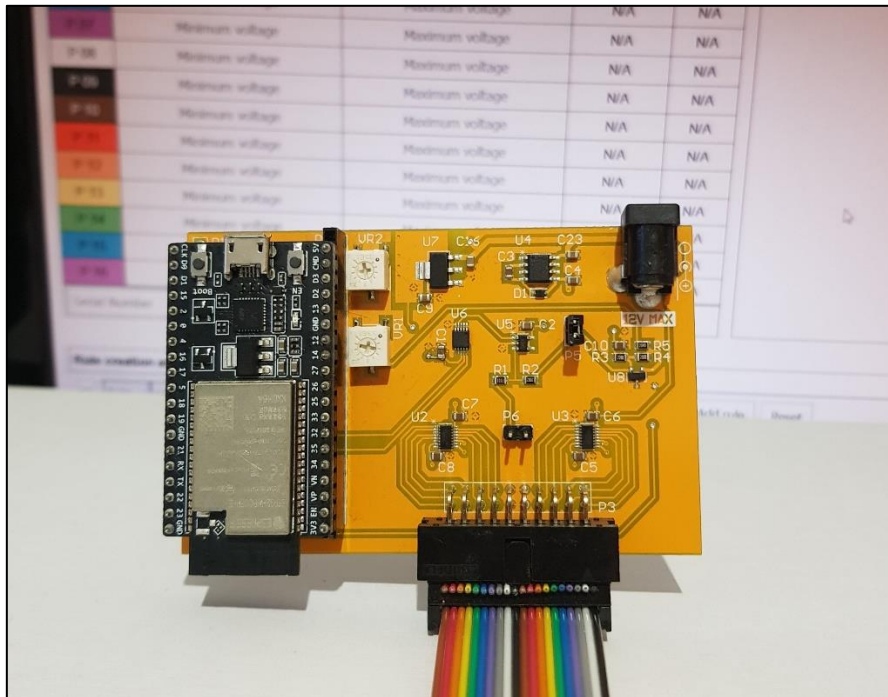




ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«Προγραμματιζόμενη Συσκευή Ελέγχου Ηλεκτρονικών
Κυκλωμάτων»



Του φοιτητή
Κιόσε Βαλέριου
Αρ. Μητρώου: iee2019070

Επιβλέπων
Γιακουμής Άγγελος
Αναπληρωτής Καθηγητής

Ημερομηνία 23/01/2026

Τίτλος Δ.Ε. «Προγραμματιζόμενη συσκευή ελέγχου ηλεκτρονικών κυκλωμάτων»

Κωδικός Δ.Ε. 24130

Του φοιτητή: Κιόσε Βαλέριο

Ονοματεπώνυμο εισηγητή: Γιακουμής Άγγελος

Ημερομηνία ανάληψης: Δ.Ε. 28-02-2024

Ημερομηνία περάτωσης: Δ.Ε. 23-01-2026

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

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

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

«Στη γνώση, που πάντα γεννά περισσότερα ερωτήματα από όσα απαντά»

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη σχεδίαση και κατασκευή μιας προγραμματιζόμενης συσκευής ελέγχου ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Το ενδιαφέρον για το συγκεκριμένο θέμα προέκυψε από την παρατήρηση του κενού που υπάρχει στην αγορά μεταξύ των απλών μετρητικών οργάνων και των εξειδικευμένων, υψηλού κόστους συστημάτων ελέγχου. Η εμπειρία μου στον προγραμματισμό και την ηλεκτρονική με ώθησαν να αναζητήσω μια λύση που θα συνδυάζει την προσβασιμότητα με την λειτουργικότητα.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει τη σχεδίαση, κατασκευή και υλοποίηση μιας προγραμματιζόμενης συσκευής λειτουργικού ελέγχου ηλεκτρονικών κυκλωμάτων μέσω μέτρησης τάσεων, με στόχο την κάλυψη του κενού μεταξύ των απλών μετρητικών οργάνων όπως το πολύμετρο και των αυτοματοποιημένων συστημάτων λειτουργικού ελέγχου της αγοράς. Αρχικά πραγματοποιείται ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και εξετάζεται η ανάπτυξη του λειτουργικού ελέγχου ως απαραίτητης διαδικασίας κατά την κατασκευή ηλεκτρονικών. Ακολουθεί διεξοδική ανάλυση των συγχρόνων μεθόδων ελέγχου και της κατάστασης της αγοράς, αναδεικνύοντας την ανάγκη για καινοτόμες λύσεις. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η σχεδίαση της συσκευής, η επιλογή των κατάλληλων ηλεκτρονικών στοιχείων και η δημιουργία του ηλεκτρονικού σχεδίου. Περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία κατασκευής του τυπωμένου κυκλώματος και η ανάπτυξη του λογισμικού, το οποίο παρέχει γραφική διεπαφή για την παρακολούθηση μετρήσεων. Η εργασία ολοκληρώνεται με πειραματική αξιολόγηση η οποία επιβεβαιώνει το εύρος χρησιμότητας της συσκευής.

«Programmable Electrical Circuit Tester»

Valerjo Qose

Abstract

This thesis presents the design, manufacturing and implementation of a programmable electronic circuit testing device, aimed at bridging the gap between simple measuring instruments such as multimeters and industrial automated functional testing systems. Initially, a historical overview of the evolution of electronic circuits is conducted and the emergence of functional testing as an essential process during electronics manufacturing is examined. This is followed by a comprehensive analysis of contemporary testing methods in the existing market, highlighting the need for innovative solutions. Subsequently, the device design is presented, including the selection of appropriate electronic components and the creation of the electronic schematic. The printed circuit board manufacturing process and the software development are described in detail. The thesis concludes with experimental valuation which confirms the functional range of the device.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στους γονείς μου για τη διαρκή στήριξη και ενθάρρυνση που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω επίσης στον επιβλέποντα καθηγητή της παρούσας εργασίας Γιακουμή Άγγελο για την πολύτιμη καθοδήγηση. Τέλος, ευχαριστώ το ακαδημαϊκό προσωπικό του πανεπιστήμιου για τη συμβολή του στη διαμόρφωση του κατάλληλου περιβάλλοντος που κατέστησε δυνατή την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	vi
Περίληψη.....	vii
Abstract	viii
Ευχαριστίες	ix
Περιεχόμενα	x
Κατάλογος Σχημάτων	xiv
Κατάλογος Πινάκων.....	xvi
Συνομογραφίες.....	xvii
Κεφάλαιο 1ο: Ιστορική Εξέλιξη της Ηλεκτρονικής και των Ηλεκτρονικών Κυκλωμάτων.....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Οι Βάσεις του Ηλεκτρισμού.....	1
1.2.1 Πρώτες Παρατηρήσεις και Πειράματα με τον Ηλεκτρισμό.....	1
1.2.2 Η Βολταϊκή Επανάσταση	1
1.2.3 Μαθηματική Τυποποίηση του Ηλεκτρισμού.....	2
1.2.4 Εξηλεκτρισμός της Κοινωνίας	2
1.3 Εξέλιξη των Ηλεκτρονικών Κυκλωμάτων	3
1.3.1 Πρώτη Ευρεία Αξιοποίηση Ενόσ Κυκλώματος.....	3
1.3.2 Το Ηλεκτρομαγνητικό Ρελέ	3
1.3.3 Η Ηλεκτρονική Λυχνία	4
1.3.4 Το Τρανζίστορ.....	4
1.3.5 Το Τυπωμένο Κύκλωμα	5
1.3.6 Μοντέρνες Εκδοχές Τυπωμένων Κυκλωμάτων	6
1.4 Επιμονή των Θεμελιωδών Αρχών	7
1.5 Επίλογος.....	7
Κεφάλαιο 2ο: Η Αναγκαιότητα και η Εξέλιξη του Λειτουργικού Ελέγχου σε Ηλεκτρονικά Κυκλώματα	8
2.1 Εισαγωγή.....	8
2.2 Ανάδυση του Λειτουργικού Ελέγχου	8
2.2.1 Οικονομικοί Παράγοντες του Λειτουργικού Ελέγχου	8
2.3 Διεξαγωγή του Λειτουργικού Ελέγχου	9
2.3.1 Ο Ρόλος των Μετρητικών Οργάνων στον Λειτουργικό Έλεγχο.....	9
2.3.2 Λειτουργικός Έλεγχος Κυκλωμάτων με Συνδέσεις Σημείο σε Σημείο.....	9

2.3.3	Μετάβαση σε Πλακέτες Τυπωμένων Κυκλωμάτων και Νέες Προκλήσεις Λειτουργικού Ελέγχου	10
2.3.4	Η Άνοδος Εξειδικευμένου Εξοπλισμού για Λειτουργικό Έλεγχο	11
2.3.5	Αυτοματοποίηση Λειτουργικού Ελέγχου	12
2.4	Επίλογος	12
Κεφάλαιο 3ο: Μοντέρνα Συστήματα Ελέγχου Ηλεκτρονικών Κυκλωμάτων		13
3.1	Εισαγωγή	13
3.2	Κατηγορίες Μεθόδων Ελέγχου	13
3.2.1	Έλεγχος Εντός Κυκλώματος – In Circuit Testing	13
3.2.2	Λειτουργικός Έλεγχος Κυκλώματος – Functional Testing	14
3.3	Ανάλυση Αγοράς	14
3.3.1	Παραδείγματα συστημάτων In Circuit Testing στην Αγορά	15
3.3.2	Παραδείγματα συστημάτων Functional Testing στην Αγορά	16
3.3.3	Εναλλακτικές Επιλογές	18
3.3.4	Ανάλυση Κενού στην Αγορά	19
3.4	Επίλογος	19
Κεφάλαιο 4ο: Σχεδιασμός Συσκευής Ελέγχου Ηλεκτρονικών Κυκλωμάτων		20
4.1	Εισαγωγή	20
4.2	Στόχοι	20
4.3	Αρχιτεκτονική Συστήματος	20
4.4	Ροή Λειτουργίας	21
4.5	Σχεδίαση Συσκευής και Επιλογή Υλικού	22
4.5.1	Τεχνικές Προδιαγραφές	22
4.5.2	Επιλογή Μικροελεγκτή	23
4.5.3	Αναλογική σε Ψηφιακή Μετατροπή	24
4.5.4	Πολυπλεξία Σημάτων	30
4.5.5	Τροφοδοσία	31
4.5.6	Φυσική Διεπαφή	33
4.5.7	Ηλεκτρονικό Σχέδιο	33
4.6	Επίλογος	42
Κεφάλαιο 5ο: Κατασκευή Συσκευής		43
5.1	Εισαγωγή	43
5.2	Κατασκευή Τυπωμένου Κυκλώματος	43
5.3	Bill of Materials	45
5.4	Εξοπλισμός Συγκόλλησης	46

5.5	Συγκόλληση Στοιχείων στο PCB	47
5.6	Επίλογος	49
Κεφάλαιο 6ο: Λογισμικό		51
6.1	Εισαγωγή	51
6.2	Αρχιτεκτονική Λογισμικού	51
6.3	Επιλογή Περιβάλλοντος Ανάπτυξης	51
6.4	Έλεγχος Υλικού.....	51
6.4.1	Έλεγχος Πολυπλέκτη	51
6.4.2	Παραμετροποίηση ADC και Έλεγχος	52
6.5	Web Server Implementation.....	52
6.5.1	SPIFFS File System.....	52
6.5.2	Static File Serving	53
6.5.3	Web Socket Communication	53
6.6	Γραφική Διεπαφή	53
6.6.1	Πίνακας Μετρήσεων	53
6.6.2	Δείκτης Κατάστασης και Εκκίνηση Ελέγχου.....	54
6.6.3	Περιοχή Εμφάνισης Αποτελεσμάτων.....	54
6.6.4	Χτίστης Κανόνων	56
6.7	Επικοινωνία με Βάση Δεδομένων	58
6.7.1	Αρχιτεκτονική Βάσης Δεδομένων.....	58
6.7.2	PHP Backend Interface.....	59
6.8	Ροή Λειτουργίας ενός Τυπικού Ελέγχου.....	59
6.9	Επίλογος	60
Κεφάλαιο 7ο: Προγραμματισμός και Δοκιμή Συσκευής.....		61
7.1	Εισαγωγή.....	61
7.2	Μεταφόρτωση Προγράμματος στο ESP32	61
7.3	Δοκιμή Συσκευής	61
7.3.1	Λειτουργική Επαλήθευση του Συστήματος	62
7.3.2	Απόδοση του Συστήματος Μέτρησης	63
7.4	Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Βελτίωση	64
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		64
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Συνολικό Κόστος Συσκευής		67
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Πρόγραμμα ESP32		67
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: JavaScript		74
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: Εικόνες Gerber.....		84

Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 1-1 Ηλεκτρική στήλη [21]	2
Εικόνα 1-2 Πρώτο βιομηχανικό ρελέ [22]	4
Εικόνα 1-3 Σημερινό βιομηχανικό ρελέ [23]	4
Εικόνα 1-4 Θερμιονική βαλβίδα [24].....	4
Εικόνα 1-5 Τρίοδο [25]	4
Εικόνα 1-6 Πρώτο τρανζίστορ [26]	5
Εικόνα 1-7 Πρώτο ολοκληρωμένο κύκλωμα [27]	5
Εικόνα 1-8 Κύκλωμα με καλωδιώσεις από σημείο σε σημείο [28]	6
Εικόνα 1-9 Τυπωμένο κύκλωμα κατασκευασμένο με την μέθοδο του Alber Hanson [29].....	6
Εικόνα 1-10 Πλακέτα υψηλής πυκνότητας με μικροδιαφράγματα [30]	6
Εικόνα 1-11 Εύκαμπτο τυπωμένο κύκλωμα [31].....	6
Εικόνα 2-1 Ευκολά προσβάσιμο κύκλωμα με καλωδιώσεις σημείου με σημείου [32]	10
Εικόνα 2-2 Τυπικός χειροκίνητος έλεγχος σε ένα τυπωμένο κύκλωμα [33]	11
Εικόνα 2-3 Παράδειγμα bed of nails εξαρτήματος [34].....	11
Εικόνα 2-4 Διεπαφή bed of nails με ένα τυπωμένο κύκλωμα [35]	11
Εικόνα 2-5 Rack and stack με μετρητικά όργανα συνδεδεμένα μέσω GPIB [36]	12
Εικόνα 3-1 Keysight i3070, πλήρες σύστημα τύπου ICT [37].....	15
Εικόνα 3-2 Teradyne TestStation, πλήρες σύστημα τύπου ICT [38].....	16
Εικόνα 3-3 Keysight TP-5000, πλήρες σύστημα τύπου FCT [39].....	17
Εικόνα 3-4 Teradyne Spectrum, πλήρες σύστημα τύπου FCT [40].....	17
Εικόνα 3-5 National Instruments USB 6001, Data Acquisition Device [41].....	18
Εικόνα 4-1 Αρχιτεκτονική συσκευής ελέγχου ηλεκτρονικών κυκλωμάτων	21
Εικόνα 4-2 Διάγραμμα ροής για μια τυπική διαδικασία χρήσης της συσκευής.....	22
Εικόνα 4-3 Φωτογραφία του ESP32-WROVER-E.....	23
Εικόνα 4-4 ESP32-WROVER-E Pinout [42].....	23
Εικόνα 4-5 Φωτογραφία του ADS1115	25
Εικόνα 4-6 ADS1115 Pinout [43]	25
Εικόνα 4-7 Χρήση διαιρέτη τάσης για κλιμάκωση ενός αναλογικού σήματος.....	26
Εικόνα 4-8 Διαιρέτης τάσης με πηγή τροφοδοσίας Vbias	27
Εικόνα 4-9 Φωτογραφία του LM4051-N	29
Εικόνα 4-10 LM4051-N Pinout [44].....	29
Εικόνα 4-11 Φωτογραφία του OPA387	29
Εικόνα 4-12 OPA387 Pinout [45]	29
Εικόνα 4-13 Φωτογραφία του TXS0102.....	30
Εικόνα 4-14 TXS0102 Pinout [46].....	30
Εικόνα 4-15 Φωτογραφία του TMUX4051-Q1	31
Εικόνα 4-16 TMUX4051-Q1 Pinout [47]	31
Εικόνα 4-17 Φωτογραφία του ICL7660S.....	32
Εικόνα 4-18 ICL7660S Pinout [48]	32
Εικόνα 4-19 Φωτογραφία του TLV761	32
Εικόνα 4-20 TLV761 Pinout [49]	32
Εικόνα 4-21 Φωτογραφία τροφοδοτικού πρίζας.....	33
Εικόνα 4-22 Φωτογραφία του IDC 2x10 Pin Male.....	33
Εικόνα 4-23 Φωτογραφία του flat cable και των αγκίστρων	33

Εικόνα 4-24 Απόσπασμα Κυκλώματος – Μικροελεγκτής ESP32	34
Εικόνα 4-25 Απόσπασμα Κυκλώματος – Πολυπλέκτες Σημάτων	35
Εικόνα 4-26 Απόσπασμα Κυκλώματος – Προσαρμογή Σήματος και Αναλογική σε Ψηφιακή Μετατροπή	36
Εικόνα 4-27 Απόσπασμα Κυκλώματος – logic Translator	37
Εικόνα 4-28 Απόσπασμα Κυκλώματος – Πηγή Τάσης Ακριβείας (Vbias)	37
Εικόνα 4-29 Απόσπασμα Κυκλώματος – Τροφοδοσία 5V	38
Εικόνα 4-30 Απόσπασμα Κυκλώματος – Τροφοδοσία -12V	38
Εικόνα 4-31 Απόσπασμα Κυκλώματος – Τροφοδοσία +12V	39
Εικόνα 4-32 Κύκλωμα Συσκευής Ελέγχου Ηλεκτρονικών Κυκλωμάτων	40
Εικόνα 4-33 Κύκλωμα Τροφοδοτικών Συσκευής Ελέγχου Ηλεκτρονικών Κυκλωμάτων	41
Εικόνα 5-1 Μπροστινή όψη τυπωμένου κυκλώματος κατά την σχεδίαση στο πρόγραμμα Altium	43
Εικόνα 5-2 Πίσω όψη τυπωμένου κυκλώματος κατά την σχεδίαση στο πρόγραμμα Altium.....	44
Εικόνα 5-3 Μπροστινή όψη κυκλώματος μέσω του PCB viewer της JLCPCB	44
Εικόνα 5-4 Πίσω όψη κυκλώματος μέσω του PCB viewer της JLCPCB	45
Εικόνα 5-5 Σταθμός συγκόλλησης YIHUA 936 με ρυθμιζόμενη θερμοκρασία.....	46
Εικόνα 5-6 Αναλώσιμα υλικά α) Καλάι, β) Σολντερίνη, γ) Τρέσα αποκόλλησης.....	47
Εικόνα 5-7 Τυπωμένο κύκλωμα χωρίς ηλεκτρονικά στοιχεία συγκολλημένα	47
Εικόνα 5-8 Τοποθέτηση και συγκόλληση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.....	48
Εικόνα 5-9 Τοποθέτηση και συγκόλληση πυκνωτών και αντιστάσεων.....	48
Εικόνα 5-10 Τοποθέτηση και συγκόλληση header και connector	49
Εικόνα 5-11 Ολοκληρωμένη προγραμματιζόμενη συσκευή ελέγχου ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.....	49
Εικόνα 6-1 Εργαλείο μεταφόρτωσης αρχείων στην μνήμη Flash του ESP32	53
Εικόνα 6-2 Αποτελέσματα μετρήσεων σε JSON μορφή.....	53
Εικόνα 6-3 Απόσπασμα γραφικής διεπαφής – Πίνακας μετρήσεων.....	54
Εικόνα 6-4 Απόσπασμα γραφικής διεπαφής – Ένδειξη κατάστασης.....	54
Εικόνα 6-5 Απόσπασμα γραφικής διεπαφής – Ένδειξη κατάστασης με τρεχούμενο έλεγχο	54
Εικόνα 6-6 Απόσπασμα γραφικής διεπαφής – Ένδειξη κατάστασης με ολοκληρωμένο έλεγχο.....	54
Εικόνα 6-7 Απόσπασμα γραφικής διεπαφής – Περιοχή εμφάνισης αποτελεσμάτων	55
Εικόνα 6-8 Απόσπασμα γραφικής διεπαφής – Εμφάνιση θετικού αποτελέσματος μετά από έλεγχο... ..	55
Εικόνα 6-9 Απόσπασμα γραφικής διεπαφής – Εμφάνιση αρνητικού αποτελέσματος με μήνυμα από ενεργοποιημένο κανόνα	56
Εικόνα 6-10 Απόσπασμα γραφικής διεπαφής – Χτίστης κανόνων	56
Εικόνα 6-11 Απόσπασμα γραφικής διεπαφής – Επιλογή αγκίστρου κατά την δημιουργία ενός κανόνα	57
Εικόνα 6-12 Απόσπασμα γραφικής διεπαφής – Επιλογή συνθήκης κατά την δημιουργία ενός κανόνα	57
Εικόνα 6-13 Απόσπασμα γραφικής διεπαφής – Επιλογή λογικού τελεστή κατά την δημιουργία ενός κανόνα	58
Εικόνα 6-14 Απόσπασμα γραφικής διεπαφής – Εισαγωγή μηνύματος και δημιουργία κανόνα.....	58
Εικόνα 7-1 Μεταφόρτωση του προγράμματος στο ESP32.....	61
Εικόνα 7-2 Ορισμός εύρους τάσης στους ακροδέκτες υπό χρήση.....	62
Εικόνα 7-3 Εισαγωγή συριακού αριθμού και εντολής εργασίας στα ανάλογα πεδία	62
Εικόνα 7-4 Δημιουργία κανόνα.....	62
Εικόνα 7-5 Αποτέλεσμα μετρήσεων μέσω αυτόματης εναλλαγής καναλιού εισόδου	62
Εικόνα 7-6 Πίνακας χωρίς δεδομένα	63

Εικόνα 7-7 Εμπλουτισμός πίνακα μέσω Web Socket	63
Εικόνα 7-8 Καταγραφές στην βάση δεδομένων.....	63
Εικόνα 7-9 Αποτέλεσμα με εμφάνιση μηνύματος από ενεργοποιημένο κανόνα.....	63

Κατάλογος Πινάκων

Table 1 Σύνολο ηλεκτρονικών στοιχείων που απαρτίζουν την συσκευή.....	45
Table 2 Πίνακας “test_result_history” της βάσης δεδομένων.....	58

Συντομογραφίες

Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΠΙΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
Π.Ε.	Πτυχιακή Εργασία
PCB	Printed Circuit Board
FPCB	Flexible Printed Circuit Board
mm	Millimeter
π.Χ.	προ Χριστού
GPIB	General Purpose Interface Bus
PCB	Printed Circuit Board
SMD	Surface Mount Device
ADC	Analog to Digital Converter
MUX	Multiplexer
IDE	Integrated Development Environment

Κεφάλαιο 1ο: Ιστορική Εξέλιξη της Ηλεκτρονικής και των Ηλεκτρονικών Κυκλωμάτων

1.1 Εισαγωγή

Ο τομέας της ηλεκτρονικής έχει υποστεί αξιοσημείωτες μεταμορφώσεις τους τελευταίους δύο αιώνες. Αυτό το κεφάλαιο παρακολουθεί την ιστορική εξέλιξη της ηλεκτρονικής και της τεχνολογίας κυκλωμάτων, από τις πρώτες παρατηρήσεις ηλεκτρικών φαινομένων έως τις πολύπλοκες πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων και τα ολοκληρωμένα συστήματα που ορίζουν τη σύγχρονη ηλεκτρονική.

1.2 Οι Βάσεις του Ηλεκτρισμού

1.2.1 Πρώτες Παρατηρήσεις και Πειράματα με τον Ηλεκτρισμό

Η μελέτη του ηλεκτρισμού ξεκίνησε με απλές παρατηρήσεις φυσικών φαινομένων. Η πρώτη καταγεγραμμένη παρατήρηση του ηλεκτρισμού έγινε από τον Έλληνα φιλόσοφο Θάλη Μιλήσιο περίπου 600 χρόνια π.Χ. όπου τρίβοντας κεχριμπάρι με γούνα ζώου, μπορούσε να ελκύσει ελαφρά αντικείμενα επάνω στο κεχριμπάρι, ένα φαινόμενο που αναγνωρίζεται σήμερα ως στατικός ηλεκτρισμός. Για σχεδόν δυο χιλιετίες, τέτοια ηλεκτρικά φαινόμενα παρέμειναν αξιοπερίεργα χωρίς θεωρητική εξήγηση και πρακτική εφαρμογή. Ανανεωμένο ενδιαφέρον για τα ηλεκτρικά φαινόμενα έφερε η επιστημονική επανάσταση του 17^{ου} αιώνα, όπου τα πειράματα του William Gilbert έκαναν διάκριση μεταξύ μαγνητικών και ηλεκτρικών φαινομένων, θεσπίζοντας μερικά από τα πρώτα θεωρητικά πλαίσια για την κατανόηση του ηλεκτρισμού [1].

