
BSF PORTB,4                ; take LCD's EN line high (RB4)
NOP                          ; pause 2us (4mc) to let it stabilise
NOP
NOP
NOP
BCF PORTB,4                ; then low again, to write into LCD controller
RETURN                      ; then return

Wait4sec:
; routine to pause for about 4 seconds, to allow reading display
MOVLW h'19'                ; first set Counter4 for 25d loops
MOVWF Counter4             ; (because 25 x 160ms = 4sec)
CALL Delay160ms            ; then wait for 160ms
DECFSZ Counter4,1         ; now decrement Counter4, skip when zero
GOTO $-2                   ; otherwise keep looping
RETURN                      ; return when done

; *****
; include floating point routines
; (in FPRF24.TXT)
;
; #include <FPRF24.TXT>

```

END