1.2.2 Η Βολταϊκή Επανάσταση

Η πραγματική αρχή της πρακτικής ηλεκτρολογίας ήρθε με την εφεύρεση της ηλεκτρικής μπαταρίας από τον Alessandro Volta το 1800. Η ηλεκτρική στήλη όπως ονομάζεται, κατασκευασμένη από εναλλασσόμενους δίσκους ψευδάργυρου και χαλκού που χωρίζονταν από ύφασμα εμποτισμένο σε διάλυμα αλατιού, παρήγαγε την πρώτη πηγή συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος [2]. Αυτή η συσκευή ήταν επαναστατική επειδή παρείχε μια σταθερή, αξιόπιστη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας που μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για συστηματικό πειραματισμό. Ο Michael Faraday χρησιμοποίησε την ηλεκτρική στήλη στην πρωτοποριακή του έρευνα για την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή, το πειραματικό έργο του στις δεκαετίες του 1820 και 1830 καθιέρωσε πολλές θεμελιώδεις αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού. Η ανακάλυψη της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής απέδειξε ότι ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο μπορούσε να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα, θέτοντας τις βάσεις για τις ηλεκτρικές γεννήτριες και τους μετασχηματιστές [3].



Εικόνα 1-1 Ηλεκτρική στήλη [21]

1.2.3 Μαθηματική Τυποποίηση του Ηλεκτρισμού

Ο μετασχηματισμός του ηλεκτρισμού από πειράματα σε θεμελιώδεις αρχές απαιτούσε μαθηματικά πλαίσια που θα μπορούσαν να προβλέψουν και να περιγράψουν ποσοτικά την συμπεριφορά του ηλεκτρισμού. Το έργο του Georg Simon Ohm το 1827 παρείχε το πρώτο τέτοιο πλαίσιο με τον νόμο του που σχετιζόταν με την τάση, το ρεύμα και την αντίσταση [2]. Ο νόμος του Ohm επέτρεψε στους μηχανικούς να σχεδιάσουν κυκλώματα με προβλέψιμα χαρακτηριστικά αντί να βασίζονται σε δοκιμές. Στην συνέχεια οι εξισώσεις του James Clerk Maxwell που δημοσιεύθηκαν το 1867, ενοποίησαν τον ηλεκτρισμό και τον μαγνητισμό σε ένα ενιαίο θεωρητικό πλαίσιο [4]. Το έργο του Maxwell απέδειξε ότι τα ηλεκτρικά και τα μαγνητικά φαινόμενα ήταν θεμελιωδώς αλληλένδετες εκδηλώσεις του ηλεκτρομαγνητισμού και οι εξισώσεις του προέβλεψαν την ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και δημιούργησαν τη βάση για τις ραδιοεπικοινωνίες. Οι συνεισφορές των Andre Marie Ampere, Carl Friedrich Gauss και άλλων επιστημόνων του 19^{ου} αιώνα εμπλούτισαν περαιτέρω την ηλεκτρική θεωρία, παρέχοντας μαθηματικές περιγραφές των ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων και δημιουργώντας σχέσεις μεταξύ ηλεκτρικών μεγεθών [2]. Μέχρι τα τέλη του 19^{ου} αιώνα, η ηλεκτρολογία είχε ωριμάσει σε ένα μαθηματικά βασισμένο κλάδο.

1.2.4 Εξηλεκτρισμός της Κοινωνίας

Η μετάβαση από πειράματα στα εργαστήρια στη βιομηχανική εφαρμογή του ηλεκτρισμού έφτασε γρήγορα στα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Ο Thomas Edison απέδειξε την εμπορική βιωσιμότητα του ηλεκτρικού φωτισμού με την ανάπτυξη του λαμπτήρα πυρακτώσεως το 1879 και στη συνέχεια το 1882 ο σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας Pearl Street που άνοιξε στη Νέα Υόρκη, απέδειξε ότι η ηλεκτρική ενέργεια μπορούσε να παραχθεί κεντρικά και να διανεμηθεί σε πολλαπλούς καταναλωτές. Εκείνη την περίοδο επίσης έλαβε μέρος ο περίφημος ανταγωνισμός μεταξύ του συνεχούς ρεύματος του Thomas Edison και του εναλλασσόμενου ρεύματος του Nikola Tesla και διαμόρφωσε τις βάσεις για την ανάπτυξη της ηλεκτρικής υποδομής [2]. Η τελική υιοθέτηση του εναλλασσόμενου ρεύματος για την

διανομή ενέργειας αντιπροσώπευε μια κρίσιμη τεχνολογική απόφαση που συνεχίζεται μέχρι και σήμερα στα σύγχρονα ηλεκτρικά δίκτυα. Μέχρι τις αρχές του 20^{ου} αιώνα η ηλεκτρική ενέργεια είχε αναγνωριστεί ως καθοριστικό χαρακτηριστικό της δεύτερης βιομηχανικής επανάστασης, μέσω αυτής οι ηλεκτροκινητήρες έφεραν επανάσταση στην κατασκευή και ο ηλεκτρικός φωτισμός επέκτεινε τις παραγωγικές ώρες.

1.3 Εξέλιξη των Ηλεκτρονικών Κυκλωμάτων

Η έννοια ενός ηλεκτρικού κυκλώματος προέκυψε απευθείας από την μπαταρία. Στην πιο βασική μορφή, ένα κύκλωμα απαιτεί τρία στοιχεία, μια πηγή διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού, μια αγωγή διαδρομή για τη ροή του ρεύματος και ένα φορτίο που χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια [5]. Η ηλεκτρική στήλη του Volta παρείχε την πηγή τάσης και η σύνδεση διαφόρων υλικών στους ακροδέκτες του επέτρεπε την παρατήρηση ηλεκτρικών φαινομένων, όπως η θέρμανση ή η εκτροπή της βελόνας από μια πυξίδα. Οι πρώτοι πειραματιστές κυκλωμάτων αναγνώρισαν γρήγορα ότι η διάταξη των στοιχείων σε ένα κύκλωμα επηρέαζε τη συμπεριφορά του κυκλώματος. Οι συνδέσεις σε σειρά, όπου το ρεύμα ρέει διαδοχικά μέσω των στοιχείων, παρήγαγαν διαφορετικά αποτελέσματα από τις παράλληλες συνδέσεις, όπου το ρεύμα διαιρείται σε πολλαπλές διαδρομές [5]. Αυτές οι βασικές διαμορφώσεις κυκλωμάτων, που ερευνήθηκαν για πρώτη φορά στις αρχές του 19^{ου} αιώνα, παραμένουν θεμελιώδεις για τον σχεδιασμό κυκλωμάτων σήμερα.

1.3.1 Πρώτη Ευρεία Αξιοποίηση Ενός Κυκλώματος

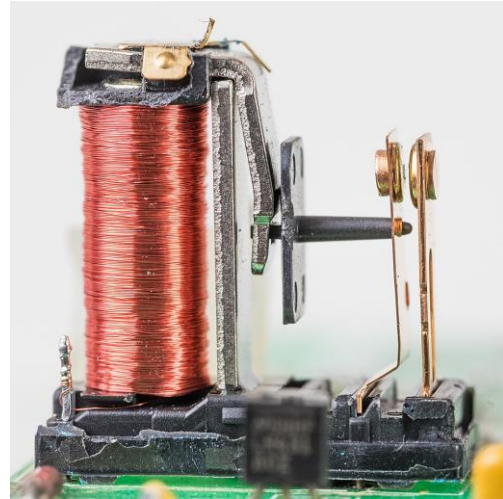
Ο τηλεγράφος, που αναπτύχθηκε στα μέσα του 19^{ου} αιώνα, αντιπροσώπευε την πρώτη μεγάλη κλίμακας πρακτική εφαρμογή ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Τα συστήματα τηλεγράφου απαιτούσαν αξιόπιστη λειτουργία σε μεγάλες αποστάσεις, οδηγώντας καινοτομίες στο σχεδιασμό κυκλωμάτων, τη μόνωση και τη μετάδοση σήματος [6]. Οι προκλήσεις της διατήρησης της ακεραιότητας του σήματος σε εκτεταμένους αγωγούς οδήγησαν σε μελέτες σχετικά με την αντίσταση, την χωρητικότητα και την επαγωγή που εμπλούτισαν τη θεωρία κυκλωμάτων.

1.3.2 Το Ηλεκτρομαγνητικό Ρελέ

Το 1835 ο Joseph Henry εφηύρε το ηλεκτρομαγνητικό ρελέ, ένας κομψά απλός μηχανισμός ο οποίος επέτρεπε την όπλιση και αφόπλιση ενός μηχανικού διακόπτη μέσω της έλξης από ένα ηλεκτρομαγνήτη [7]. Αυτό επέτρεπε στο ρελέ να λειτουργεί τόσο ως ενισχυτής όσο και ως διακόπτης. Ο Samuel Morse αναγνώρισε γρήγορα τις δυνατότητες τους, ενσωματώνοντας το ρελέ σε σταθμούς αναμετάδοσης για το τηλεγράφο το 1840 [7]. Μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1870 τα ρελέ ήδη αποτελούσαν τη ραχοκοκαλιά των τηλεφωνικών κέντρων και παρέμειναν σε χρήση μέχρι και το 1940 όταν καινοτόμοι όπως ο Konrad Zuse, ο Howard Aiken και ο George Stibitz χρησιμοποίησαν τα ρελέ ως την λογική και αριθμητική καρδιά στους πρώτους υπολογιστές, διαμορφώνοντας τα σύγχρονα ψηφιακά συστήματα [7].



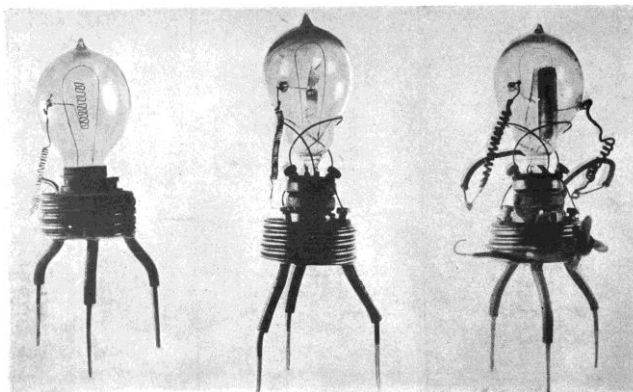
Εικόνα 1-2 Πρώτο βιομηχανικό ρελέ [22]



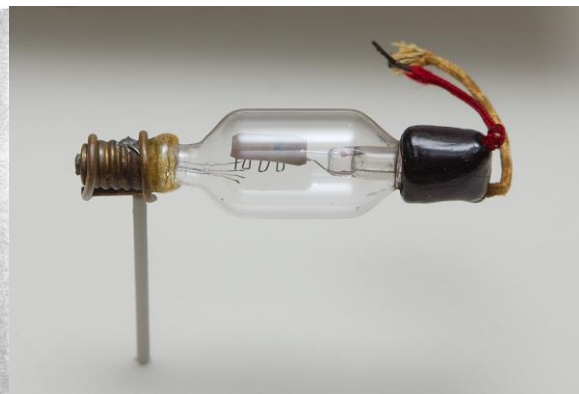
Εικόνα 1-3 Σημερινό βιομηχανικό ρελέ [23]

1.3.3 Η Ηλεκτρονική Λυχνία

Η ανακάλυψη του ηλεκτρονίου το 1897 και η επακόλουθη ανάπτυξη της τεχνολογίας των λυχνιών κενού στις αρχές του 20^{ου} αιώνα άνοιξαν νέες δυνατότητες για τα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Ο John Ambrose Fleming εφηύρε τη θερμιονική βαλβίδα το 1904, μια συσκευή που μπορούσε να ανορθώσει τα ραδιοσήματα εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές ρεύμα, ανιχνεύσιμο από έναν τηλεφωνικό δέκτη [8]. Η βαλβίδα δύο ηλεκτροδίων του Ambrose Fleming ήταν ο πρώτος ηλεκτρονικός ανορθωτής ραδιοκυμάτων ή αλλιώς η πρώτη δίοδο. Το 1906 ο Lee De Forest βελτίωσε σημαντικά το σχέδιο του Ambrose Fleming προσθέτοντας ένα πλέγμα ελέγχου μεταξύ της καθόδου και της ανόδου, τα τρία αυτά ηλεκτρόδια δημιούργησαν την πρώτη τριόδο [8]. Αυτή η λυχνία κενού μπορούσε να ενισχύσει σήματα, όχι μόνο να τα ανορθώσει, καθιστώντας την το θεμέλιο για τις ραδιοεπικοινωνίες και τα συστήματα ραντάρ [4].



Εικόνα 1-4 Θερμιονική βαλβίδα [24]



Εικόνα 1-5 Τριόδο [25]

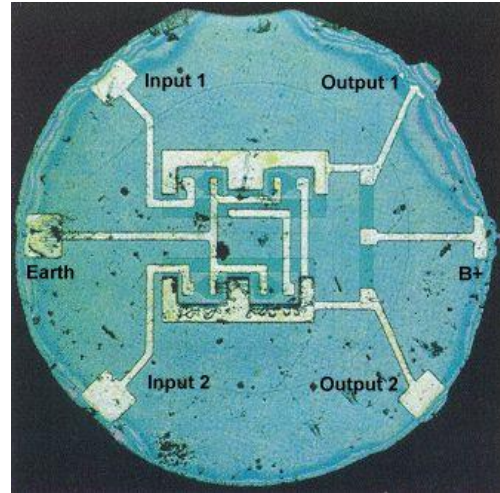
1.3.4 Το Τρανζίστορ

Η εφεύρεση του τρανζίστορ στα εργαστήρια Bell το 1947 μεταμόρφωσε ριζικά την τεχνολογία των κυκλωμάτων. Τα τρανζίστορ μπορούσαν να εκτελούν τις ίδιες λειτουργίες ενίσχυσης και μεταγωγής με τις λυχνίες κενού, αλλά ήταν μικρότερα, καταναλώναν λιγότερη ενέργεια και ήταν πιο αξιόπιστα καθώς

αποτελούνταν από ένα ενιαίο ημιαγωγό [6]. Αυτή η σημαντική ανακάλυψη επέτρεψε την σμίκρυνση των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και έθεσε τις βάσεις για την ψηφιακή επανάσταση, ενώ παράλληλα έκανε πρακτικές εφαρμογές που θα ήταν αδύνατες με την τεχνολογία των λυχνιών κενού. Ελάχιστα χρόνια αργότερα η εφεύρεση του τρανζίστορ έφερε την ανάπτυξη του ολοκληρωμένου κυκλώματος. Συγκεκριμένα, τον Σεπτέμβριο του 1958 ο Jack Kilby στην Texas Instruments επέδειξε το πρώτο λειτουργικό κύκλωμα με όλα τα εξαρτήματα του να σχηματίζονται επάνω σε ένα ενιαίο ημιαγωγό [9], ενώ ανεξάρτητα, τον Ιανουάριο του 1959 ο Robert Noyce στην Fairchild Semiconductor κατέγραψε το δικό του όραμα για ολοκληρωμένα κυκλώματα [10]. Τόσο ο Kilby όσο και ο Noyce θεωρούνται συν-εφευρέτες του ολοκληρωμένου κυκλώματος.



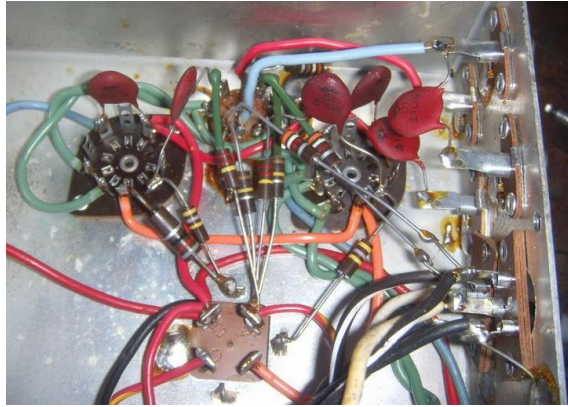
Εικόνα 1-6 Πρώτο τρανζίστορ [26]



Εικόνα 1-7 Πρώτο ολοκληρωμένο κύκλωμα [27]

1.3.5 Το Τυπωμένο Κύκλωμα

Παράλληλα με την ανάπτυξη ενεργών εξαρτημάτων όπως την ηλεκτρονική λυχνία, αναπτύχθηκαν και νέες μέθοδοι διασύνδεσης εξαρτημάτων. Τα πρώτα ηλεκτρικά κυκλώματα χρησιμοποιούσαν καλωδίωση από σημείο σε σημείο, όπου κάθε σύνδεση γινόταν μέσω καλωδίων στα άκρα των ηλεκτρονικών στοιχείων, μια προσέγγιση η οποία με τα χρόνια αποδείχθηκε επιρρεπής σε σφάλματα και μη πρακτική για πολύπλοκα κυκλώματα. Την λύση σε αυτά τα προβλήματα έφερε το τυπωμένο κύκλωμα, η έννοια του τυπωμένου κυκλώματος ή αλλιώς Printed Circuit Board (PCB) εμφανίστηκε στις αρχές του 20^{ου} αιώνα με την πρώτη μορφή αυτών των κυκλωμάτων να αναπτύσσεται το 1903 από τον Alber Hanson. Εφαρμόζοντας λεπτά φύλλα αγωγών επάνω σε πλακέτες που προσφέραν μόνωση, το αγωγίμο φύλλο μπορούσε να κοπεί με τρόπο ώστε να δημιουργεί συνδέσεις μεταξύ των ηλεκτρονικών στοιχείων [11].



Εικόνα 1-8 Κύκλωμα με καλωδιώσεις από σημείο σε σημείο [28]

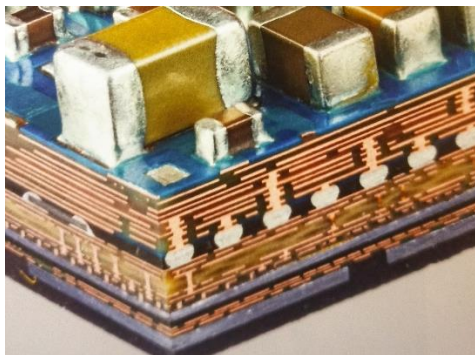


Εικόνα 1-9 Τυπωμένο κύκλωμα κατασκευασμένο με την μέθοδο του Alber Hanson [29]

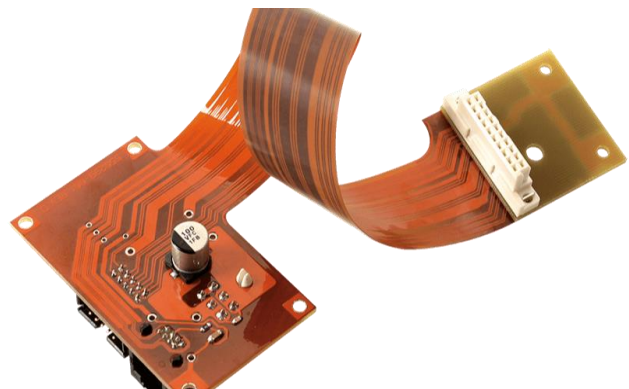
Στην συνέχεια το 1936 ο Paul Eisler επεκτείνοντας την ιδέα του Hanson, εφηύρε την πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος όπως γνωρίζεται σήμερα [11]. Η ανάπτυξη των τυπωμένων κυκλωμάτων συνέχισε να επιταχύνεται με τα χρόνια και έλαβε έμφαση στον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, καθώς ορισμένες στρατιωτικές εφαρμογές απαιτούσαν αξιόπιστα και μαζικά παραγόμενα ηλεκτρονικά συγκροτήματα.

1.3.6 Μοντέρνες Εκδοχές Τυπωμένων Κυκλωμάτων

Τα πρώτα τυπωμένα κυκλώματα αποτελούνταν από μια αγωγική στρώση, στην συνέχεια προστέθηκε δεύτερη στρώση και πλέον υπάρχουν επιλογές όπως οι πλακέτες διασύνδεσης υψηλής πυκνότητας στις οποίες χρησιμοποιούνται μικροδιαφράγματα για τη σύνδεση πολλαπλών αγωγίων στρώσεων μεταξύ τους επιτρέποντας εξαιρετικά πυκνή δρομολόγηση ιχνών. Ακόμη μια επιλογή είναι τα εύκαμπτα τυπωμένα κυκλώματα τα οποία μπορούν να λυγίσουν και να διπλωθούν, επιτρέποντας νέους παράγοντες μορφής για ηλεκτρονικές συσκευές, ενώ τα άκαμπτα – εύκαμπτα τυπωμένα κυκλώματα συνδυάζουν τα άκαμπτα και εύκαμπτα τμήματα, υποστηρίζοντας εφαρμογές όπου τα κυκλώματα πρέπει να επιτρέπουν κάμψη σε κάποια σημεία αλλά σταθερά τμήματα για τοποθέτηση εξαρτημάτων σε άλλα σημεία.



Εικόνα 1-10 Πλακέτα υψηλής πυκνότητας με μικροδιαφράγματα [30]



Εικόνα 1-11 Εύκαμπτο τυπωμένο κύκλωμα [31]

1.4 Επιμονή των Θεμελιωδών Αρχών

Παρά τις εξαιρετικές προόδους στην τεχνολογία κυκλωμάτων κατά την διάρκεια δύο αιώνων, οι θεμελιώδεις αρχές που θεσπίστηκαν τον 19^ο αιώνα παραμένουν εξίσου έγκυρες σήμερα όπως όταν ανακαλύφθηκαν για πρώτη φορά. Ο νόμος του Ohm, που διατυπώθηκε το 1827, εξακολουθεί να περιγράφει τη σχέση μεταξύ τάσης, ρεύματος και αντίστασης σε κάθε κύκλωμα, από το απλούστερο έως το πιο σύνθετο [2]. Οι νόμοι του Kirchhoff, που αναπτύχθηκαν το 1845 εξακολουθούν να διέπουν το ρεύμα και την τάση στα δίκτυα κυκλωμάτων. Οι πτώσεις τάσης στα στοιχεία ενός κυκλώματος, η ροή ρεύματος μέσω αγωγίων διαδρομών και η διασπορά ισχύος στα ωμικά εξαρτήματα ακολουθούν όλες αρχές που θα ήταν αναγνωρίσιμες στους πρωτοπόρους της ηλεκτρικής ενέργειας του 19^{ου} αιώνα. Αυτή η συνέχεια μεταξύ των ιστορικών βασικών αρχών και της σύγχρονης τεχνολογίας είναι αξιοσημείωτη.

1.5 Επίλογος

Το κεφάλαιο αυτό αποτέλεσε αναδρομή στην εξέλιξη των ηλεκτρικών κυκλωμάτων, αυτή η ιστορία αποκαλύπτει τη σωρευτική γνώση που απαιτείται για να υπάρχει τεχνολογική πρόοδος, από το ρελέ μέχρι την λυχνία κενού, από το τρανζίστορ μέχρι τα ολοκληρωμένα κυκλώματα. Αυτό σημαίνει πως τα κυκλώματα που σχεδιάζονται σήμερα ενσωματώνουν δύο αιώνες γνώσης, η κατανόηση αυτού του ιστορικού πλαισίου επιτρέπει την προσέγγιση των προκλήσεων που παρουσιάζουν τα σύγχρονα κυκλώματα. Στα κεφάλαια που ακολουθούν θα γίνει επέκταση στις προκλήσεις του λειτουργικού ελέγχου κυκλωμάτων, ένα ζήτημα που εξελίσσεται παράλληλα της σχεδίασης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

Κεφάλαιο 2ο: Η Αναγκαιότητα και η Εξέλιξη του Λειτουργικού Ελέγχου σε Ηλεκτρονικά Κυκλώματα

2.1 Εισαγωγή

Τα ηλεκτρονικά κυκλώματα σχεδιάζονται και κατασκευάζονται για να εκτελούν συγκεκριμένες λειτουργίες όπως ενίσχυση σημάτων, έλεγχο μηχανήματων και αμέτρητες άλλες εργασίες που οι άνθρωποι δεν μπορούν ή προτιμούν να μην εκτελούν χειροκίνητα. Στα στάδια του σχεδιασμού ή της κατασκευής των κυκλωμάτων όμως μπορούν να προκύψουν ελαττώματα τα οποία να εμποδίσουν την ορθή λειτουργία των κυκλωμάτων, όσο τελειοποιημένη και αν είναι η διαδικασία παραγωγής πάντα θα υπάρχει η αμφιβολία για το αν ένα κύκλωμα λειτουργεί όπως σχεδιάστηκε να λειτουργεί ή όχι. Το δεύτερο κεφάλαιο επεκτείνει στην ανάγκη επαλήθευσης της σωστής λειτουργίας ενός κυκλώματος και πως επιτυγχάνονταν αυτό με τα εργαλεία της εποχής.

2.2 Ανάδυση του Λειτουργικού Ελέγχου

Τα ηλεκτρικά κυκλώματα εξελίχθηκαν από απλά κυκλώματα με συνδέσεις από σημείο σε σημείο σε εξελιγμένες πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων χάρις τις προόδους, στην κατανόηση του ηλεκτρισμού και στις καινοτομίες τεχνικής κατασκευής, αυτή η εξέλιξη στην πολυπλοκότητα των κυκλωμάτων κατέστησε αναγκαία μια παράλληλη ανάπτυξη στις μεθοδολογίες δοκιμών. Καθώς τα κυκλώματα μεταβαίνουν από απλά, παρατηρήσιμα συστήματα σε σύνθετα συγκροτήματα με εκατοντάδες στοιχεία, η δυνατότητα μεθοδολογικής επαλήθευσης της σωστής λειτουργίας έγινε επιθυμητή. Τα πρώτα ηλεκτρικά κυκλώματα ήταν αρκετά απλά ώστε η συμπεριφορά τους να μπορούσε να γίνει κατανοητή μέσω παρατήρησης, ένας χειριστής τηλεγράφου μπορούσε να ακούσει εάν ένα ρελέ έκανε σωστά κλικ και εάν μια λάμπα άναβε ή όχι. Ωστόσο, καθώς τα κυκλώματα έγιναν πιο σύνθετα η άμεση παρατήρηση τους έγινε μη δυνατή, με αποτέλεσμα οι μεθοδολογίες λειτουργικού ελέγχου να πρέπει να εξελιχθούν μαζί τους.

2.2.1 Οικονομικοί Παράγοντες του Λειτουργικού Ελέγχου

Η ανάγκη του λειτουργικού ελέγχου προκύπτει επίσης από οικονομικούς παράγοντες, όσο ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα χρησιμοποιείται για την παροχή υπηρεσιών ή πωλείται ως προϊόν, δημιουργείται η ανάγκη για γνώση της λειτουργικής κατάστασης του. Κατά κύριο λόγο τα οικονομικά που αφορούν τον λειτουργικό έλεγχο, περιλαμβάνουν την εξισορρόπηση δύο ανταγωνιστικών κόστων, του κόστους εφαρμογής λειτουργικού ελέγχου έναντι του κόστους των ελαττωμάτων που φτάνουν στους πελάτες. Τα κόστη λειτουργικού ελέγχου περιλαμβάνουν πάγια και μεταβλητά στοιχεία. Τα πάγια κόστη αποτελούνται από την αγορά εξοπλισμού και τα μεταβλητά κόστη αποτελούνται από τον χρόνο διάρκειας του ελέγχου, τη συντήρηση του εξοπλισμού και τους μισθούς των χειριστών [12]. Ωστόσο, το κόστος μη δοκιμής συνήθως υπερβαίνει το κόστος δοκιμής καθώς επιτρέπει σε ελαττώματα να φτάσουν στους πελάτες, οι βλάβες στα χέρια των πελατών συνεπάγονται με έξοδα παροχή εγγύησης, έξοδα υποστήριξης πελατών και έξοδα αντικατάστασης [13]. Επιπλέον, έρευνες έχουν δείξει ότι η επένδυση σε λειτουργικό έλεγχο συχνά αποφέρει καλύτερες αποδόσεις από την επένδυση σε απλή βελτίωση διαδικασιών της παραγωγής, ιδιαίτερα όταν οι βελτιώσεις μιας διαδικασίας απαιτούν σημαντική επένδυση [14].

2.3 Διεξαγωγή του Λειτουργικού Ελέγχου

2.3.1 Ο Ρόλος των Μετρητικών Οργάνων στον Λειτουργικό Έλεγχο

Τα μετρητικά όργανα όπως το βολτόμετρο, το αμπερόμετρο και ο μετρητής αντίστασης αποτελούν την βάση του ελέγχου λειτουργίας ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Σε αντίθεση με τον οπτικό έλεγχο που μπορεί να ανιχνεύσει μόνο φυσικά ελαττώματα, οι ηλεκτρικές μετρήσεις επαληθεύουν ότι τα κυκλώματα λειτουργούν σωστά ποσοτικοποιώντας την ηλεκτρική τους συμπεριφορά. Η θεμελιώδης αρχή είναι απλή, τα κυκλώματα έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν με συγκεκριμένα επίπεδα τάσης σε διάφορους κόμβους, συγκεκριμένες ροές ρεύματος και συγκεκριμένες τιμές αντίστασης μέσω των ηλεκτρονικών στοιχείων τους. Η μεθοδική μέτρηση αυτών των παραμέτρων επιτρέπει την ανίχνευση κατασκευαστικών ελαττωμάτων που δεν ανιχνεύονται οπτικά.

2.3.2 Λειτουργικός Έλεγχος Κυκλωμάτων με Συνδέσεις Σημείο σε Σημείο

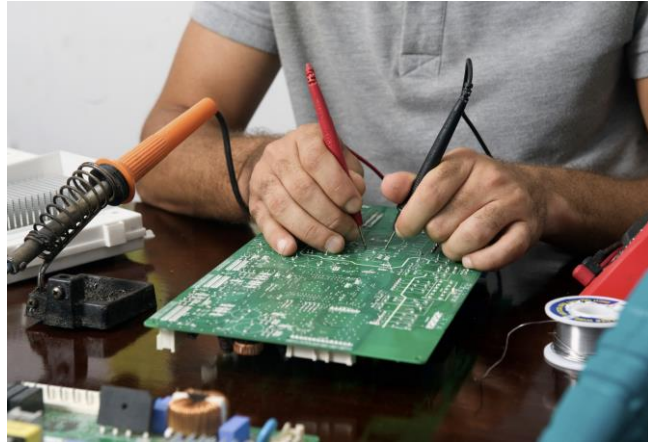
Στην κατασκευή κυκλωμάτων με συνδέσεις από σημείο σε σημείο, τα οποία είδαν χρήση από το 1920 έως και το 1970, τα ηλεκτρονικά στοιχεία και τα καλώδια συγκολλούνται απευθείας μεταξύ τους. Αυτή η μέθοδος κατασκευής είναι χρονοβόρα, αλλά προσέφερε προσβασιμότητα και ορατότητα για μετρήσεις και επιθεωρήσεις. Ένας τυπικός λειτουργικός έλεγχος ξεκινούσε με την οπτική επιθεώρηση για την επαλήθευση την σωστής τοποθέτησης των στοιχείων, την δρομολόγηση των καλωδίων και την σταθερότητα των κολλήσεων, ενώ σε συνδυασμό με τον οπτικό έλεγχο διεξάγονταν και ηλεκτρικές μετρήσεις σε βασικούς κόμβους του κυκλώματος με ανάλογα μετρητικά όργανα. Ο λειτουργικός έλεγχος δεν ήταν υποχρεωτικό να διεξαχθεί σαν τελευταίο βήμα, η προσβασιμότητα επέτρεπε τον έλεγχο σε τμήματα του κυκλώματος προτού προχωρήσει η κατασκευή του επόμενου. Αυτή η σταδιακή επαλήθευση ελαχιστοποιούσε τον χρόνο αντιμετώπισης προβλημάτων επειδή τα προβλήματα απομονώνονταν στην πιο πρόσφατα ολοκληρωμένη εργασία.



Εικόνα 2-1 Ευκολά προσβάσιμο κύκλωμα με καλωδιώσεις σημείου με σημείου [32]

2.3.3 Μετάβαση σε Πλακέτες Τυπωμένων Κυκλωμάτων και Νέες Προκλήσεις Λειτουργικού Ελέγχου

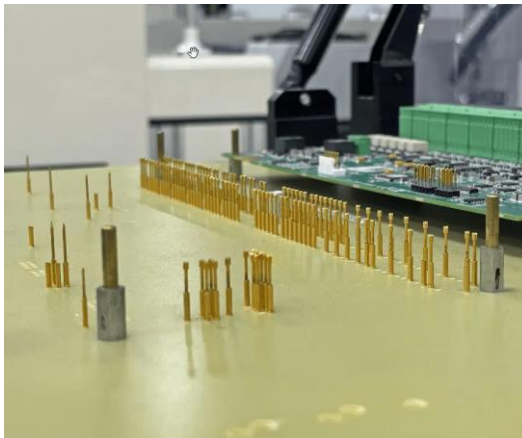
Η ευρεία υιοθέτηση των τυπωμένων κυκλωμάτων μετέτρεψε ριζικά την κατασκευή ηλεκτρονικών ειδών και τον λειτουργικό έλεγχο. Τα τυπωμένα κυκλώματα μείωσαν τον χρόνο συναρμολόγησης σε σύγκριση με την χειροκίνητη καλωδίωση, εξάλειψαν τα σφάλματα της χειροκίνητης καλωδίωσης και επέτρεψαν την αξιόπιστη μαζική παραγωγή [15]. Ωστόσο, εισήγαγαν νέες προκλήσεις στον λειτουργικό έλεγχο. Καθώς η πυκνότητα των τυπωμένων κυκλωμάτων αυξήθηκε και οι πλακέτες εξελίχθηκαν από μονόπλευρες σε πολυστρωματικές, η πολυπλοκότητα του λειτουργικού ελέγχου αυξήθηκε. Ο οπτικός έλεγχος, προσαρμοσμένος από τα σημείο σε σημείο κυκλώματα αντιπροσώπευε την πρώτη μέθοδο δοκιμής των τυπωμένων κυκλωμάτων. Ο εντοπισμός προβλημάτων γινόταν συστηματικά με αναζήτηση λανθασμένης τοποθέτησης στοιχείων, λανθασμένες τιμές, ελαττώματα στην συγκόλληση όπως γεφυρώσεις και κρύες κολλήσεις, κατεστραμμένα στοιχεία και κατασκευαστικά σφάλματα στην πλακέτα. Σε βάθος χρόνου όμως η μείωση των μεγεθών των ηλεκτρονικών στοιχείων και η υψηλή πιθανότητα ανθρωπίνου σφάλματος σε επαναλαμβανόμενες εργασίες κατέστησαν την οπτική επιθεώρηση ανεπαρκή για μαζική παραγωγή. Παρόμοια ζητήματα εμφανίστηκαν και με τις χειροκίνητες ηλεκτρικές μετρήσεις, όσο τα νούμερα παραγωγής αυξάνονταν και τα κυκλώματα γίνονταν πιο σύνθετα, τα σημεία ελέγχου πολλαπλασιάζονταν και η παραγωγή επιβραδύνονταν.



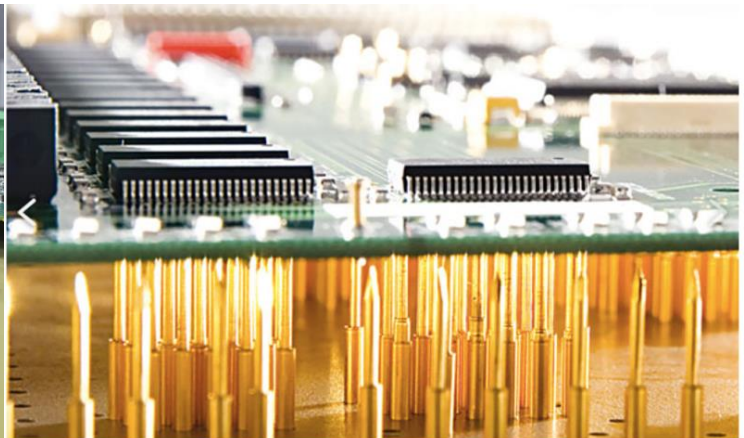
Εικόνα 2-2 Τυπικός χειροκίνητος έλεγχος σε ένα τυπωμένο κύκλωμα [33]

2.3.4 Η Άνοδος Εξειδικευμένου Εξοπλισμού για Λειτουργικό Έλεγχο

Καθώς ο όγκος παραγωγής των τυπωμένων κυκλωμάτων αυξήθηκε, οι κατασκευαστές ανέπτυξαν εξειδικευμένο εξοπλισμό δοκιμών για την αντιμετώπιση των προκλήσεων ελέγχου ποιότητας. Ένα τέτοιο εξάρτημα ήταν το “bed of nails” το οποίο αναδείχθηκε ως λύση για δοκιμές μεγάλου όγκου πλακετών. Αυτή η προσέγγιση περιελάμβανε τη δημιουργία ενός προσαρμοσμένου εξαρτήματος με ελατηριωτές ακίδες τοποθετημένες με τρόπο που τις επιτρέπει να έρχονται σε επαφή με συγκεκριμένα σημεία δοκιμής επάνω στην πλακέτα [23]. Όταν το εξάρτημα πιεζόταν επάνω στην πλακέτα προς έλεγχο, δεκάδες ακίδες έκαναν ηλεκτρική επαφή με καθορισμένους κόμβους του κυκλώματος, επιτρέποντας γρήγορες δοκιμές. Οι δεκάδες ταυτόχρονες επαφές που πρόσφερε το bed of nails δρομολογούνταν μέσω διακοπών σε όργανα μέτρησης ή και ενδεικτικές λυχνίες, μετατρέποντας μια εργασία ωρών και χειροκίνητης τοποθέτησης του οργάνου σε σημεία στο κύκλωμα, σε μια εργασία επιλογής διακοπών και άμεσης λήψης μιας μέτρησης. Η παραγωγικότητα που έφεραν τα bed of nails δεν μπορεί να υπερεκτιμηθεί, ωστόσο η αρχική επένδυση, ο σχεδιασμός και η μηχανική κατεργασία τα καθιστούσε οικονομικά μόνο για παράγωγες μεγάλου όγκου.



Εικόνα 2-3 Παράδειγμα bed of nails εξαρτήματος [34]



Εικόνα 2-4 Διεπαφή bed of nails με ένα τυπωμένο κύκλωμα [35]

2.3.5 Αυτοματοποίηση Λειτουργικού Ελέγχου

Μετά την εφεύρεση του bed of nails ο αυτοματισμός στον λειτουργικό έλεγχο δεν άργησε να εμφανιστεί, με την χρήση ρελέ, λυχνιών κενού, τρανζίστορ και κάθε τι άλλου στοιχείου μπορούσε ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα να χειρίζεται, επιτυγχάνονταν μερική ή ολική αυτοματοποίηση της διαδικασίας του λειτουργικού ελέγχου. Η πραγματική επιτάχυνση στην χρήση αυτόματου εξοπλισμού όμως σημειώθηκε με την μείωση του κόστους της υπολογιστικής ισχύος, με τους υπολογιστές να έχουν όλο ένα και μεγαλύτερη παρουσία σε χώρους παραγωγής. Η Hewlett Packard το 1960 έφερε την επανάσταση στις αυτοματοποιημένες δοκιμές επιτρέποντας στους υπολογιστές να ελέγχουν μετρητικά όργανα μέσω προγραμματισμού [17]. Ένας υπολογιστής μπορούσε να ελέγχει συστηματικά ποια όργανα θα ενεργοποιούσε και να συλλέγει μετρήσεις από αυτά, όλα μέσω του δίαυλου General Purpose Interface Bus (GPIB), ένα παράλληλο πρότυπο IEEE-488 [18]. Ο πρώιμος αυτοματοποιημένος εξοπλισμός δοκιμών αποτελούνταν από συστήματα rack and stack, τυποποιημένα μετρητικά όργανα τοποθετημένα σε καμπίνες με ράφια και συνδεδεμένα μέσω GPIB σε έναν υπολογιστή ελέγχου [17]. Ενώ αυτά τα συστήματα απαιτούσαν σημαντικό φυσικό χώρο και αντιπροσωπεύαν μεγάλο κεφάλαιο ως επένδυση, προσέφεραν ευελιξία καθώς ο λειτουργικός έλεγχος μπορούσε να αναδιαμορφωθεί και να αναπρογραμματιστεί για να προσαρμοστεί σε νέα προϊόντα χωρίς την αγορά νέου εξοπλισμού.



Εικόνα 2-5 Rack and stack με μετρητικά όργανα συνδεδεμένα μέσω GPIB [36]

2.4 Επίλογος

Αυτό το κεφάλαιο κατέδειξε ότι οι λειτουργικές δοκιμές κυκλωμάτων εξελίχθηκαν ως άμεση απόκριση στην αυξανόμενη πολυπλοκότητα των κυκλωμάτων και της κλίμακας παραγωγής τους. Η μετάβαση από καλωδιώσεις σημείου προς σημείου σε τυπωμένα κυκλώματα άλλαξε ριζικά τις απαιτήσεις του λειτουργικού ελέγχου, αυτό που μπορούσε να επαληθευτεί μέσω οπτικής επιθεώρησης και χειροκίνητης μέτρησης σε προσβάσιμα κυκλώματα, απαιτούσε εξειδικευμένα εξαρτήματα και αυτοματοποιημένα συστήματα για την μέτρηση υψηλής πυκνότητας τυπωμένων κυκλωμάτων. Η οικονομική ανάλυση αποκαλύπτει επίσης γιατί αυτή η εξέλιξη ήταν αναπόφευκτη, καθώς ο εντοπισμός βλαβών προτού το προϊόν φτάσει στα χεριά του καταναλωτή κοστίζει λιγότερο από την παροχή εξυπηρέτησης και εγγύησης. Αυτή η ιστορική εξέλιξη καθορίζει το πλαίσιο για την κατανόηση των συγχρόνων τεχνολογιών λειτουργικού ελέγχου.

Κεφάλαιο 3ο: Μοντέρνα Συστήματα Ελέγχου Ηλεκτρονικών Κυκλωμάτων

3.1 Εισαγωγή

Καθώς εξελίχθηκε η βιομηχανία ηλεκτρονικών ειδών, το ίδιο συνέβη και με τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της λειτουργικότητας των ειδών. Οι σύγχρονες δοκιμές κυκλωμάτων αποτελούν μια κρίσιμη φάση στον κύκλο ζωής της παραγωγής, λειτουργώντας ως ο τελικός κρίκος μεταξύ της κατασκευής και της διάθεσης στην αγορά. Αυτό το κεφάλαιο εξετάζει το σύγχρονο τοπίο των μεθοδολογιών δοκιμής κυκλωμάτων, με ιδιαίτερη έμφαση στην κατανόηση της κατάστασης της αγοράς.

3.2 Κατηγορίες Μεθόδων Ελέγχου

Οι δοκιμές κυκλωμάτων στη σύγχρονη βιομηχανία μπορούν γενικά να κατηγοριοποιηθούν σε δύο κύριες προσεγγίσεις με βάση τους στόχους τους: Δοκιμές εντός κυκλώματος ή αλλιώς In Circuit Testing (ICT), οι οποίες εστιάζουν στην επαλήθευση σε επίπεδο μεμονωμένων ηλεκτρονικών στοιχείων για την ανίχνευση ελαττωμάτων κατά την διάρκεια συναρμολόγησης και λειτουργικές δοκιμές ή αλλιώς Functional Testing (FCT), οι οποίες επικυρώνουν τη συμπεριφορά ολόκληρου του κυκλώματος υπό συνθήκες λειτουργίας, για να επιβεβαιωθεί ότι το κύκλωμα λειτουργεί με βάση των προδιαγραφών του. Και οι δύο μεθοδολογίες εξυπηρετούν σημαντικούς ρόλους στη διασφάλιση της ποιότητας ενώ διαφέρουν θεμελιωδώς στους στόχους του ελέγχου.

3.2.1 Έλεγχος Εντός Κυκλώματος – In Circuit Testing

Ο έλεγχος In Circuit αντιπροσωπεύει μια καθιερωμένη μεθοδολογία ελέγχου που επικεντρώνεται στην επαλήθευση της ακεραιότητας μεμονωμένων εξαρτημάτων και διασυνδέσεων σε ένα τυπωμένο κύκλωμα. Το In Circuit Testing ή αλλιώς ICT εμφανίστηκε καθώς οι κατασκευαστές αναγνώρισαν ότι ο εντοπισμός ελαττωμάτων νωρίς στη διαδικασία παραγωγής αποτρέπει τη ζημία σε πιο ακριβά εξαρτήματα στον τελικό λειτουργικό έλεγχο όπου το κύκλωμα τροφοδοτείται ολόκληρο. Το ICT έχει γίνει ιδιαίτερα πολύτιμο σε περιβάλλοντα παραγωγής όπου ακόμη και μικρές βελτιώσεις στα ποσοστά ανίχνευσης ελαττωμάτων μεταφράζονται σε σημαντικά οικονομικά οφέλη μέσω μειωμένων απορριμμάτων και μειωμένης επανεπεξεργασίας. Ο στόχος του ICT είναι η ανίχνευση κατασκευαστικών ελαττωμάτων, όπως λανθασμένες τιμές στοιχείων, λάθος προσανατολισμό στοιχείων, ελλείποντα στοιχεία που δεν εγκαταστάθηκαν ποτέ κατά την συναρμολόγηση, γεφυρωμένες κολλήσεις που προκαλούν βραχυκυκλώματα και πιθανά ανοιχτά κυκλώματα λόγω ψυχρών κολλήσεων. Η βάση των συστημάτων ICT έγκειται στην ικανότητα τους να απομονώνουν και να ελέγχουν στοιχεία μεμονωμένα ενώ αυτά βρίσκονται συγκολλημένα επάνω σε μια πλακέτα. Χρησιμοποιώντας μεθόδους διεπαφής όπως το bed of nails, εφαρμόζονται γνωστά σήματα στα άκρα των ηλεκτρονικών στοιχείων και γίνεται μέτρηση των τιμών τους. Οι μετρήσεις περιλαμβάνουν τιμές αντίστασης, χωρητικότητας πυκνωτών, επαγωγή, πτώση τάσης, χαρακτηριστικά διόδων, χαρακτηριστικά τρανζίστορ και καταστάσεις ψηφιακής λογικής. Πιο συγκεκριμένα, ο τρόπος απομόνωσης αυτός ονομάζεται guarding και όταν γίνεται με μέτρηση σε ένα ηλεκτρονικό στοιχείο, αποτρέπει την δημιουργία παράλληλων διάδρομων για το ρεύμα μέσω περιβαλλόντων στοιχείων. Τα συστήματα ICT χρησιμοποιούν μια τεχνική όπου οδηγώντας ενεργά τους κόμβους του περιβάλλοντος κυκλώματος σε συγκεκριμένες τάσεις, εξαλείφουν ή ελαχιστοποιούν τη ροή ρεύματος μέσω των παρεμβαλλόμενων διαδρομών, απομονώνοντας αποτελεσματικά το υπό δοκιμή στοιχείο ηλεκτρικά χωρίς την φυσική του αποσύνδεση

από την πλακέτα. Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναγνωριστεί ο θεμελιώδης περιορισμός του ICT, ενώ αυτό παρέχει υψηλή κάλυψη σφαλμάτων κατά την συναρμολόγησή του κυκλώματος, από μόνο του δεν επαληθεύει την πλήρη λειτουργικότητα του κυκλώματος. Μια πλακέτα μπορεί να περάσει από όλες τις δοκιμές In Circuit με ακριβείς τιμές για κάθε στοιχείο, σωστό προσανατολισμό και σωστές συνδέσεις, παρόλα αυτά να μην εκτελεί τη σχεδιασμένη του λειτουργία λόγω προβλημάτων που εμφανίζονται μόνο κατά την συνολική λειτουργία του κυκλώματος, προβλήματα τροφοδοσίας, παρεμβολές, λειτουργία υπό φόρτωση και η συνθέτη αλληλεπίδραση μεταξύ των στοιχείων όλα καθιστούν πραγματικές αιτίες για ένα κύκλωμα να λειτουργεί θεωρητικά αλλά όχι πρακτικά.

3.2.2 Λειτουργικός Έλεγχος Κυκλώματος – Functional Testing

Σε αντίθεση με το In Circuit Testing όπου τα ηλεκτρονικά στοιχεία ελέγχονται μεμονωμένα, στο λειτουργικό έλεγχο ή αλλιώς Functional Testing (FCT), γίνεται η τελική επικύρωση που επιβεβαιώνει ότι ένα κύκλωμα εκπληρώνει τον σχεδιασμένο σκοπό του. Τα συστήματα Functional Testing εφαρμόζουν ισχύ στο κύκλωμα υπό δοκιμή, το διεγείρουν με τα σήματα εισόδου που αντιπροσωπεύουν πραγματικές συνθήκες χρήσης και επαληθεύουν ότι το κύκλωμα παρουσιάζει την αναμενομένη συμπεριφορά σε όλο το εύρος λειτουργίας. Αυτή η επικύρωση από άκρο σε άκρο αντιπροσωπεύει τον τελικό έλεγχο ποιότητας πριν τα προϊόντα φτάσουν στους πελάτες. Η θεμελιώδης διάκριση μεταξύ των δυο συστημάτων εμφανίζεται στους στόχους και τις μεθοδολογίες τους, τα In Circuit Testers απαντούν στο ερώτημα εάν είναι σωστά εγκατεστημένα τα ηλεκτρονικά στοιχεία και ανταποκρίνονται στις προδιαγραφές του σχεδίου, ενώ τα Functional Tester απαντούν στο ερώτημα εάν ένα κύκλωμα κάνει αυτό που σχεδιάστηκε να κάνει όταν λειτουργεί υπό ρεαλιστικές συνθήκες. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι φυσικές διεπαφές τους είναι ίδιες καθώς και τα δυο αξιοποιούν εξαρτήματα όπως το bed of nails για την σύνδεση τους με το κύκλωμα υπό έλεγχο.

Κατά την διάρκεια ενός λειτουργικού ελέγχου, μέσω των φυσικών διεπαφών εκτελούνται παραμετρικές μετρήσεις τάσης, ρεύματος, συχνότητας και ανάγνωσης δεδομένων σε κομβικά σημεία του κυκλώματος οι οποίες έπειτα συγκρίνονται με τις ανάλογες προδιαγραφές. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την επαλήθευση ότι τα διαφορά υποσυστήματα του κυκλώματος υπό έλεγχο αλληλοεπιδρούν όπως αναμένετε και ότι η συνολική συμπεριφορά του συστήματος συμμορφώνεται με τις προδιαγραφές του. Σε αντίθεση με το In Circuit Testing που χρησιμοποιεί ηλεκτρική απομόνωση για έλεγχο μεμονωμένων στοιχείων, ο λειτουργικός έλεγχος φέρνει το κύκλωμα σε συνθήκες που προσεγγίζουν το προβλεπόμενο περιβάλλον λειτουργίας του. Εφαρμόζοντας πραγματικές τάσεις λειτουργίας, παρέχοντας ρεαλιστικές συνθήκες σήματος, φορτώνοντας εξόδους με συνθέτες αντιστάσεις που αντιπροσωπεύουν τα πραγματικά φορτία που οδηγεί το κύκλωμα και προσομοιώνοντας τα βήματα που θα ακολουθούσε ένας πραγματικός χρήστης για να λειτουργήσει το κύκλωμα υπό δοκιμή, μπορεί να γίνει ανίχνευση οριακών ή διαλειπόντων βλαβών που ενδέχεται να μην εμφανίζονται σε σύντομους στατικούς ελέγχους, παρέχοντας εμπιστοσύνη ότι το προϊόν θα λειτουργεί αξιόπιστα όταν χρησιμοποιηθεί σε πραγματικές εφαρμογές.

3.3 Ανάλυση Αγοράς

Η αγορά αποτελείται από καθιερωμένους κατασκευαστές των οποίων τα συστήματα αποτελούν παράδειγμα των δυνατοτήτων, του κόστους και των λειτουργικών απαιτήσεων που χαρακτηρίζουν αυτή την τεχνολογία. Η Keysight Technologies, πρώην κομμάτι της Agilent, είναι μια από τους καθιερωμένους κατασκευαστές τέτοιων συστημάτων. Η Teradyne που ιδρύθηκε πριν από 60 χρόνια από αποφοίτους του Massachusetts Institute of Technology (MIT), αντιπροσωπεύει έναν ακόμη

σημαντικό κατασκευαστή στην παραγωγή εξοπλισμού ελέγχου. Και οι δύο εταιρείες προσφέρουν εξελιγμένα αρθρωτά συστήματα με δυνατότητες που έχουν βελτιωθεί μέσα από δεκαετίες ανάπτυξης.

3.3.1 Παραδείγματα συστημάτων In Circuit Testing στην Αγορά

Η εξέταση των ναυαρχίδων ICT πλατφορμών, της σειράς i3070 της Keysight και της οικογένειας TestStation της Teradyne αποκαλύπτει την κατάσταση της τεχνολογίας, ενώ παράλληλα καθορίζει την οικονομική και τεχνική βάση έναντι της οποίας πρέπει να αξιολογούνται εναλλακτικές προσεγγίσεις ελέγχων κυκλωμάτων.

Keysight i3070



Εικόνα 3-1 Keysight i3070, πλήρες σύστημα τύπου ICT [37]

Η οικογένεια i3070 αντιπροσωπεύει την κορυφαία πλατφόρμα ICT της Keysight με αρθρωτή αρχιτεκτονική βασισμένη σε κάρτες, όπου οι δυνατότητες του συστήματος κλιμακώνονται ανάλογα με τις ανάγκες του πελάτη μέσω επιπροσθέτων καρτών. Το σύστημα παρέχει ένα σύνολο από ακροδέκτες οι οποίοι παρέχουν την φυσική σύνδεση του συστήματος με το κύκλωμα υπό έλεγχο, ο χρήστης μπορεί να διαμορφώσει και να δρομολογήσει τους ακροδέκτες μέσω τρίτων βοηθητικών εξαρτημάτων όπως ένα bed of nails. Η αρθρωτή φιλοσοφία του δεν περιορίζεται στις κάρτες της Keysight, το σύστημα υποστηρίζει επέκταση με κάρτες από τρίτους προμηθευτές, αυξάνοντας την ευελιξία του χρήστη. Η διαχείριση των δυνατοτήτων και ο ορισμός της λογικής του ελέγχου γίνεται από ειδικευμένο προσωπικό μέσω προγραμματισμού της συσκευής από το πρόγραμμα της Keysight ή μέσω LabVIEW. Η υλοποίηση μιας πλήρους λύσης βασισμένης στο i3070 φτάνει την τάξη των 300.000 ευρώ [19].

Teradyne TestStation



Εικόνα 3-2 Teradyne TestStation, πλήρες σύστημα τύπου ICT [38]

Το TestStation της Teradyne μοιράζεται θεμελιώδεις αρχές με την πλατφόρμα της Keysight καθώς και τα δυο συστήματα βασίζονται σε μια αρθρωτή, βασισμένη σε κάρτες αρχιτεκτονική που απαιτεί εξειδικευμένο προγραμματισμό για τη διαμόρφωση δοκιμών, ενώ παρομοίως για τη φυσική σύνδεση του συστήματος με το κύκλωμα προς δοκιμή παρέχονται ακροδέκτες. Ωστόσο, το TestStation διαφοροποιείται υιοθετώντας μια στρατηγική βαθμιαίας κλιμάκωσης. Η πλατφόρμα έχει σχεδιαστεί για να ξεκινά ως ένα μικρό σύστημα με πολύ βασική διαμόρφωση και να επεκτείνεται σταδιακά. Αυτή η προσέγγιση μεταφράζεται άμεσα σε εξοικονόμηση κόστους, καθώς οι κατασκευαστές δεν χρειάζεται να πραγματοποιούν μεγάλη αρχική επένδυση σε μια πλήρη λύση που ίσως να μην είναι αναγκαία, ένα TestStation στην πιο απλή του διαρρύθμιση ξεκινάει από τα 100.000 ευρώ [19].

3.3.2 Παραδείγματα συστημάτων Functional Testing στην Αγορά

Η αρθρωτή λογική που αναλύθηκε στα συστήματα ICT βρίσκει την άμεση συνέχεια της και στον τομέα των λειτουργικών ελέγχων. Εδώ η Keysight επεκτείνει τη φιλοσοφία της εξαιρετικά προσαρμόσιμης πλατφόρμας με την οικογένεια TS-5000, ενώ η Teradyne στηρίζεται στο μοντέλο της “έτοιμης-για-παραγωγή” λύσης με το Spectrum. Σε αντίθεση με τα ICT συστήματα που βασίζονται σε ιδιόκτητες κάρτες επέκτασης για βασικές μετρήσεις, το FCT έχει διαφορετική λογική καθώς ο κύριος στόχος είναι η εκτίμηση της πλήρους λειτουργίας του κυκλώματος. Το σύστημα κάνει χρήση εργαστηριακών οργάνων για τις μετρήσεις στο κύκλωμα υπό έλεγχο, όπως ακριβώς θα έκανε και ένας άνθρωπος εάν έλεγχε χειροκίνητα το κύκλωμα.

Keysight TP-5000



Εικόνα 3-3 Keysight TP-5000, πλήρες σύστημα τύπου FCT [39]

Το TS-5000 ενσωματώνει φυσιολογικά εργαστηριακά όργανα, όπως πηγές τροφοδοσίας, πολύμετρα, γεννήτριες σημάτων και παλμογράφους, τα οποία μπορούν να είναι είτε ειδικές κάρτες της Keysight είτε τυπικά όργανα εργαστήριου από τρίτους προμηθευτές τα οποία να υποστηρίζουν πρωτόκολλα επικοινωνίας όπως το GPIB που προαναφέρθηκε στο δεύτερο κεφάλαιο. Το σύστημα παρέχει στο χρήστη υποδοχές για απευθείας σύνδεση της μονάδας με το κύκλωμα υπό δοκιμή, ενώ ο προγραμματισμός της γίνεται μέσα από ειδικό περιβάλλον της Keysight με όνομα TestExec ή μέσω του LabVIEW. Στα συστήματα FCT η Keysight ακολουθεί το μοντέλο τα σταδιακής κλιμάκωσης με την πλατφόρμα να μπορεί να λειτουργήσει με τα ελάχιστα απαραίτητα όργανα που διαλέγει ο χρήστης για την περίπτωση του. Το κόστος ξεκινάει από τα 120.000 ευρώ για ένα σύστημα με τα βασικά όργανα ενός ηλεκτρονικού εργαστήριου όπως το πολύμετρο, την γεννήτρια σημάτων, τον παλμογράφο και το προγραμματιζόμενο τροφοδοτικό [19].

Teradyne Spectrum



Εικόνα 3-4 Teradyne Spectrum, πλήρες σύστημα τύπου FCT [40]

Το Spectrum της Teradyne, ως ολοκληρωμένη λύση ενσωματώνει μια προκαθορισμένη σουίτα υλικού για λειτουργικούς ελέγχους, η οποία περιλαμβάνει εσωτερικές πηγές τροφοδοσίας, ψηφιακά και αναλογικά υποσυστήματα και εξειδικευμένες υποδοχές διασύνδεσης με τα κυκλώματα υπό έλεγχο. Το σύστημα δεν έχει σχεδιαστεί με βάση την πρόσθεση εργαστηριακού εξοπλισμού τρίτων, αλλά αντίθετα λειτουργεί με τον προ εγκατεστημένο εξοπλισμό της Teradyne, ο οποίος διασυνδέεται μέσω προορισμένων πρωτοκόλλων της εταιρείας. Ο προγραμματισμός του συστήματος γίνεται αποκλειστικά μέσα από το περιβάλλον της Teradyne, με στόχο την παροχή μιας πλήρους “έτοιμης-για-παραγωγή” λύσης. Στα σύστημα FCT η Teradyne ακολουθεί το μοντέλο της υψηλής αρχικής επένδυσης, με το κόστος να ενσωματώνει όλες τις απαραίτητες δυνατότητες από την πρώτη στιγμή. Η τιμή ανέρχεται στα 250.000 ευρώ [19].

3.3.3 Εναλλακτικές Επιλογές

Η ανάλυση μέχρι τώρα δείχνει ότι υπάρχει ένα οικονομικό κατώφλι για τα ολοκληρωμένα συστήματα ICT και FCT ανάλογα. Φυσιολογικά επομένως θέτεται το ερώτημα εάν υπάρχουν σημαντικά φθηνότερες προσεγγίσεις για τον έλεγχο κυκλωμάτων. Τουλάχιστον για τα συστήματα ICT, δεν υπάρχει εναλλακτική κλίμακα κόστους καθώς η ίδια η φύση του ICT απαιτεί μια συγκεκριμένη υποδομή που είναι δαπανηρή. Αντίθετα, ο λειτουργικός έλεγχος είναι εγγενώς ευέλικτος, ο στόχος του λειτουργικού ελέγχου δεν είναι η δοκιμή μεμονωμένων στοιχείων, αλλά η επαλήθευση της συνολικής λειτουργίας ενός κυκλώματος, αυτό σημαίνει ότι οι μετρήσεις διαφέρουν ριζικά από κύκλωμα σε κύκλωμα, οπότε υπάρχουν και περιπτώσεις όπου ένας χρήστης δεν χρειάζεται την ποικιλομορφία οργάνων ή την πολυπλοκότητα που επιτρέπουν τα ολοκληρωμένα συστήματα FCT. Μια οικονομική λύση σε τέτοιες περιπτώσεις είναι οι συσκευές συλλογής δεδομένων ή αλλιώς συσκευές Data Acquisition (DAQ) όπως η USB 6001 της National Instruments.

National Instruments USB 6001



Εικόνα 3-5 National Instruments USB 6001, Data Acquisition Device [41]

Μια συσκευή DAQ δεν αποτελεί ολοκληρωμένο σύστημα αλλά είναι ένα προγραμματιζόμενο εργαλείο που παρέχει μια σειρά από αναλογικές και ψηφιακές εισόδους/εξόδους, με αλλά λογία προσφέρει την οργανωμένη πρόσβαση στα ηλεκτρικά σήματα ενός κυκλώματος καθώς επιτρέπει στον χρήστη να εκτελεί μετρήσεις σε κρίσιμους κόμβους από το κύκλωμα υπό έλεγχο. Αυτή η προσέγγιση ωστόσο έρχεται με περιορισμούς που την διαχωρίζουν από τις ολοκληρωμένες πλατφόρμες ICT και FCT. Οι συσκευές DAQ εξαρτώνται από εξωτερικό υπολογιστή για να λειτουργήσουν, εξίσου και το όνομα USB στο προϊόν, δεν υπάρχει συνδεσιμότητα με εργαστηριακά όργανα για περαιτέρω τύπους μετρήσεων και η ανάγκη για προγραμματισμό της συσκευής παραμένει, με την μονή διαφορά να είναι ότι υποστηρίζονται και πιο διαδεδομένες γλώσσες προγραμματισμού όπως η Python και η C παράλληλα με το LabVIEW. Το κόστος ενός USB 6001 ξεκινάει από 200 ευρώ [20].

3.3.4 Ανάλυση Κενού στην Αγορά

Η συγκριτική ανάλυση των πλατφορμών ICT, FCT και DAQ αποκαλύπτει ένα μοτίβο, ένας πελάτης μπορεί να επιλέξει το σκέλος των συστημάτων και την πολυπλοκότητα των μετρήσεων που εκτελούν, μπορεί να επιλέξει τον τρόπο διεπαφής του συστήματος με το κύκλωμα υπό έλεγχο και μπορεί επίσης να διαλέξει από ένα εύρος τιμών το σύστημα που του ταιριάζει. Ωστόσο η ανάγκη για εξειδικευμένο προγραμματισμό για να επιτευχθεί ένας αυτοματοποιημένος έλεγχος, δεν μπορεί να επιλεγεί και θεωρείται δεδομένη. Το αποτέλεσμα είναι μια πληθώρα από μικρές βιοτεχνίες και νεοσύστατες εταιρείες να διαθέτουν την τεχνογνωσία για τον ορισμό των προδιαγραφών για ένα έλεγχο, αλλά όχι για τον ειδικευμένο προγραμματισμό που απαιτεί η υλοποίηση αυτομάτου ελέγχου. Αξίζει να σημειωθεί ότι προσφέρεται εκπαίδευση από τους κατασκευαστές των συστημάτων για τα εργαλεία τους, αλλά δεν προσφέρεται ως υπηρεσία ο προγραμματισμός των συστημάτων για τις ανάγκες του πελάτη. Συνεπώς εντοπίζεται η πλήρης απουσία μιας κατηγορίας συσκευής που να απορροφά την πολυπλοκότητα αυτού του κρίσιμου σταδίου της ενοποίησης.

3.4 Επίλογος

Συνοψίζοντας, αυτό το κεφάλαιο διερεύνησε τις σύγχρονες μεθοδολογίες ελέγχου ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, αναλύοντας τις κύριες κατηγορίες των In Circuit Testing και Functional Testing. Καθεμιά εξυπηρετεί έναν ξεχωριστό και συμπληρωματικό σκοπό στη διαδικασία διασφάλισης ποιότητας, από τον έλεγχο ακεραιότητας μεμονωμένων στοιχείων έως την επικύρωση ολόκληρης της λειτουργίας ενός κυκλώματος. Η ανάλυση της αγοράς για αυτές τις τεχνολογίες ανέδειξε την ύπαρξη ισχυρών, αρθρωτών πλατφορμών υψηλών δυνατοτήτων από καθιερωμένους κατασκευαστές, καθώς και εναλλακτικές προσεγγίσεις χαμηλότερου κόστους. Ωστόσο, η απαίτηση για εξειδικευμένο προγραμματισμό αποτελεί σημαντικό εμπόδιο για ένα εύρη φάσμα πιθανών χρηστών. Αυτή η παρατήρηση εντοπίζει ένα κενό αναμεσα στη διαθεσιμότητα ισχυρού υλικού και στην υλοποίηση δοκίμων μέσω αυτού του υλικού, υποδηλώνοντας μια πιθανή κατεύθυνση για καινοτομία στον τομέα.

Κεφάλαιο 4ο: Σχεδιασμός Συσκευής Ελέγχου Ηλεκτρονικών Κυκλωμάτων

4.1 Εισαγωγή

Σε πολλά περιβάλλοντα ανάπτυξης και παραγωγής η ανάγκη για αυτοματοποιημένο έλεγχο ηλεκτρονικών κυκλωμάτων είναι πραγματική, αλλά η τεχνική εξειδίκευση του προσωπικού και οι διαθέσιμοι πόροι είναι περιορισμένοι. Ο χειροκίνητος έλεγχος με όργανα όπως το πολύμετρο, αν και αξιόπιστος, είναι χρονοβόρος, επιρρεπής σε ανθρώπινο λάθος και δεν προσφέρει συστηματική καταγραφή αποτελεσμάτων. Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει τη σχεδίαση μιας συσκευής ελέγχου ηλεκτρονικών κυκλωμάτων που στοχεύει να γεφυρώσει αυτό το κενό. Η φιλοσοφία σχεδιασμού βασίζεται στην απλότητα χρήσης, τη χαμηλή οικονομική επιβάρυνση και την κάλυψη των πιο συχνών αναγκών ελέγχου χωρίς της απαίτηση εξειδικευμένων γνώσεων από τον τελικό χρήστη.

4.2 Στόχοι

- **Καμία απαίτηση προγραμματισμού:** Ο ορισμός μιας πλήρους δοκιμαστικής ρουτίνας πρέπει να γίνεται αποκλειστικά μέσω γραφικών στοιχείων, χωρίς γνώση γλωσσών προγραμματισμού. Αυτός ο στόχος αντιμετωπίζει το κύριο εμπόδιο που εντοπίστηκε στην ανάλυση αγοράς. Η επιλογή μιας καθαρά γραφικής προσέγγισης επιτρέπει σε τεχνικούς με βασικές δεξιότητες χειρισμού υπολογιστή να δημιουργούν δοκιμαστικές ρουτίνες.
- **Άμεση προσβασιμότητα:** Η διεπαφή πρέπει να είναι προσβάσιμη από τυπικά, οικεία εργαλεία όπως ένα web browser χωρίς την εγκατάσταση εξειδικευμένου λογισμικού. Η web based προσέγγιση εξαλείφει προβλήματα συμβατότητας μεταξύ λειτουργικών συστημάτων και απλοποιεί τη διαδικασία εγκατάστασης. Επιπλέον, επιτρέπει την απομακρυσμένη πρόσβαση στη συσκευή από διαφορετικά σημεία ενός εργαστηρίου ή εργοστασίου.
- **Στενευμένη επάρκεια:** Το σύστημα πρέπει να καλύπτει ένα υποσύνολο κοινών αναγκών ελέγχου, αντί να προσπαθεί να καλύψει όλες τις πιθανές περιπτώσεις με μειωμένη χρηστικότητα. Αυτή η φιλοσοφία αναγνωρίζει ότι η προσπάθεια δημιουργίας μιας συσκευής για όλους τους πιθανούς ελέγχους οδηγεί συχνά σε πολύπλοκα συστήματα που είναι δύσκολα στη χρήση. Αντίθετα, εστιάζοντας στις πιο συχνές μετρήσεις όπως τον έλεγχο τάσης σε κρίσιμα σημεία των κυκλωμάτων, το σύστημα παραμένει απλό αλλά καλύπτει ένα μεγάλο ποσοστό των καθημερινών αναγκών.
- **Χαμηλό κόστος υλοποίησης:** Η χρήση ευρέως διαθέσιμων, οικονομικών εξαρτημάτων και ανοικτών πρωτοκόλλων διασφαλίζει ότι το συνολικό κόστος κατασκευής παραμένει προσιτό για κάθε πιθανό χρήστη.

4.3 Αρχιτεκτονική Συστήματος

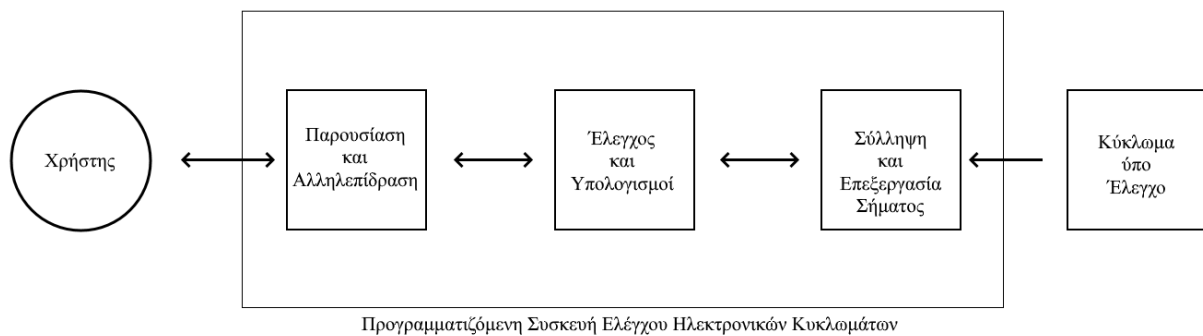
Η συσκευή αποτελεί σύστημα Functional Circuit Testing, η επιλογή της μεθόδου FCT έναντι του In Circuit Testing προκύπτει από τη διαφορετική φύση των δυο μυθολογιών. Το Functional Circuit Testing αποτελεί αναπόσπαστο στάδιο στον κύκλο ζωής κάθε ηλεκτρονικού κυκλώματος, ανεξαρτήτως πολυπλοκότητας. Αντίθετα, το In Circuit Testing δικαιολογείται κυρίως σε περιβάλλοντα όπου η ανάγκη εντοπισμού σφαλμάτων σε ξεχωριστά στοιχεία ξεπερνά την πολυπλοκότητα της μεθόδου. Από το ευρύ φάσμα παραμέτρων που μπορεί να μετρήσει ένα σύστημα FCT, η παρούσα συσκευή εστιάζει στην μέτρηση τάσης. Η επιλογή αυτή βασίζεται στην παρατήρηση ότι η πλειονότητα των προβλημάτων σε ηλεκτρονικά κυκλώματα εκδηλώνονται ως ανωμαλίες στα επίπεδα τάσης κρίσιμων κόμβων. Προβλήματα όπως βραχυκυκλώματα, λανθασμένες συνδέσεις, ελλειψματικά στοιχεία και σφάλματα τροφοδοσίας, αντανακλώνται άμεσα στις μετρούμενες τάσεις. Επιπλέον, η συσκευή ενσωματώνει

σύστημα λογικών κανόνων που ορίζονται από τον χρήστη, επιτρέποντας την αυτόματη ανίχνευση προβλημάτων και την εμφάνιση μηνυμάτων σφάλματος. Για παράδειγμα ένα η ράγα τροφοδοσίας των 5V ενός κυκλώματος δεν βρίσκεται εντός των αποδεκτών ορίων, ένας προκαθορισμένος κανόνας μπορεί να σηματοδοτήσει το συγκεκριμένο πρόβλημα, απλοποιώντας τη διαδικασία εντοπισμού βλαβών όπου αυτή είναι αναγκαία. Η αρχιτεκτονική της συσκευής οργανώνεται σε τρία διακριτά επίπεδα, το καθένα με συγκεκριμένες αρμοδιότητες:

Σύλληψη και Επεξεργασία Σήματος: Το φυσικό μέσο λήψης σημάτων από το υπό έλεγχο κύκλωμα.

Έλεγχος και Υπολογισμοί: Ο εγκέφαλος της συσκευής.

Παρουσίαση και Αλληλεπίδραση: Η γραφική διεπαφή την οποία ελέγχει ο χρήστης.



Εικόνα 4-1 Αρχιτεκτονική συσκευής ελέγχου ηλεκτρονικών κυκλωμάτων

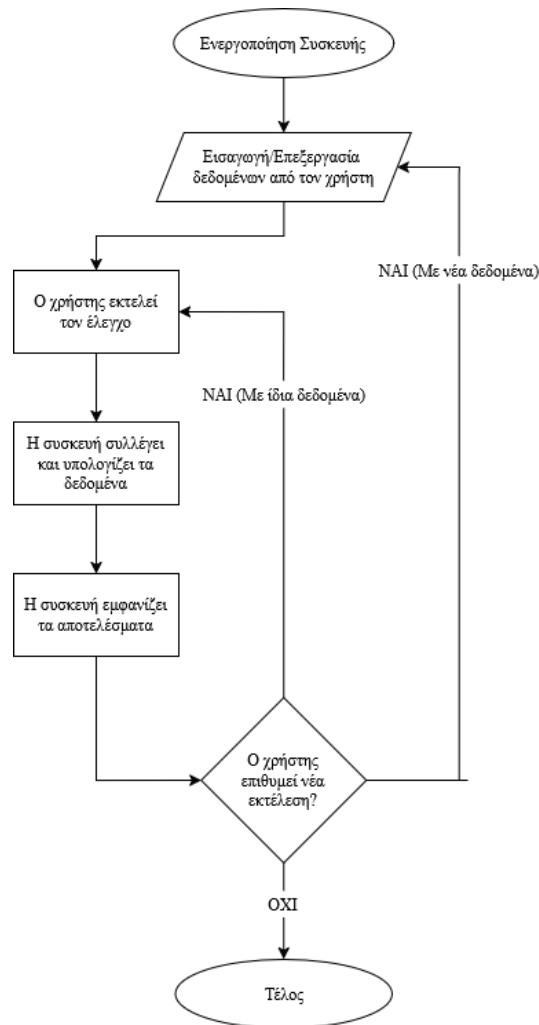
4.4 Ροή Λειτουργίας

Η τυπική διαδικασία χρήσης της συσκευής ακολουθεί τρία βασικά στάδια:

Ορισμός: Ο χρήστης ορίζει μέσω της διεπαφής το εύρος αποδέκτης τάσης σε κάθε κόμβο του κυκλώματος προς έλεγχο και τους λογικούς κανόνες που πρέπει να τηρεί το κύκλωμα.

Εκτέλεση: Το σύστημα εκτελεί αυτόματα τις μετρήσεις, τις συγκρίνει με τα κριτήρια και ελέγχει τους κανόνες.

Αναφορά και Καταγραφή: Όλα τα αποτελέσματα των μετρήσεων και των κανόνων, αποθηκεύονται αυτόματα σε μια εξωτερική βάση δεδομένων για επισκόπηση.



Εικόνα 4-2 Διάγραμμα ροής για μια τυπική διαδικασία χρήσης της συσκευής

4.5 Σχεδίαση Συσκευής και Επιλογή Υλικού

4.5.1 Τεχνικές Προδιαγραφές

Τάση Λειτουργίας ($\pm 12V$): Το όριο των $\pm 12V$ επιλέχθηκε ως το ελάχιστο εύρος που μπορεί να καλύψει την πλειοψηφία των κοινών αναλογικών και ψηφιακών σημάτων. Αυτό το εύρος περιλαμβάνει τυπικές τροφοδοσίες όπως $\pm 3.3V$, $\pm 5V$, $\pm 9V$ και $\pm 12V$.

Αριθμός Αναλογικών Καναλιών (16 Κανάλια): Ο αριθμός των 16 καναλιών είναι αποτέλεσμα επιλογής μεταξύ πρακτικής χρησιμότητας και σχεδιαστικής απλότητας. Αυτή η ποσότητα επιτρέπει τον ταυτόχρονο έλεγχο πολλαπλών κόμβων χωρίς να μετατρέπει την συσκευή σε ένα ακριβό και πολύπλοκο σύστημα. Επιπλέον, ο αριθμός των εισόδων ευθυγραμμίζεται τεχνικά με την διαθεσιμότητα των αναλογικών πολυπλεκτών ή αλλιώς multiplexer (MUX) που προσφέρονται στην αγορά.

Ανάλυση Μέτρησης (15 bit): Η ανάλυση 15 bit σημαίνει ότι η μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό σήμα χωρίζει το συνολικό εύρος τάσης σε $2^{15} = 32768$ διακριτά “βήματα”. Για το καθορισμένο εύρος εισόδου των $\pm 12V$, που αντιστοιχεί σε συνολική διαφορά 24V μεταξύ της αρνητικής και θετικής κλίμακας, το βήμα ανάλυσης (step size ή LSB – Least Significant Bit)

υπολογίζεται ως $\frac{24V}{32768} = 0.73mV$. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα μπορεί να διακρίνει μεταβολές τάσης της τάξης των 0.73 mV και αντιστοιχεί σε πολόμετρο με οθόνη 4½ ψηφίων.

Διεπαφή Χρήστη (Web Graphical User Interface): Η επιλογή μιας διεπαφής βασισμένης στον ιστό αποτελεί θεμελιώδη απόφαση για την επίτευξη των στόχων προσβασιμότητας και απλότητας. Η γραφική διεπαφή μέσω ενός προγράμματος περιήγησης εξαλείφει την ανάγκη εγκατάστασης ειδικού λογισμικού σε υπολογιστή ενώ επιτρέπεται η πλήρη λειτουργία της συσκευής χωρίς φυσική σύνδεση στον υπολογιστή. Ο τελικός χρήστης αλληλοεπιδρά με μια οικεία ιστοσελίδα για να ορίσει τα όρια των μετρήσεων και τους λογικούς κανόνες, ενώ όλη η επεξεργασία γίνεται στην συσκευή.

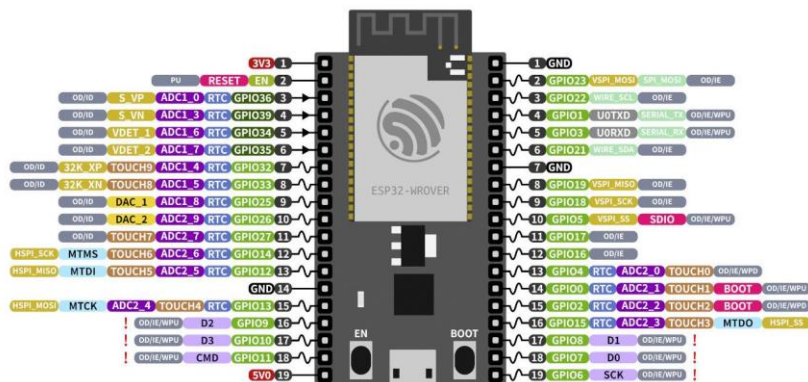
Εξωτερική Σύνδεση με Βάση Δεδομένων: Η δυνατότητα αποθήκευσης αποτελεσμάτων σε εξωτερική βάση δεδομένων (π.χ. MySQL, PostgreSQL) μετατρέπει τη συσκευή από ένα από όργανο σε ένα εργαλείο που προσφέρει ιχνηλασιμότητα. Αυτή η προδιαγραφή εξυπηρετεί την ανάγκη καταγραφής ιστορικού ελέγχων με το πέρασμα του χρόνου. Τα αποθηκευμένα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για στατιστικές αναφορές ή για τροφοδότηση άλλων συστημάτων, ψηφιακά και χωρίς την επέμβαση ανθρώπου. Η απόφαση για εξωτερική βάση αντί για εσωτερική αποθήκευση εξασφαλίζει απεριόριστη χωρητικότητα, ευκολότερη ανάκτηση δεδομένων από διαδεδομένα εργαλεία όπως το Excel και κεντροποιημένη διαχείριση δεδομένων πολλαπλών συσκευών.

4.5.2 Επιλογή Μικροελεγκτή

Ο μικροελεγκτής αποτελεί τον κεντρικό επεξεργαστή της συσκευής και είναι υπεύθυνος για τον συντονισμό όλων των λειτουργιών όπως την επικοινωνία μεταξύ των ολοκληρωμένων που αποτελούν την συσκευή, την επεξεργασία των μετρήσεων, την διαχείριση της γραφικής διεπαφής και την επικοινωνία με την βάση δεδομένων. Για αυτό τον ρολό επιλέχθηκε το ESP32-WROVER-E της Espressif Systems.



Εικόνα 4-3 Φωτογραφία του ESP32-WROVER-E



Εικόνα 4-4 ESP32-WROVER-E Pinout [42]

Το ESP32-WROVER-E είναι μια ολοκληρωμένη μονάδα System on a Chip (SoC) που περιλαμβάνει το ESP32, εξωτερική μνήμη τύπου Flash, μνήμη RAM τύπου PSRAM καθώς και κεραίες WiFi/Bluetooth. Η επιλογή αυτής της μονάδας βασίστηκε σε μια σειρά χαρακτηριστικών που καλύπτουν τις ανάγκες της συσκευής.

Δυνατότητα WiFi: Η ενσωματωμένη μονάδα WiFi του ESP32 αποτελεί τη βάση για την υλοποίηση της γραφικής διεπαφής μέσω του ιστού. Ο Μικροελεγκτής λειτουργεί ως Access Point ή συνδέεται σε

υπάρχων δίκτυο με δυνατότητα να δρα ως web server και να εξυπηρετεί τον χρήστη μέσω γραφικής διεπαφής σε μορφή απλής ιστοσελίδας. Αυτή η δυνατότητα είναι θεμελιώδης για την επίτευξη του στόχου της άμεσης προσβασιμότητας χωρίς εγκατάσταση εξειδικευμένου λογισμικού, ο χρήστης απλά ανοίγει έναν web browser όπως το Firefox και συνδέεται στην διεύθυνση της συσκευής.

Επεξεργαστική Ισχύς: Το ESP32 διαθέτει δυο πυρήνες Xtensa LX6 που λειτουργούν στα 240 MHz. Αυτή η επεξεργαστική ισχύς είναι περισσότερο από επαρκής για τις ανάγκες της συσκευής. Η σάρωση των 16 καναλιών, η εκτέλεση λογικών ελέγχων, η διαχείριση του web server και η επικοινωνία με την εξωτερική βάση δεδομένων, μπορούνε όλα να εκτελεστούν σε πραγματικό χρόνο. Επίσης, η αρχιτεκτονική των δυο πυρήνων επιτρέπει τον διαχωρισμό των καθηκόντων καθώς ένα πυρήνας αφιερώνεται στην λειτουργία του WiFi και του web server ενώ ο άλλος στις μετρήσεις, τους υπολογισμούς και την επικοινωνία με την βάση δεδομένων, εξασφαλίζοντας την ομαλή λειτουργία χωρίς καθυστερήσεις.

Μνήμη: Σαν μοντέλο WROVER-E το συγκεκριμένο ESP32 περιλαμβάνει 4MB μνήμη Flash για την αποθήκευση του προγράμματος και των αρχείων της ιστοσελίδας (HTML, JavaScript, CSS), καθώς και 8MB PSRAM (Pseudo Static RAM) για μεταβλητές. Η PSRAM είναι ιδιαίτερα σημαντική για την εκτέλεση του web server και τη διαχείριση της σύνδεσης με τον χρήστη χωρίς να υπάρχει υπερχειλίση της εσωτερικής RAM που μοιράζονται οι πύρινες.

Περιφερειακά: Το ESP32 διαθέτει ένα πλούσιο σύνολο περιφερειακών που καλύπτουν όλες τις ανάγκες της συσκευής. Όπως το πρωτόκολλο επικοινωνίας I2C, για αμφίδρομη επικοινωνία με ολοκληρωμένα υποσυστήματα, 32 διαθέσιμα General Purpose Input/Output pin για βοηθητικές λειτουργίες και USB για προγραμματισμό και debugging.

Κοινότητα και Εργαλεία Ανάπτυξης: Ένας από τους σημαντικότερους λόγους επιλογής του ESP32 είναι το εκτενές οικοσύστημα ανάπτυξης του. Η ίδια η Espressif παρέχει το ESP Integrated Development Environment (IDE) ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον με πλούσιες βιβλιοθήκες για WiFi, Web server, πρωτόκολλα επικοινωνίας και πολλές άλλες περιφερειακές λειτουργίες. Το ESP IDE προσφέρει πλήρη πρόσβαση σε όλες τις δυνατότητες του hardware και επιτρέπει λεπτομερή έλεγχο κάθε παραμέτρου. Ακόμη, υπάρχει και επίσημη επέκταση του ESP Internet of Things Development Framework (IDF) για το Visual Studio Code, επιτρέποντας την επιλογή μεταξύ του αυτόνομου εργαλείου της Espressif και ενός πιο οικείου περιβάλλοντος. Παράλληλα το ESP32 υποστηρίζεται πλήρως από το Arduino IDE, προσφέροντας μια απλοποιημένη προσέγγιση στον προγραμματισμό του. Ο κώδικας γραμμένος σε Arduino είναι σχεδιασμένος να είναι λειτουργικός μεταξύ πολλών διαφορετικών μικροελεγκτών με ελάχιστες ή καθόλου αλλαγές. Αυτή η καθολική μέθοδος προγραμματισμού καθιστά εύκολη την ανάπτυξη προγραμμάτων καθώς διατίθενται πληθώρα βιβλιοθηκών και tutorial από την ενεργή κοινότητα του Arduino.

Χαμηλό Κόστος: Πάρα τις πλούσιες δυνατότητες το ESP32 είναι εξαιρετικά οικονομικός μικροελεγκτής, γεγονός που συμβάλει άμεσα στον στόχο του χαμηλού συνολικού κόστους της συσκευής. Η ευρεία διαθεσιμότητα του επίσης εξασφαλίζει την εύκολη εύρεση του από πολλαπλούς προμηθευτές στην περίπτωση που χρειαστεί αντικατάσταση.

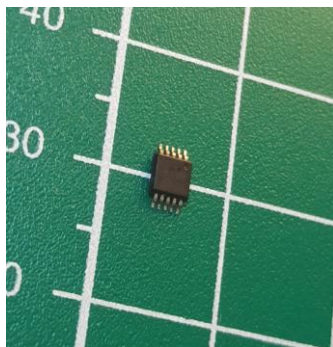
4.5.3 Αναλογική σε Ψηφιακή Μετατροπή

Η μετατροπή των αναλογικών σημάτων τάσης από το υπό έλεγχο κύκλωμα σε ψηφιακές τιμές που μπορεί να επεξεργαστεί ο μικροελεγκτής αποτελεί το σημαντικότερο στάδιο για την λειτουργία της συσκευής. Το υποσύστημα αυτό πρέπει να διαχειριστεί αναλογικά σήματα εντός του εύρους των $\pm 12V$ και να τα μετατρέψει με την απαιτούμενη ανάλυση των 15 bit. Για την μετατροπή των αναλογικών

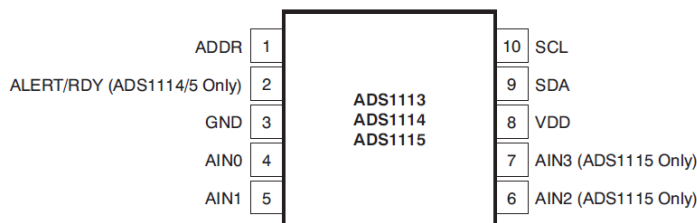
σημάτων σε ψηφιακών χρησιμοποιούνται ολοκληρωμένα κυκλώματα τα οποία ονομάζονται μετατροπείς αναλογικού σε ψηφιακού σήματος ή αλλιώς Analog to Digital Converter (ADC). Ένα ADC δέχεται μια αναλογική τάση στην είσοδο του και στην έξοδο του παράγεται μια ψηφιακή τιμή που αντιστοιχεί στην τάση που μετρήθηκε στην είσοδο. Για την αποκωδικοποίηση της ψηφιακής τιμής χρησιμοποιείται αναγκαστικά ένας μικροελεγκτής, στην περίπτωση αυτή το ESP32.

4.5.3.1 Επιλογή Analog to Digital Converter (ADC)

Η επιλογή ενός ADC για το εύρος των $\pm 12V$ αποτελεί σύνθετο πρόβλημα καθώς η πλειονότητα των ADC που προφέρονται στην αγορά είναι σχεδιασμένοι να λειτουργούν στο εύρος των 0V έως 3.3V ή 5V. Ακόμη και για ADC που υποστηρίζουν διπολικές μετρήσεις, σπάνια φτάνουν το εύρος των $\pm 12V$ και σπανιότερα προσφέρουν την απαιτούμενη ανάλυση των 15 bit με βιώσιμο κόστος αγοράς. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος η μετατροπή του σήματος θα πρέπει να πραγματοποιείται σε δυο στάδια, ένα στάδιο προσαρμογής του σήματος στο μετρήσιμο εύρος του ADC και ένα στάδιο μέτρησης του προσαρμοσμένου σήματος από το ADC. Αυτή η προσέγγιση παρέχει μέγιστη ευελιξία καθώς επιτρέπει την επιλογή ενός διαδεδομένου ADC ανεξάρτητα από το εύρος του σήματος εισόδου. Για το στάδιο μέτρησης επιλέχθηκε το ADS1115 της Texas Instruments, ένα 16 bit Analog to Digital Converter.



Εικόνα 4-5 Φωτογραφία του ADS1115



Εικόνα 4-6 ADS1115 Pinout [43]

Το ADS1115 αποτελεί τον πυρήνα του συστήματος μέτρησης και η επιλογή του βασίστηκε σε μια ισορροπία μεταξύ τεχνικών χαρακτηριστικών, κόστους και ευκολίας ενσωμάτωσης.

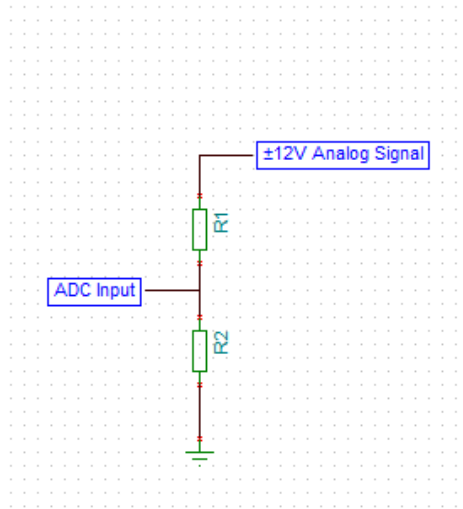
Χαμηλό Κόστος και Διαθεσιμότητα: Η δημοτικότητα του ADS1115 έχει οδηγήσει σε μεγάλους όγκους παραγωγής, με αποτέλεσμα το κόστος να παραμένει χαμηλό παρά την υψηλή ανάλυση των 16 bit που προσφέρει.

Διαθέσιμες Βιβλιοθήκες: Η ευρεία χρήση του ADS1115 έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη πολυάριθμων ώριμων και καλά τεκμηριωμένων βιβλιοθηκών λογισμικού για το Arduino IDE και το ESP IDE. Η διαθεσιμότητα αυτών των βιβλιοθηκών διευκολύνουν την επίλυση προβλημάτων και την προσαρμογή του κώδικα στις ειδικές ανάγκες τις συσκευής.

Ανάλυση: Το ADS1115 διαφημίζεται ως ένα 16 bit ADC, ωστόσο αυτή η ανάλυση επιτυγχάνεται μόνο σε διαφορετική λειτουργία όπου το ADC μετρά την διαφορά τάσης μεταξύ δυο σημάτων στις εισόδους του. Στην περίπτωση της συσκευής ελέγχου, η ανάγκη είναι η μέτρηση ενός μεμονωμένου σήματος σε σχέση με την γείωση, όχι η σύγκριση δυο σημάτων μεταξύ τους. Σε single ended λειτουργία το ADS1115 προσφέρει πραγματική ανάλυση 15 bit, που αντιστοιχεί στην προδιαγραφή της συσκευής.

4.5.3.2 Προσαρμογή Σήματος

Η προσαρμογή του σήματος έχει ως σκοπό την κλιμάκωση του από $\pm 12\text{V}$ σε 0V έως 4V το οποίο είναι το μετρήσιμο εύρος του ADS1115. Μια διαδεδομένη μέθοδο για κλιμάκωση σημάτων είναι με τη χρήση ενός διαιρέτη τάσης, όπου μέσω δυο αντιστάσεων $R1$ και $R2$ σε συνδεσμολογία όπως απεικονίζεται στην εικόνα [4-7], ένα σήμα μπορεί να κλιμακωθεί σε οποιοδήποτε εύρος επιθυμείται.



Εικόνα 4-7 Χρήση διαιρέτη τάσης για κλιμάκωση ενός αναλογικού σήματος

Για τον υπολογισμό των αντιστάσεων $R1$ και $R2$ απαιτείται να είναι γνωστός ο συντελεστής κλιμάκωσης. Στην παρούσα περίπτωση, ένα σήμα με εύρος 24V (-12V έως $+12\text{V}$) κλιμακώνεται σε σήμα εύρους 4V (0V έως 4V). Ο συντελεστής κλιμάκωσης προκύπτει ως:

$$k = \frac{24}{4} = 6$$

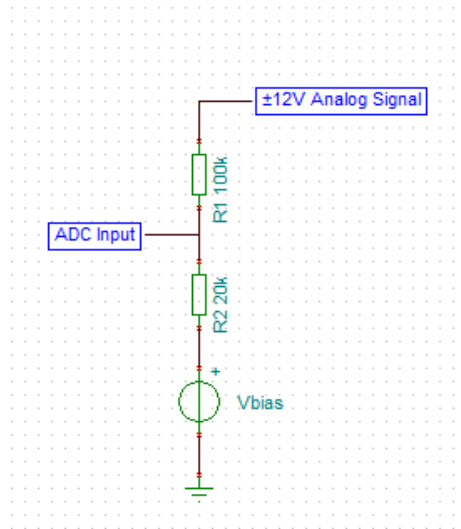
Για έναν διαιρέτη τάσης ισχύει:

$$V_{out} = V_{in} \frac{R2}{R1 + R2}$$

Για λόγο κλιμάκωσης 6:1 προκύπτει η συνθήκη:

$$R1 = 5R2$$

Με την επιλογή των τιμών $R1=100\text{k}\Omega$ και $R2=20\text{k}\Omega$ επιτυγχάνεται ο λόγος κλιμάκωσης 6:1, ενώ λόγο των σχετικά μεγάλων τιμών αντίστασης, το ρεύμα που αντλείται από το κύκλωμα υπό έλεγχο παραμένει αμελητέο. Μετά την κλιμάκωση, το σήμα διαθέτει το επιθυμητό εύρος τάσης των 4V . Ωστόσο, το εύρος αυτό δεν εκτείνεται από τα 0V έως 4V , αλλά από τα -2V έως $+2\text{V}$. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι ένας διαιρέτης τάσης επηρεάζει μόνο το πλάτος του σήματος και όχι το επίπεδο αναφοράς του. Για την μετατροπή του συμμετρικού σήματος (-2V έως $+2\text{V}$) σε σήμα κατάλληλο για μέτρηση από το ADC, απαιτείται η προσθήκη μιας τάσης μετατόπισης (DC bias) όπως παρουσιάζεται στην εικόνα[4-8].



Εικόνα 4-8 Διαιρέτης τάσης με πηγή τροφοδοσίας V_{bias}

Ο υπολογισμός της απαραίτητης τάσης μετατόπισης μπορεί να υπολογισθεί μέσω της μεθόδου της επαλληλίας. Σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας, η συνολική έξοδος ενός γραμμικού κυκλώματος ισούνται με το άθροισμα των αποκρίσεων που προκαλεί κάθε ανεξάρτητη πηγή τάσης ξεχωριστά. Στην προκειμένη περίπτωση, η έξοδος προκύπτει από τη συνεισφορά δυο ανεξάρτητων πηγών, του σήματος από το κύκλωμα υπό έλεγχο και του DC bias. Η τάση εξόδου δίνεται από την εξίσωση:

$$V_{out} = V_{in} \frac{R2}{R1 + R2} + V_{bias} \frac{R1}{R1 + R2}$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές των αντιστάσεων:

$$V_{out} = V_{in} \frac{20k\Omega}{120k\Omega} + V_{bias} \frac{100k\Omega}{120k\Omega}$$

$$V_{out} = V_{in} \frac{1}{6} + V_{bias} \frac{5}{6}$$

Ο συντελεστής $1/6$ αντιπροσωπεύει την κλιμάκωση του σήματος εισόδου, ενώ ο συντελεστής $5/6$ αντιπροσωπεύει τη συνεισφορά της τάσης DC bias. Για να επιτευχθεί η σωστή αντιστοίχιση του εύρους $\pm 12V$ στο εύρος $0V$ έως $4V$, η τάση αναφοράς υπολογίζεται από τη συνθήκη ότι το κατώτερο όριο της εισόδου ($-12V$) πρέπει να αντιστοιχεί στο κατώτερο όριο της εξόδου ($0V$). Εφαρμόζοντας τη συνθήκη $V_{in} = -12V$ και $V_{out} = 0V$ στην εξίσωση:

$$0V = (-12V) \frac{1}{6} + V_{bias} \frac{5}{6}$$

$$0 = -2V + V_{bias} \frac{5}{6}$$

$$V_{bias} \frac{5}{6} = 2V$$

$$V_{bias} = 2V \frac{6}{5} = 2.4V$$

Το DC bias στα $2.4V$ είναι η ακριβής τιμή που απαιτείται για να μετατοπιστεί το σήμα από $-2V$ έως $2V$ σε $0V$ έως $4V$.

Επαλήθευση Λειτουργίας

Για σήμα -12V:

$$V_{out} = (-12V) \frac{1}{6} + 2.4V \frac{5}{6} = -2V + 2V = 0V$$

Για σήμα +12V:

$$V_{out} = (+12V) \frac{1}{6} + 2.4V \frac{5}{6} = 2V + 2V = 4V$$

Υπολογισμός Τάσης Αρχικού Σήματος

Ξεκινάμε από την εξίσωση που είχαμε:

$$V_{out} = V_{in} \frac{1}{6} + 2.4V \frac{5}{6}$$

Απλοποίηση:

$$V_{out} = V_{in} \frac{1}{6} + 2V$$

Λύνουμε ως προς V_{in} :

$$V_{out} = -2V = V_{in} \frac{5}{6}$$

$$V_{in} = (V_{out} - 2V) * 6$$

Επαλήθευση Λειτουργίας

Για μετρημένη τιμή 4V από ADC:

$$V_{in} = (4V - 2V) * 6 = +12V$$

Για μετρημένη τιμή 0V από ADC:

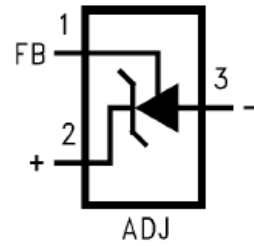
$$V_{in} = (0V - 2V) * 6 = -12V$$

4.5.3.3 Επιλογή Πηγής Τάσης Αναφοράς

Για την παραγωγή της απαιτούμενης τάσης DC bias στα 2.4V επιλέχθηκε το LM4051-N της Texas Instruments, μια πηγή τάσης αναφοράς υψηλής ακρίβειας. Η επιλογή του στοιχείου βασίστηκε στην σταθερότητα τάσης εξόδου που παρέχει. Η τάση εξόδου παραμένει σταθερή υπό συνθήκες μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας, μεταβαλλόμενης τάσης τροφοδοσίας και μεταβαλλόμενου φόρτου. Αυτή η σταθερότητα είναι καθοριστική για τη συνεπή και επαναληπτική λειτουργία της συσκευής.



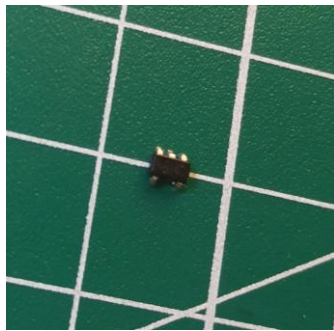
Εικόνα 4-9 Φωτογραφία του LM4051-N



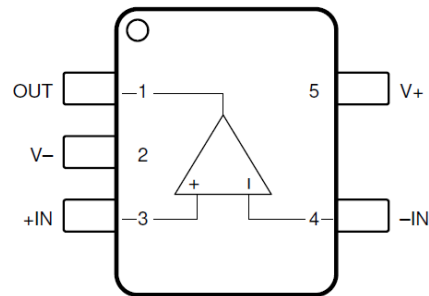
Εικόνα 4-10 LM4051-N Pinout [44]

4.5.3.4 Επιλογή Τελεστικού Ενισχυτή

Στο κύκλωμα προσαρμογής σήματος ο ρόλος του τελεστικού ενισχυτή είναι διττός, να παρέχει υψηλή αντίσταση εισόδου ώστε να μην επιβαρύνει το κύκλωμα υπό έλεγχο και να λειτουργεί ως buffer μεταξύ του διαιρετή τάσης και του ADC. Για αυτό το σκοπό επιλέχθηκε το OPA387 της Texas Instruments, ένας τελεστικός ενισχυτής ακριβείας με χαρακτηριστικά που καλύπτουν πλήρως τις απαιτήσεις της συσκευής.



Εικόνα 4-11 Φωτογραφία του OPA387



Εικόνα 4-12 OPA387 Pinout [45]

Το OPA387 διαμορφώνεται ως ακόλουθος τάσης, όπου η έξοδος ανατροφοδοτείται απευθείας στην αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού. Σε αυτή την διάταξη, η τάση εξόδου ακολουθεί πιστά την τάση εισόδου ($V_{out}=V_{in}$) και ταυτόχρονα απομονώνει την πηγή από το φορτίο χάρη την υψηλή αντίσταση εισόδου και τη χαμηλή αντίσταση εξόδου του τελεστικού ενισχυτή. Τα κύρια χαρακτηριστικά του OPA387 που το καθιστούν ιδανικό για την εφαρμογή είναι:

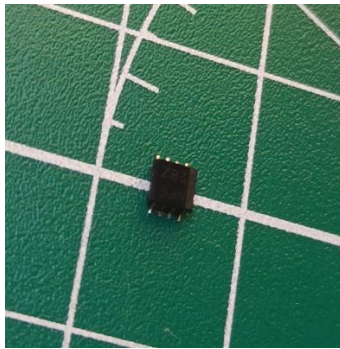
Εξαιρετικά χαμηλό Offset Voltage: Με μέγιστη τιμή μόλις 100μV, το OPA387 εξασφαλίζει ότι δεν εισάγει σημαντικό σφάλμα στο σήμα. Για σύστημα με ανάλυση 0.73mV ανά βήμα, το offset των 100μV είναι αμελητέο.

Υψηλή αντίσταση εισόδου: Η αντίσταση εισόδου του OPA387 είναι της τάξης των 1TΩ, γεγονός που σημαίνει ότι το ρεύμα που αντλείται από τον διαιρετή τάσης είναι επίσης αμελητέο, διασφαλίζοντας ότι η παρουσία του ADC δεν επηρεάζει τη λειτουργία του διαιρετή και ότι η τάση που μετράται αντιστοιχεί στην πραγματική τάση του κυκλώματος υπό έλεγχο.

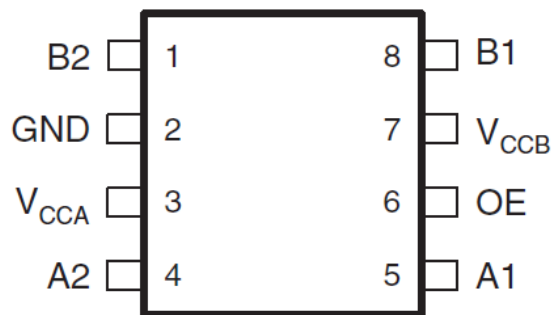
Rail to Rail output: Το OPA387 μπορεί να οδηγήσει την έξοδο του σε ολόκληρο το εύρος της τάσης τροφοδοσίας (rail to rail), εξασφαλίζοντας ότι το σήμα εξόδου δεν περιορίζεται ακόμη και όταν πλησιάζει τα άκρα του εύρους.

4.5.3.5 Voltage Translator

Το πρωτόκολλο επικοινωνίας I2C που χρησιμοποιεί το ADS1115 για την ανταλλαγή δεδομένων με τον μικροελεγκτή λειτουργεί σε τάση των 5V ενώ το ESP32 λειτουργεί στα 3.3V. Αυτή η ασυμφωνία τάσης δημιουργεί πρόβλημα συμβατότητας που πρέπει να επιλυθεί για την αξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ των δυο συσκευών καθώς η απευθείας σύνδεση του ESP32 θα προκαλούσε βλάβη στις εισόδους του μικροελεγκτή. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος επιλέχθηκε το TXS0102 της Texas Instruments, ένας διπλής κατεύθυνσης μεταφραστής τάσης (Bidirectional Voltage Translator) που επιτρέπει την ασφαλή επικοινωνία μεταξύ συσκευών που λειτουργούν με διαφορετικές τάσεις. Το TXS0102 διαθέτει δυο ανεξάρτητα κανάλια μετατροπής, ιδανικά για τις δυο γραμμές του πρωτοκόλλου I2C, το SDA (Serial Data) και το SCL (Serial Clock). Κάθε κανάλι λειτουργεί αμφίδρομα, επιτρέποντας τη μετάδοση σημάτων και προς τις δυο κατευθύνσεις χωρίς την ανάγκη περεταίρω οδηγίων από εξωτερικό μικροελεγκτή.



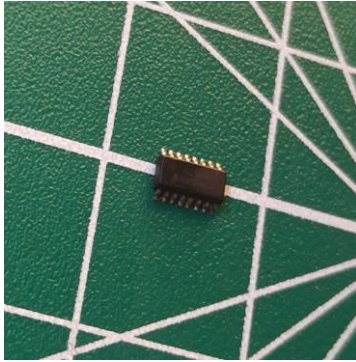
Εικόνα 4-13 Φωτογραφία του TXS0102



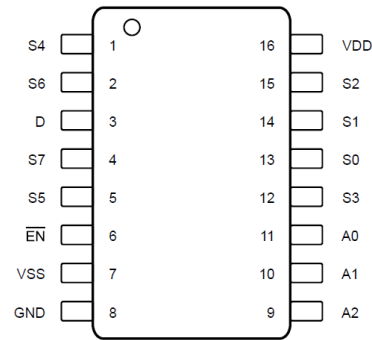
Εικόνα 4-14 TXS0102 Pinout [46]

4.5.4 Πολυπλεξία Σημάτων

Για την σάρωση 16 αναλογικών καναλιών, υιοθετήθηκε μια αρχιτεκτονική βασισμένη στην τεχνολογία της πολυπλεξίας. Η πολυπλεξία στην ηλεκτρονική μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένας ηλεκτρονικός διακόπτης με 1 έξοδο και πολλαπλές εισόδους. Υπό τον έλεγχο ενός μικροελεγκτή μπορεί να γίνει επιλογή των εισόδων διαδοχικά με αποτέλεσμα η επιλεγμένη είσοδος να συνδέεται με την κοινή έξοδο. Αντί να χρησιμοποιηθούν 16 ADC, η συσκευή χρησιμοποιεί αναλογικούς πολυπλέκτες (MUX) για την εναλλαγή μεταξύ των 16 καναλιών και ένα κοινό ADC υψηλής ακρίβειας. Αυτή η προσέγγιση είναι θεμελιώδους σημασίας για τη επίτευξη χαμηλού κόστους και σχεδιαστικής απλότητας, μειώνοντας τον αριθμό των απαιτούμενων εξαρτημάτων. Για την υλοποίηση της πολυπλεξίας επιλέχθηκε το TMUX4051-Q1 της Texas Instruments, ένας αναλογικός πολυπλέκτης με 8 εισόδους και 1 έξοδο (8:1). Για την κάλυψη των 16 καναλιών απαιτούνται δυο MUX όπου ο κάθε ένα θα διαχειρίζεται μια ομάδα 8 εισόδων. Οι λόγοι επιλογής του TMUX4051-Q1 εξυπηρετούν άμεσα τις τεχνικές προδιαγραφές της συσκευής ελέγχου.



Εικόνα 4-15 Φωτογραφία του TMUX4051-Q1



Εικόνα 4-16 TMUX4051-Q1 Pinout [47]

Εύρος Λειτουργίας: Το TMUX4051-Q1 υποστηρίζει την πολυπλεξία σημάτων από -12V έως $+12\text{V}$ όταν τροφοδοτείται καταλληλά με αρνητική και θετική τάση στους ακροδέκτες του.

Χαμηλή Αντίσταση: Η τυπική αντίσταση από μια είσοδο μέχρι την έξοδο ονομάζεται **Ron** στο datasheet του TMUX4051-Q1 και αντιστοιχεί σε τιμή $0.5\ \Omega$, που σημαίνει ελάχιστη πτώση τάσης και παραμόρφωση του σήματος κατά την πολυπλεξία, γεγονός που εξασφαλίζει ότι η μέτρηση που λαμβάνεται από το ADC αντιπροσωπεύει την πραγματική τάση στο κόμβο ελέγχου του κυκλώματος υπό έλεγχο.

Συμβατότητα με ESP32: Ένα κρίσιμο χαρακτηριστικό του TMUX4051-Q1 είναι η συμβατότητα με την τάση λειτουργίας των 3.3V του ESP32. Το TMUX αναγνωρίζει οτιδήποτε πάνω από 1.35V ως λογική τιμή 1 (True) και οτιδήποτε κάτω από 0.8V ως λογική τιμή 0 (False), γλυτώνοντας την ανάγκη για ενδιάμεσα κυκλώματα μετάφρασης τάσεων, όπως χρειάστηκε για το ADS1115.

Ταχύτητα Μεταγωγής: Ο χρόνος μεταγωγής (Switching Time) είναι της τάξης των 35ns και επιτρέπει τη σύρση των 16 καναλιών χωρίς καθυστερήσεις κατά την διαδικασία μέτρησης.

4.5.5 Τροφοδοσία

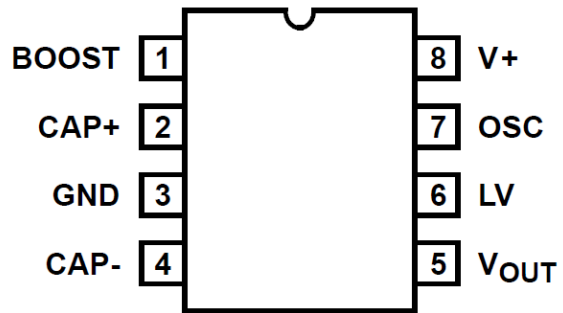
Το σύστημα τροφοδοσίας είναι υπεύθυνο για την παροχή σταθερών και καθαρών τάσεων σε όλα τα τμήματα της συσκευής. Η ποιότητα της τροφοδοσίας επηρεάζει άμεσα την ακρίβεια των μετρήσεων και τη σταθερότητα λειτουργίας του μικροελεγκτή. Για την κάλυψη των διαφορετικών αναγκών τάσης επιλέχθηκαν δυο βασικά ηλεκτρονικά στοιχεία και ένα κλασικό τροφοδοτικό πρίζας των $+12\text{V}$.

ICL7660S

Το ICL7660S είναι ένας από τους λίγους μετατροπείς τάσης της αγοράς που μετατρέπει μια θετική τάση εισόδου σε αρνητική τάση εξόδου. Η χρήση του επιλέχθηκε για την δημιουργία της αρνητικής ράγας -12V η οποία απαιτείτε ως τάση αναφοράς για τους δυο πολυπλέκτες (MUX). Το ICL7660S δέχεται μια θετική τάση και την μετατρέπει σε ισόποση αρνητική τάση χρησιμοποιώντας ελάχιστα εξωτερικά στοιχεία (δυο πυκνωτές και μια δίοδο). Για τις ανάγκες των πολυπλεκτών, όπου το συνολικό ρεύμα που καταναλώνεται αντιστοιχεί σε $14\mu\text{A}$ συνεχόμενα και $100\mu\text{A}$ στιγμιαία, το ICL7660S μπορεί να παρέχει συνεχόμενα 20mA στα -12V .



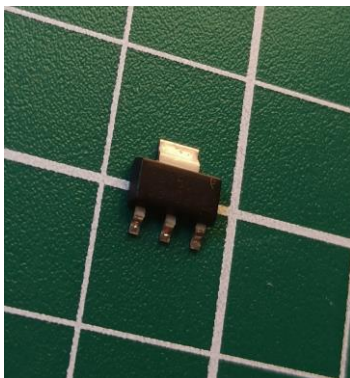
Εικόνα 4-17 Φωτογραφία του ICL7660S



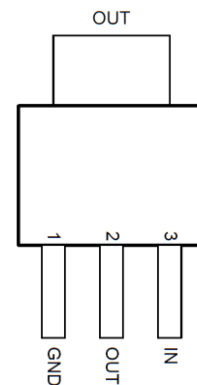
Εικόνα 4-18 ICL7660S Pinout [48]

TLV761

Το TLV761 είναι ένα Low Dropout Regulator (LDO) που παρέχει σταθερή τάση εξόδου +5V η οποία αξιοποιείται από το ESP32 και όλα τα ολοκληρωμένα που αποτελούν την συσκευή ελέγχου. Το TLV761 τροφοδοτείται από την ράγα των +12V DC και επιλέχθηκε για το μεγάλο ρεύμα εξόδου του που φτάνει έως τα 1A, που είναι παραπάνω από επαρκές για το ESP32 κατά την διάρκεια λειτουργίας του WiFi αλλά και για τα υπόλοιπα ηλεκτρονικά στοιχεία του κυκλώματος. Επιπλέον το TLV761 περιλαμβάνει ενσωματωμένη προστασία από υπερθέρμανση και παράγει πολύ χαμηλό θόρυβο στην έξοδο του, κάτι κρίσιμο για τη σταθερή λειτουργία του μικροελεγκτή και την αποφυγή παρεμβολών στα αναλογικά κυκλώματα.



Εικόνα 4-19 Φωτογραφία του TLV761



Εικόνα 4-20 TLV761 Pinout [49]

Τροφοδοτικό Πρίζας

Η πρωτεύουσα τροφοδοσία της συσκευής είναι ένα εξωτερικό τροφοδοτικό πρίζας που παρέχει +12V DC. Η επιλογή εξωτερικής τροφοδοσίας αντί για ενσωματωμένη βασίζεται κυρίως στην απλοποίηση του σχεδιασμού και την ασφάλεια καθώς η χρήση εξωτερικού τροφοδοτικού απομονώνει το κύκλωμα της συσκευής από τις τάσεις του δικτύου.



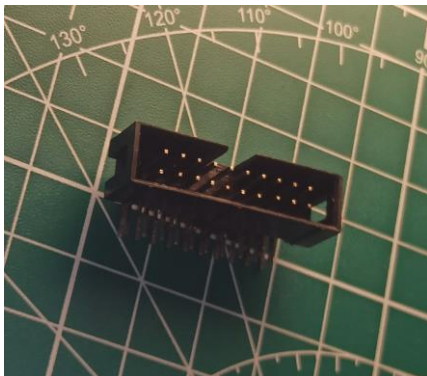
Εικόνα 4-21 Φωτογραφία τροφοδοτικού πρίζας

Τεχνικά Χαρακτηριστικά Τροφοδοτικού

- Brand: Asian Power Devices
- Model Number: WB-24D12FG
- AC input: 100V – 240V
- DC output: 12.0V
- Amperage output: 2.0A
- Wattage: 24.0W

4.5.6 Φυσική Διεπαφή

Για την σύνδεση της συσκευής με τα κυκλώματα προς έλεγχο προτεραιότητα δίνεται στην ασφάλεια και στην ευκολία χρήσης. Τα 16 κανάλια οδηγούνται σε ένα τυποποιημένο IDC 2x10 Pin Male Connector, το οποίο έπειτα δεσμεύεται με ένα κοινό flat cable και στα άκρα του καλωδίου χρησιμοποιούνται μικρά άγκιστρα με ελατήριο, για την σύνδεση στους κόμβους του κυκλώματος. Αυτά τα άγκιστρα επιτρέπουν την γρήγορη και ασφαλή σύνδεση χωρίς ανάγκη για συγκόλληση καλωδίων. Η μονωμένη κατασκευή τους αποτρέπει βραχυκυκλώματα και ελαχιστοποιείται ο κίνδυνος ζημίας και στα δυο κυκλώματα.



Εικόνα 4-22 Φωτογραφία του IDC 2x10 Pin Male

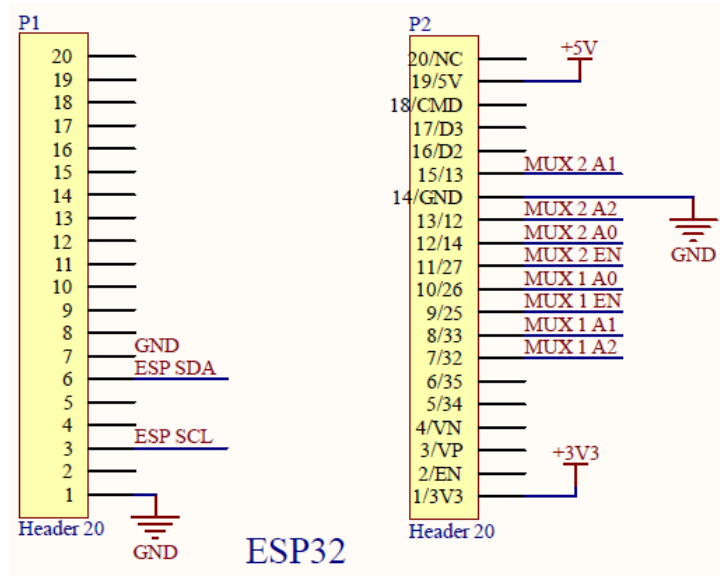


Εικόνα 4-23 Φωτογραφία του flat cable και των άγκιστρων

4.5.7 Ηλεκτρονικό Σχέδιο

Το ηλεκτρονικό σχέδιο της συσκευής ελέγχου αντιπροσωπεύει την πρακτική υλοποίηση όλων των επίλογων σχεδιασμού που αναλυθήκαν στις προηγούμενες ενότητες. Το σχέδιο αναπτύχθηκε στο Altium Designer και οργανώθηκε σε διακριτά λειτουργικά τμήματα, κάθε ένα από τα οποία υλοποιεί μια συγκεκριμένη πτυχή της συνολικής αρχιτεκτονικής. Στις επόμενες υποενότητες παρουσιάζονται αναλυτικά τα επιμέρους τμήματα του σχεδίου, με έμφαση στις συνδεσμολογίες και τις τεχνικές επιλογές που διασφαλίζουν την σωστή λειτουργία της συσκευής.

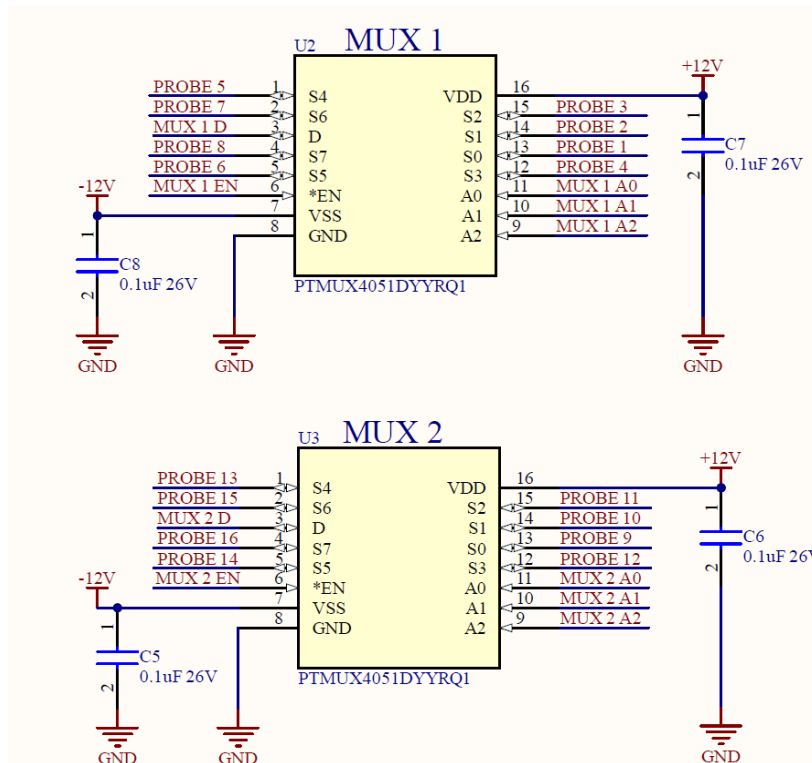
4.5.7.1 Μικροελεγκτής ESP32



Εικόνα 4-24 Απόσπασμα Κυκλώματος – Μικροελεγκτής ESP32

Το ESP32-WROVER-E αποτελεί τον επεξεργαστή της συσκευής και συνδέεται με όλα τα υποσυστήματα για τον συντονισμό της λειτουργίας τους. Η τροφοδοσία του μικροελεγκτή πραγματοποιείται από την ράγα των 5V που παρέχει το TLV761, ενώ το ίδιο το ESP32 διαθέτει ενσωματωμένο voltage regulator που μετατρέπει τα 5V σε 3.3V για την εσωτερική λειτουργία του. Παράλληλα τα ίδια 3.3V διατίθεται για την τροφοδοσία περιφερειακών. Για τον έλεγχο των πολυπλεκτών, το ESP32 χρησιμοποιεί οκτώ ψηφιακά pin που οργανώνονται σε δυο ομάδες. Η πρώτη ομάδα (MUX 1 EN, A0, A1, A2) ελέγχει τον πρώτο πολυπλέκτη, ενώ η δεύτερη ομάδα (MUX 2 EN, A0, A1, A2) ελέγχει τον δεύτερο πολυπλέκτη. Το pin EN ενεργοποιεί και απενεργοποιεί τον κάθε πολυπλέκτη ανάλογα. Η επικοινωνία με το ADC ADS1115 πραγματοποιείται μέσω του πρωτοκόλλου I2C χρησιμοποιώντας δυο pin του ESP32, το Serial Clock (SCD) για τον συγχρονισμό και το Serial Data (SDA) για την ανταλλαγή δεδομένων.

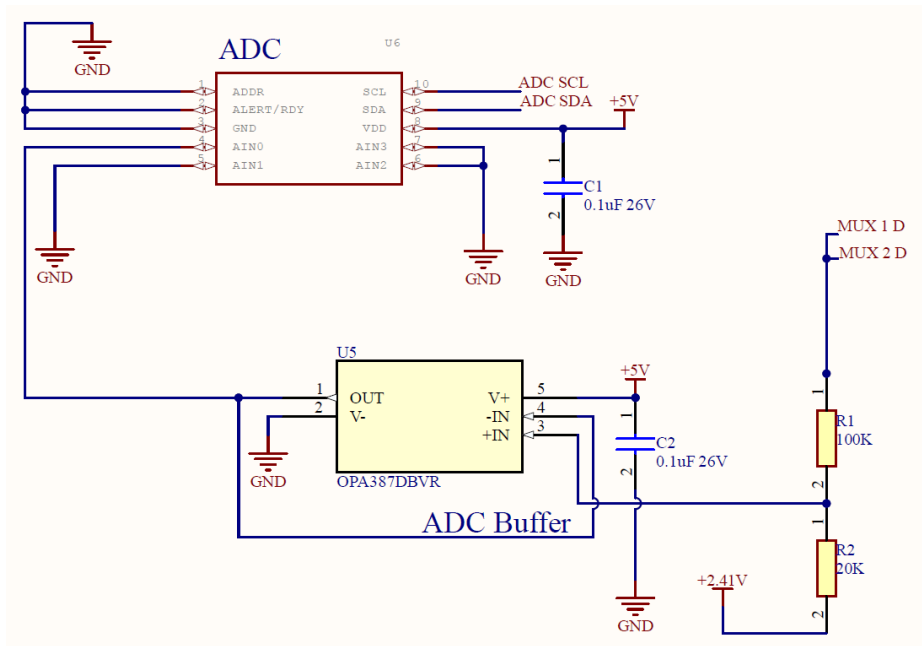
4.5.7.2 Πολυπλέκτες



Εικόνα 4-25 Απόσπασμα Κυκλώματος – Πολυπλέκτες Σημάτων

Οι δυο πολυπλέκτες TMUX4051-Q1 είναι υπεύθυνοι για τη δρομολόγηση των 16 αναλογικών σημάτων προς το σύστημα μέτρησης. Κάθε πολυπλέκτης διαχειρίζεται 8 εισόδους και τροφοδοτείται από τις ράγες των +12V και -12V, που τους επιτρέπουν να χειρίζονται σήματα σε ολόκληρο το εύρος των $\pm 12V$. Η αρνητική τροφοδοσία συνδέεται στο pin VSS ενώ η θετική στο pin VDD, και στα δυο pin έχουν τοποθετηθεί πυκνωτές decoupling με βάση τις οδηγίες του κατασκευαστή. Οι 16 ακροδέκτες εισόδου (PROBE 1 έως PROBE 16) κατανέμονται ισόποσα στους δυο πολυπλέκτες. Ο πρώτος πολυπλέκτης δέχεται τα κανάλια PROBE 1 έως PROBE 8 στις εισόδους S0 έως S7, ενώ ο δεύτερος πολυπλέκτης δέχεται τα κανάλια PROBE 9 έως PROBE 16 στις αντίστοιχες εισόδους του. Η επιλογή του ενεργού καναλιού γίνεται μέσω των pin A0, A1 και A2 που ελέγχονται από το ESP32. Οι έξοδοι των δυο πολυπλεκτών (pin D) είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους σε κοινό κόμβο καθώς κατά την λειτουργία της συσκευής, μόνο ένας από τους δυο πολυπλέκτες μπορεί να είναι ενεργός την δεδομένη στιγμή, ελεγχόμενος από το pin EN.

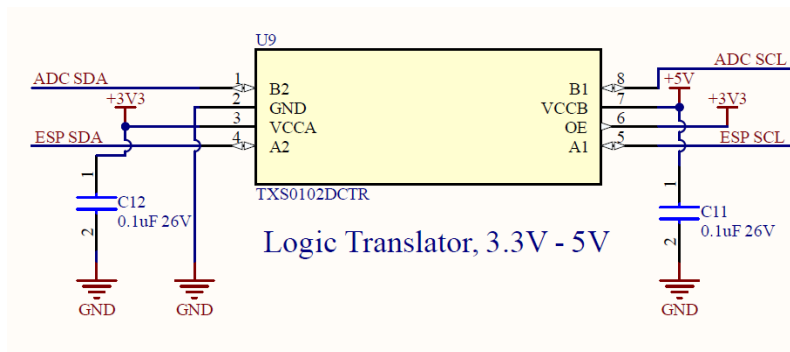
4.5.7.3 Προσαρμογή Σήματος και Αναλογική σε Ψηφιακή Μετατροπή



Εικόνα 4-26 Απόσπασμα Κυκλώματος – Προσαρμογή Σήματος και Αναλογική σε Ψηφιακή Μετατροπή

Το υποσύστημα προσαρμογής σήματος και μέτρησης μετατρέπει το αναλογικό σήμα των $\pm 12V$ σε ψηφιακή τιμή που μπορεί να επεξεργαστεί ο μικροελεγκτής. Η διαδικασία ξεκινά με την είσοδο του επιλεγμένου σήματος από τους πολυπλέκτες μέσω των κόμβων MUX 1 D και MUX 2 D, που όπως αναφέρθηκε είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους. Το σήμα εισέρχεται στον διαιρητή τάσης που αποτελείται από τις αντιστάσεις R1 και R2, ταυτόχρονα στον ίδιο κόμβο εφαρμόζεται η τάση V_{bias} των 2.4V και η συνδυασμένη δράση του διαιρητή και της τάσης V_{bias} πραγματοποιεί την κλιμάκωση του σήματος από τα $\pm 12V$ στα 0V έως 4V. Το προσαρμοσμένο σήμα στην συνέχεια οδηγείται στην είσοδο του τελεστικού ενισχυτή, ο οποίος είναι συνδεδεμένος ως ακόλουθος τάσης. Σε αυτή τη διάταξη η έξοδος του τελεστικού είναι συνδεδεμένη απευθείας στην αναστρέφουσα είσοδο, ενώ το σήμα εφαρμόζεται στη μη αναστρέφουσα είσοδο. Ο τελεστικός λειτουργεί ως απομονωτής του διαιρητή τάσης από το φορτίο που αντιπροσωπεύει το ADC και τροφοδοτείται από την ράγα των 5V, στην οποία έχει προστεθεί πυκνωτής decoupling. Η έξοδος του τελεστικού συνδέεται στην αναλογική είσοδο του ADS1115. Το ADC δειγματοληπτεί το σήμα και πραγματοποιεί τη μετατροπή από αναλογικό σε ψηφιακό με ανάλυση 15 bit σε single ended λειτουργία. Η επικοινωνία του ADC με τον μικροελεγκτή γίνεται μέσω των γραμμών SCL και SDA. Η τροφοδοσία επιτυγχάνεται από την ράγα των 5V και σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή έχει τοποθετηθεί decoupling πυκνωτής στο pin VDD.

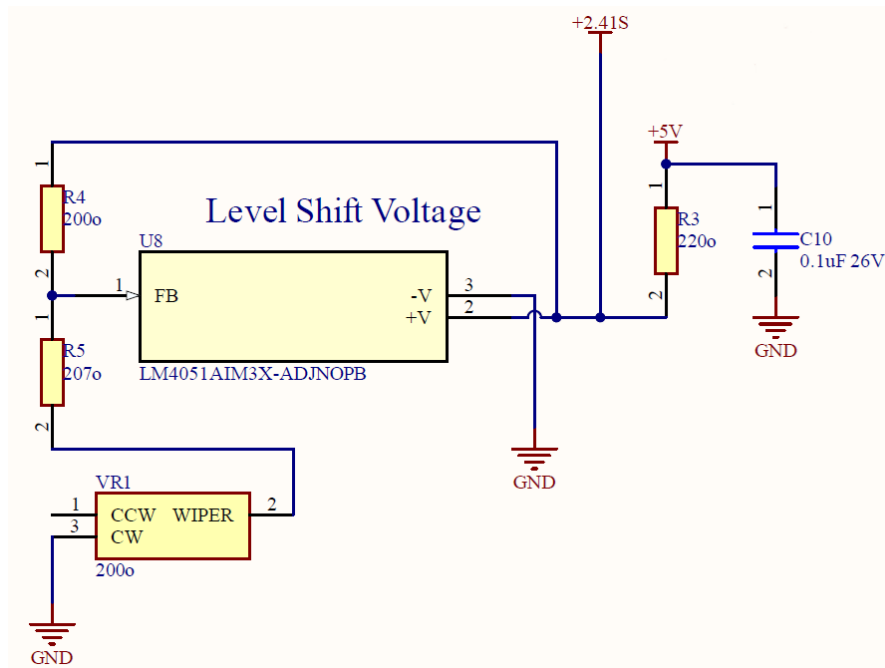
4.5.7.4 Logic Translator



Εικόνα 4-27 Απόσπασμα Κυκλώματος – logic Translator

Όπως προαναφέρθηκε το ESP32 λειτουργεί στα 3.3V και το ADC στα 5V. Για την επίλυση αυτής της ασυμφωνίας ενσωματώθηκε ένας αμφίδρομος μετατροπέας που επιτρέπει την ασφαλή επικοινωνία μεταξύ των δυο συστημάτων. Ο μετατροπέας τροφοδοτείται ταυτόχρονα από την ράγα των 3.3V και την ράγα των 5V. Τα σήματα SCL και SDA από το ESP32 συνδέονται στην πλευρά των 3.3V του μετατροπέα, ενώ τα αντίστοιχα pin του ADS1115 συνδέονται στην πλευρά των 5V. Όταν το ESP32 στέλνει εντολές προς το ADC, ο μετατροπέας ανυψώνει τα σήματα από 3.3V στα 5V και αντίστροφα όταν το ADC απαντά τα σήματα μειώνονται από 5V σε 3.3V. Σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή έχουν προστεθεί decoupling πυκνωτές στα pin τροφοδοσίας και των δυο πλευρών.

4.5.7.5 Πηγή Τάσης Ακριβείας +2.4V

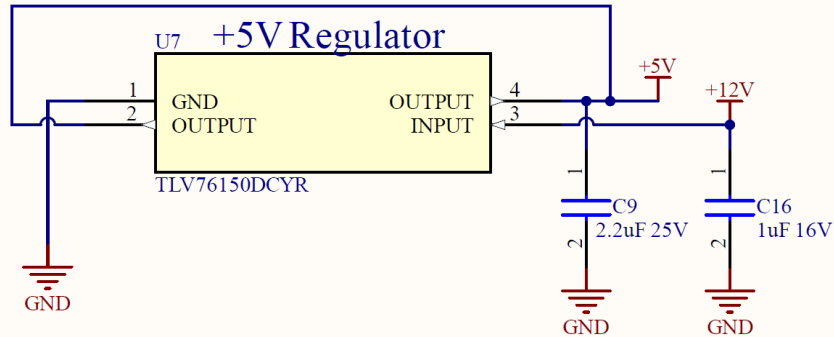


Εικόνα 4-28 Απόσπασμα Κυκλώματος – Πηγή Τάσης Ακριβείας (Vbias)

Η πηγή τάσης που παράγει την τάση DC bias των 2.4V υλοποιείται με το ολοκληρωμένο LM4051-N. Η πηγή τροφοδοτείται από τη ράγα των 5V και συνοδεύεται από ένα δίκτυο αντιστάσεων που καθορίζουν την τάση εξόδου. Η συνδεσμολογία των αντιστάσεων πραγματοποιήθηκε με βάση το datasheet που προσφέρει ο κατασκευαστής. Για την λεπτομερή ρύθμιση και αντιστάθμιση τυχόν αποκλίσεων που οφείλονται στις ανοχές των αντιστάσεων, στο κύκλωμα ενσωματώθηκε ένα ποτενσιόμετρο. Αυτό επιτρέπει την ακριβή ρύθμιση της τάσης εξόδου κατά τη διαδικασία

βαθμονόμησης της συσκευής. Στο pin τροφοδοσίας του LM4051-N τοποθετήθηκε decoupling πυκνωτής για τη σταθεροποίηση της τάσης και την ελαχιστοποίηση του θορύβου.

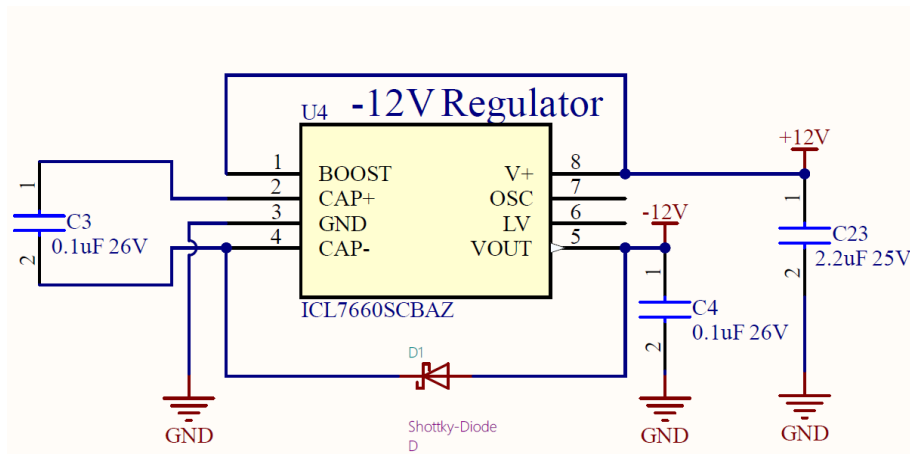
4.5.7.6 Ράγα Τροφοδοσίας +5V



Εικόνα 4-29 Απόσπασμα Κυκλώματος – Τροφοδοσία 5V

Η ράγα τροφοδοσίας των 5V αποτελεί τη βασική πηγή ενέργειας για τα περισσότερα ψηφιακά και αναλογικά τμήματα της συσκευής. Η παραγωγή της πραγματοποιείται με το Low Dropout Regulator TLV761, το οποίο δέχεται στην είσοδο του +12V από το εξωτερικό τροφοδοτικό. Στην έξοδο του TLV761, τοποθετήθηκε πυκνωτής με την τιμή που προδιαγραφεί ο κατασκευαστής στο datasheet, ο οποίος είναι απαραίτητος για τη σταθερότητα του regulator και την ελαχιστοποίηση κυματώσεων στη τάση εξόδου. Επιπλέον στην είσοδο της τροφοδοσίας του τοποθετήθηκε decoupling πυκνωτής για τη βελτίωση της απόκρισης σε απότομες μεταβολές φορτίου.

4.5.7.7 Ράγα Τροφοδοσίας -12V

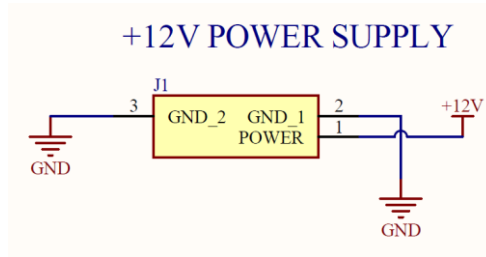


Εικόνα 4-30 Απόσπασμα Κυκλώματος – Τροφοδοσία -12V

Η ράγα της αρνητικής τροφοδοσίας -12V είναι απαραίτητη για τη λειτουργία των αναλογικών πολυπλεκτών στο πλήρες εύρος των +12V. Η παραγωγή της πραγματοποιείται με το ολοκληρωμένο ICL7660S, ένας μετατροπέας τάσης που βασίζεται στην τεχνολογία charge pump. Στην είσοδο του δέχεται +12V και παράγει στην έξοδο του την αντίστοιχη αρνητική τάση των -12V. Η λειτουργία charge pump απαιτεί συγκεκριμένα εξωτερικά στοιχεία όπως ένα πυκνωτή χρονισμού και μια δίοδο. Στην είσοδο του ολοκληρωμένου τοποθετήθηκε decoupling πυκνωτής για σταθεροποίηση της τάσης

τροφοδοσίας και στην έξοδο τοποθετήθηκε πυκνωτής για εξομάλυνση της παραγόμενης αρνητικής τάσης.

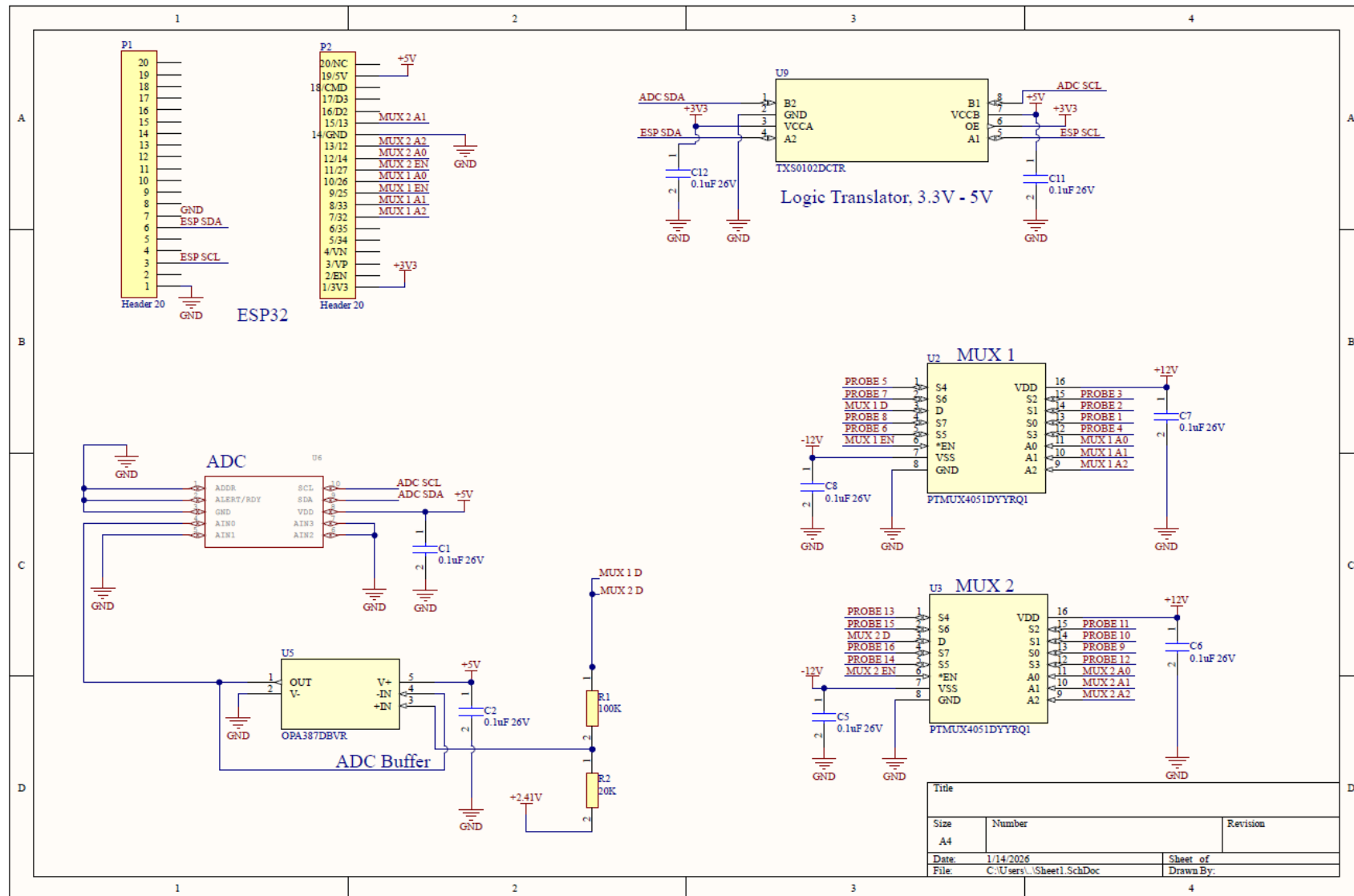
4.5.7.8 Ράγα Τροφοδοσίας +12V



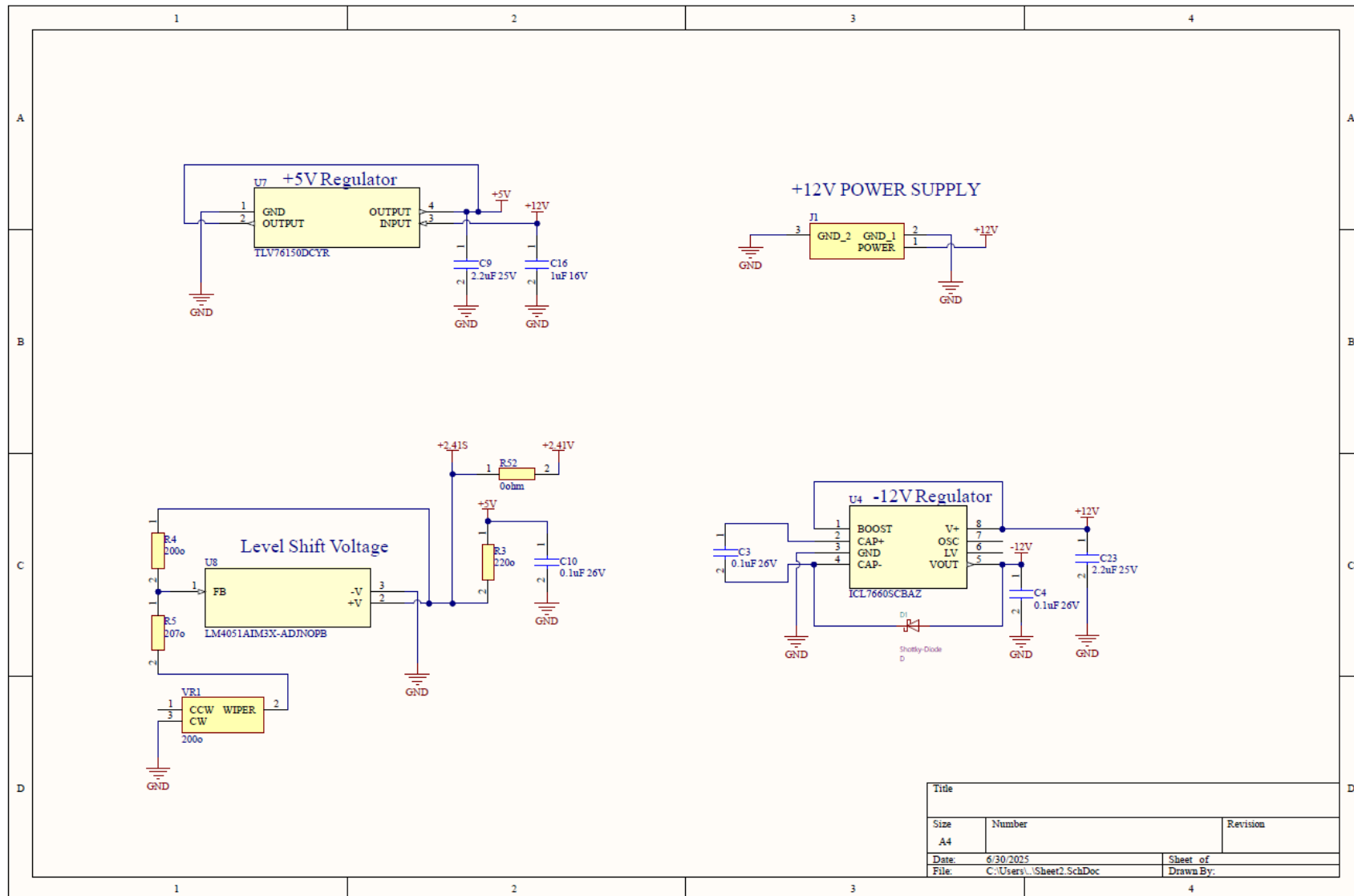
Εικόνα 4-31 Απόσπασμα Κυκλώματος – Τροφοδοσία +12V

Η τροφοδοσία της συσκευής προέρχεται από ένα εξωτερικό τροφοδοτικό πρίζας που παρέχει +12V DC. Η σύνδεση με το κύκλωμα πραγματοποιείται μέσω barrel jack.

Σχεδιασμός Συσκευής Ελέγχου Ηλεκτρονικών Κυκλωμάτων



Εικόνα 4-32 Κύκλωμα Συσκευής Ελέγχου Ηλεκτρονικών Κυκλωμάτων



Εικόνα 4-33 Κύκλωμα Τροφοδοτικών Συσκευής Ελέγχου Ηλεκτρονικών Κυκλωμάτων

4.6 Επίλογος

Το σχέδιο που παρουσιάστηκε στο παρόν κεφάλαιο αποτελεί μια λύση βασισμένη στις αρχές τις στενευμένης επάρκειας και της πρακτικής εφαρμογής, η προτεινομένη αρχιτεκτονική υλοποιεί τους βασικούς στόχους χωρίς περιττή πολυπλοκότητα, η επεξεργαστική ισχύς του ESP32 και η διαδικτυακή διεπαφή εξαλείφουν την ανάγκη εξειδικευμένων γνώσεων ενώ παράλληλα το υποσύστημα μετρήσεων εξασφαλίζει ακρίβεια σε ικανοποιητικό επίπεδο.

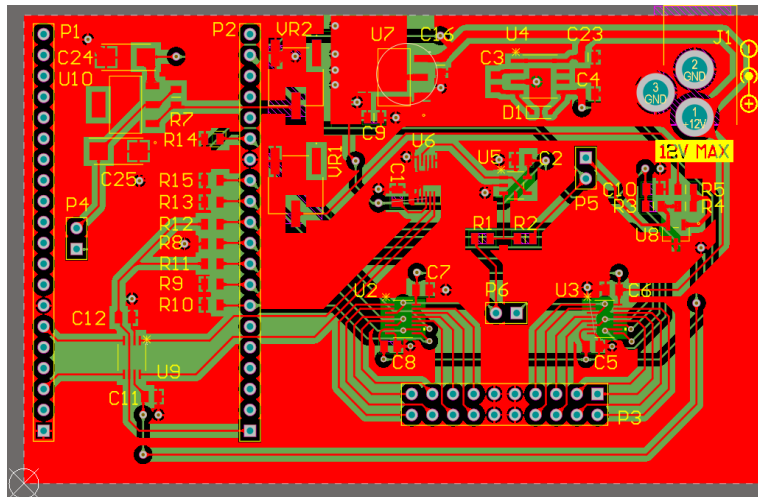
Κεφάλαιο 5ο: Κατασκευή Συσσκευής

5.1 Εισαγωγή

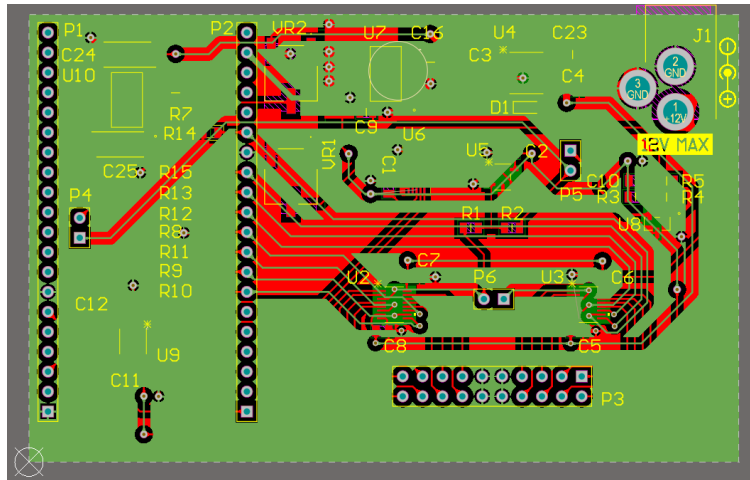
Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η μετατόπιση της συσκευής από την θεωρία στην πραγματική υλοποίηση. Η διαδικασία αρχίζει με την παραγωγή του τυπωμένου κυκλώματος και προχωράει στη φυσική συναρμολόγηση της συσκευής.

5.2 Κατασκευή Τυπωμένου Κυκλώματος

Για την παραγωγή του φυσικού τυπωμένου κυκλώματος επιλέχθηκε η JLCPCB, ένας κατασκευαστής τυπωμένων κυκλωμάτων που προσφέρει ταχύτητα παράδοσης με χαμηλό κόστος παραγωγής για τυπωμένα κυκλώματα διαστάσεων έως 10cm x 10cm, γεγονός που καθόρισε και το μέγιστο μέγεθος της συσκευής. Το ηλεκτρονικό κύκλωμα που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4 μεταφέρθηκε στο περιβάλλον σχεδίασης τυπωμένων κυκλωμάτων του Altium Designer και κάθε ηλεκτρονικό στοιχείο συσχέτιστηκε με το αντίστοιχο footprint του, το οποίο ορίζει το φυσικό αποτύπωμα του εξαρτήματος πάνω στο τυπωμένο κύκλωμα. Τα footprint παρέχονται από τα datasheet των κατασκευαστών και παρουσιάζουν τις διαστάσεις του στοιχείου και τις διαστάσεις των pin για τη ηλεκτρική σύνδεση του στοιχείου με το τυπωμένο κύκλωμα. Η τοποθέτηση των στοιχείων έγινε με γνώμονα την ευκολία κατασκευής της τελικής συσκευής και συγκεκριμένα, να επιτρέπεται η κατασκευή του μόνο με ένα κολλητήρι χειρός. Επιλέχθηκε το τυπωμένο κύκλωμα να αποτελείται από δυο επίπεδα χαλκού καθώς είναι υπεραρκετά για το πλήθος δρομολογήσεων που χρειάζονται μεταξύ των στοιχείων. Στην εικόνα 5-1 με κόκκινο χρώμα αντιπροσωπεύονται τα σημεία που υπάρχει χαλκός στην πρώτο επίπεδο και στην εικόνα 5-2 με πράσινο χρώμα τα σημεία που υπάρχει χαλκός στο δεύτερο επίπεδο. Σε όλους τους ελεύθερους χώρους και των δυο επιπέδων δημιουργήθηκε επίπεδο γείωσης για να αποφευχθούν περεταίρω δρομολογήσεις για την γείωση των στοιχείων.

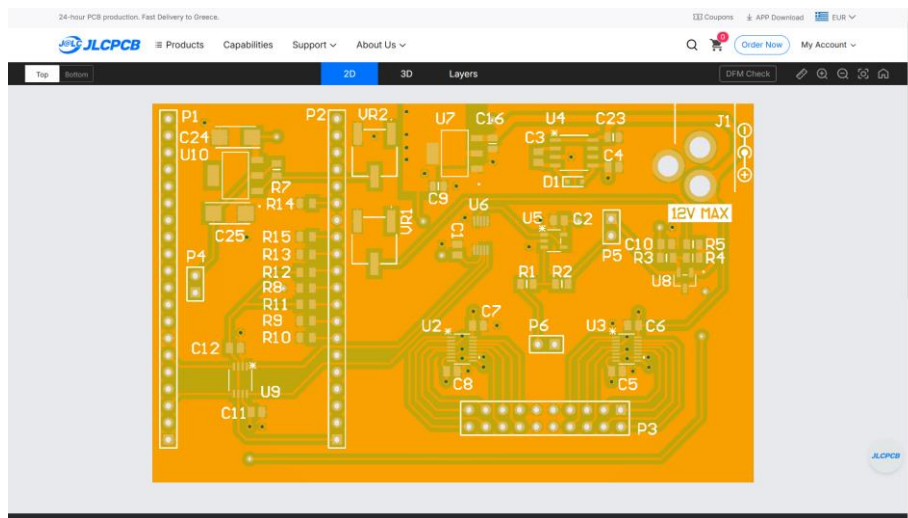


Εικόνα 5-1 Μπροστινή όψη τυπωμένου κυκλώματος κατά την σχεδίαση στο πρόγραμμα Altium

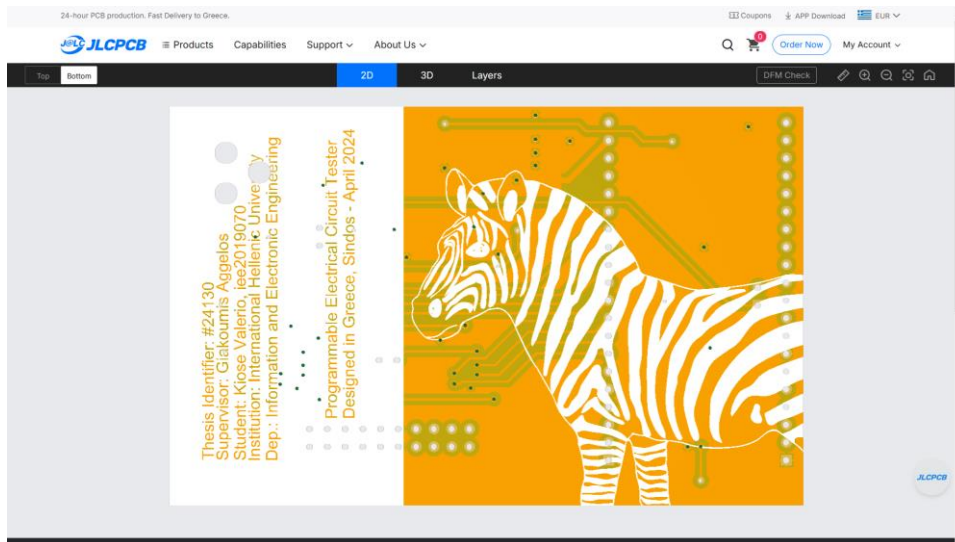


Εικόνα 5-2 Πίσω όψη τυπωμένου κυκλώματος κατά την σχεδίαση στο πρόγραμμα Altium

Μετά την ολοκλήρωση της δρομολόγησης, εξάγονται από το Altium αρχεία τύπου Gerber που περιέχουν όλες τις πληροφορίες των στρωμάτων του κυκλώματος που χρειάζονται για την κατασκευή του, όπως που πρέπει να υπάρχει χαλκός για συνδέσεις, που πρέπει να υπάρχουν τρύπες για στοιχεία και που πρέπει να υπάρχουν αναγνωριστικά (Designator) επάνω στην επιφάνεια του τυπωμένου. Τα αρχεία έπειτα μεταφέρονται στην πλατφόρμα της JLCPCB όπου επαληθεύονται πριν την έναρξη της παραγωγής.



Εικόνα 5-3 Μπροστινή όψη κυκλώματος μέσω του PCB viewer της JLCPCB



Εικόνα 5-4 Πίσω όψη κυκλώματος μέσω του PCB viewer της JLCPCB

5.3 Bill of Materials

Το Bill of Materials (BOM) αποτελεί τον πλήρη κατάλογο όλων των ηλεκτρονικών στοιχείων που απαιτούνται για την συναρμολόγηση της συσκευής. Κάθε στοιχείο καταγράφεται με την περιγραφή του, το part number του, το designator που υποδεικνύει την θέση στο τυπωμένο κύκλωμα και την απαιτούμενη ποσότητα. Το BOM χρησιμεύει σαν οδηγός κατά τη διαδικασία συγκόλλησης των στοιχείων αλλά και ως απαραίτητο εργαλείο για τον υπολογισμό του κόστους κατασκευής. Η προμήθεια των στοιχείων πραγματοποιήθηκε εξολοκλήρου μέσω του διαδικτυακού προμηθευτή Mouser.com.

Table 1 Σύνολο ηλεκτρονικών στοιχείων που απαρτίζουν την συσκευή

Description	Part Number	Designator	Qty
Capacitor 0.1uF 26V	08053G104ZAT4A	C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C10, C11, C12	11
Capacitor 2.2uF 25V	CL21B225KAFNNNE	C9, C23	2
Capacitor 1uF 16V	CL21B225KAFNNNE	C16	1
Diode	BZY55B12RBG	D1	1
Barrel Jack Connector	694106301002	J1	1
Header 20 Pin	DS1065-01-1*20S8BV	P1, P2	2
Header 10X2 Pin	DS1013-20RSIB	P3	1
Header 2 Pin	-	P4, P5, P6	3
Resistor 100kOhm	RT0805DRD07100KL	R1	1
Resistor 20kOhm	RT0805DRD0720KL	R2	1
Resistor 220Ohm	RT0805FRE10220RL	R3	1
Resistor 200Ohm	RT0805FRE07200RL	R4	1
Resistor 207Ohm	RT0805DRE0720RL	R5	1
Resistor 10kOhm	RT0805DRD0710KL	R8, R9, R10, R11, R12, R13, R14, R15	8
Multiplexer 8:1	PTMUX4051DYRQ1	U2, U3	2
Charge Pump	ICL7660SCBAZ	U4	1
Op-Amp	OPA387DBVR	U5	1
16-Bit Delta-Sigma ADC	ADS1114IDGSR	U6	1

Precision Voltage Reference	LM4051AIM3X-ADJNOPB	U8	1
Voltage Translator	TXS0102DCTR	U9	1
ESP32 MCU	ESP32-DEVKTC32VE	-	1
LDO	TLV76150DCYR	U7	1
Variable Resistor 200Ohm	3361P-1-201GLF	VR1	1

5.4 Εξοπλισμός Συγκόλλησης

Για τη συγκόλληση των ηλεκτρονικών στοιχείων στο τυπωμένο κύκλωμα απαιτείται βασικός εξοπλισμός, ο οποίος περιλαμβάνει: Ένα σταθμό συγκόλλησης με ρυθμιζόμενη θερμοκρασία, στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιήθηκε ο σταθμός YIHUA 936. Η δυνατότητα ελέγχου θερμοκρασίας είναι απαραίτητη για την ασφαλή συγκόλληση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων που είναι ευαίσθητα στην υπερθέρμανση λόγω μικρού μεγέθους.



Εικόνα 5-5 Σταθμός συγκόλλησης YIHUA 936 με ρυθμιζόμενη θερμοκρασία

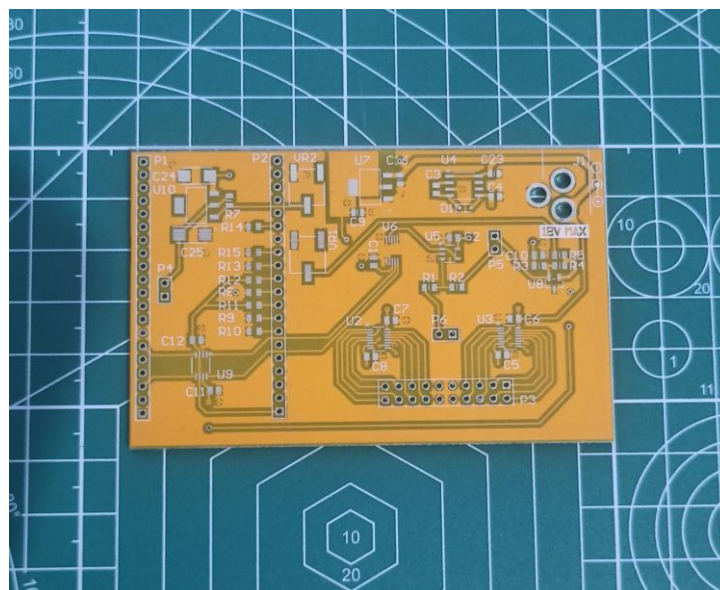
Κομμάτι του βασικού εξοπλισμού είναι και τα ακόλουθα αναλώσιμα υλικά: Καλάι από κράμα κασσίτερου και μολυβδου για την ευκολότερη ροή κατά την συγκόλληση των στοιχείων. Σολντερίνη για το καθάρισμα των επιφανειών κατά την συγκόλληση με το καλάι και τέλος τρέσα αποκόλλησης για την αφαίρεση περισσίου καλάι και διορθώσεις.



Εικόνα 5-6 Αναλώσιμα υλικά α) Καλάι, β) Σολντερίνη, γ) Τρέσα αποκόλλησης

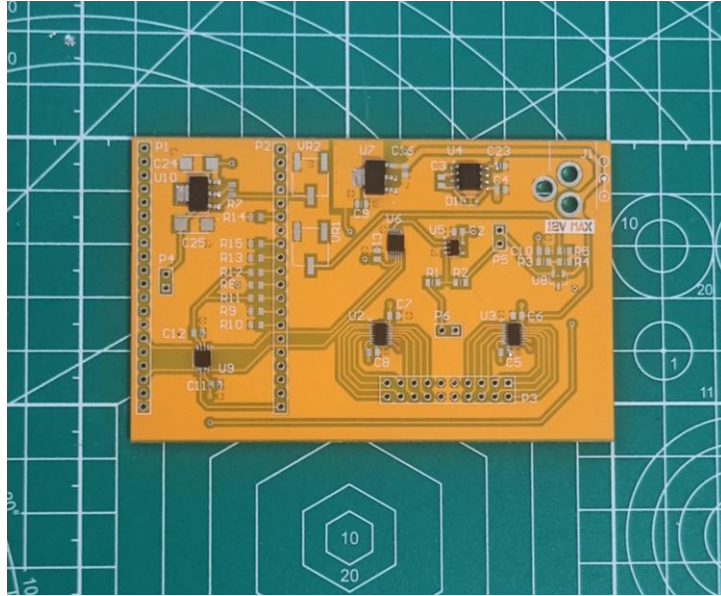
5.5 Συγκόλληση Στοιχείων στο PCB

Το τυπωμένο κύκλωμα παραλαμβάνεται από τον κατασκευαστή χωρίς ηλεκτρονικά στοιχεία εικόνα 5-7 και η διαδικασία συγκόλλησης πραγματοποιείται χειροκίνητα. Για τη βέλτιστη συγκόλληση των στοιχείων είναι κρίσιμο να ληφθεί υπόψη η σειρά τοποθέτησης τους καθώς η λάθος σειρά δυσκολεύει την πρόσβαση σε άλλα σημεία του κυκλώματος αργότερα.



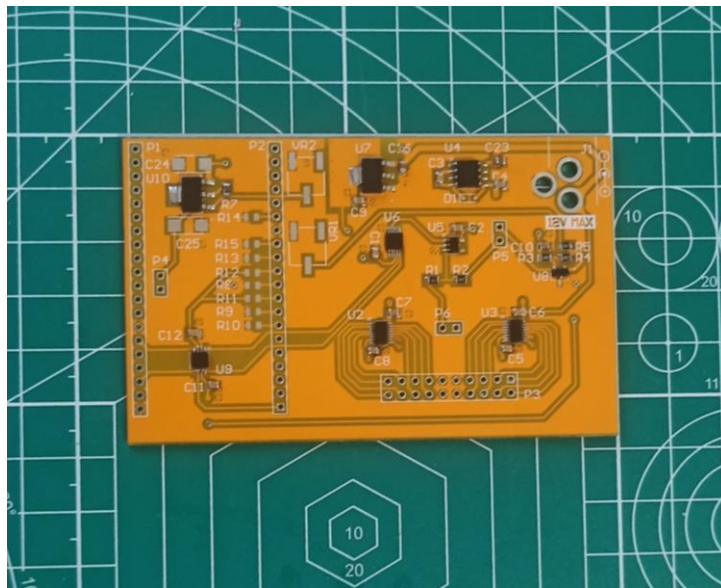
Εικόνα 5-7 Τυπωμένο κύκλωμα χωρίς ηλεκτρονικά στοιχεία συγκολλημένα

Πρώτα τοποθετούνται και συγκολλούνται τα ολοκληρωμένα κυκλώματα καθώς η πλειοψηφία τους είναι Surface Mount Devices (SMD) και έχουν μικρό ύψος και πολλαπλές ακίδες που απαιτούν ακριβή εργασία. Η προτεραιότητα στα ολοκληρωμένα εξασφαλίζει ελεύθερη πρόσβαση και αποφυγή πιθανής ζημίας σε γειτονικά στοιχεία με το κολλητήρι, το οποίο τίθεται στους 350 βαθμούς Κελσίου.



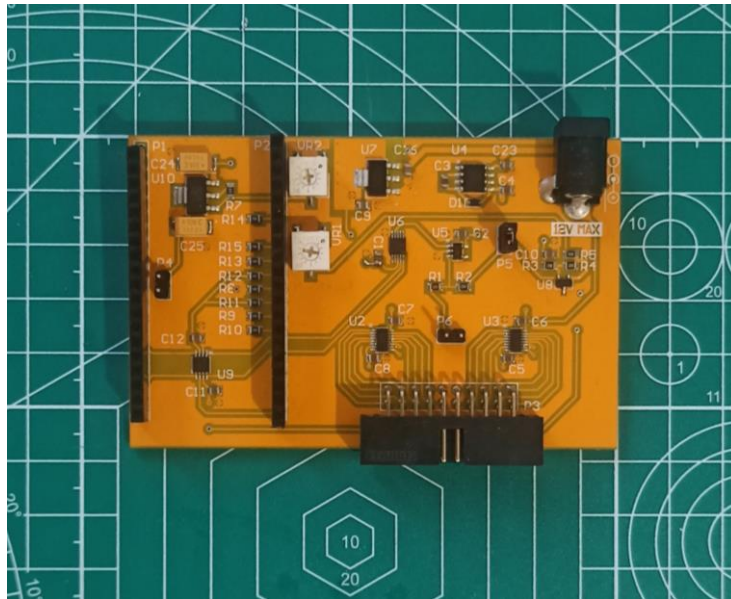
Εικόνα 5-8 Τοποθέτηση και συγκόλληση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

Ακολουθούν τα παθητικά στοιχεία όπως αντιστάσεις και πυκνωτές τα οποία είναι επίσης μικρού μεγέθους αλλά ευκολότερα στη συγκόλληση λόγω των δυο μόνο άκρων τους.



Εικόνα 5-9 Τοποθέτηση και συγκόλληση πυκνωτών και αντιστάσεων

Τελευταία τοποθετούνται τα connector και headers καθώς είναι ογκώδη στοιχεία που προεξέχουν από την επιφάνεια του τυπωμένου κυκλώματος. Επιπλέον, τα πλαστικά μέρη τους είναι ευαίσθητα στην θερμότητα και υπάρχει κίνδυνος παραμόρφωσης τους, η τοποθέτησή τους στο τέλος ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο ζημίας κατά τη συγκόλληση των υπολοίπων στοιχείων.



Εικόνα 5-10 Τοποθέτηση και συγκόλληση header και connector



Εικόνα 5-11 Ολοκληρωμένη προγραμματιζόμενη συσκευή ελέγχου ηλεκτρονικών κυκλωμάτων

5.6 Επίλογος

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε αναλυτικά η διαδικασία κατασκευής της συσκευής από τη σχεδίαση του τυπωμένου κυκλώματος μέχρι την τελική συναρμολόγηση του. Η επιτυχής ολοκλήρωση

Κατασκευή Συσκευής

αυτών των σταδίων αποτελεί προϋπόθεση για την μετάβαση στα επόμενα κεφάλαια όπου θα πραγματοποιηθεί ο προγραμματισμός και η δοκιμή της συσκευής.

Κεφάλαιο 6ο: Λογισμικό

6.1 Εισαγωγή

Το λογισμικό του προγραμματιζόμενου ελεγκτή κυκλωμάτων αποτελεί τον συνδετικό κρίκο μεταξύ του υλικού μέτρησης και του τελικού χρήστη. Το σύστημα βασίζεται σε κατανεμημένη προσέγγιση, όπου ο μικροελεγκτής ESP32 λειτουργεί ως Server και εκτελεί τις κρίσιμες λειτουργίες μέτρησης και έλεγχο του υλικού, ενώ ο Web Browser του χρήστη αναλαμβάνει την επεξεργασία δεδομένων, την εφαρμογή κανόνων και την παρουσίαση αποτελεσμάτων. Αυτή η αρχιτεκτονική επιτρέπει την ευελιξία στον προγραμματισμό των δοκιμών χωρίς την ανάγκη επαναπρογραμματισμού του μικροελεγκτή.

6.2 Αρχιτεκτονική Λογισμικού

Το σύστημα υιοθετεί μια αρχιτεκτονική client-server και διαχωρίζει τις λειτουργίες σε δυο κύρια επίπεδα:

Server Side (ESP32): Υπεύθυνο για τον άμεσο έλεγχο του υλικού, συμπεριλαμβανομένων των πολυπλεκτών και του ADC, την εκτέλεση μετρήσεων τάσης και την αποστολή των ακατέργαστων δεδομένων στον client μέσω Web Socket. Ο ESP32 λειτουργεί ως Web Server που εξυπηρετεί τη γραφική διεπαφή και διαχειρίζεται τις επικοινωνίες σε πραγματικό χρόνο.

Client Side (Browser): Αναλαμβάνει την επεξεργασία των μετρημένων τάσεων, τη σύγκριση με τα όρια που έχει ορίσει ο χρήστης, την αξιολόγηση των προσαρμοσμένων κανόνων και την αποθήκευση αποτελεσμάτων στη βάση δεδομένων. Η λογική των δοκιμών είναι πλήρως προγραμματιζόμενη από τον χρήστη χωρίς ανάγκη για τροποποίηση του προγράμματος.

Η επικοινωνία μεταξύ των δυο επιπέδων πραγματοποιείται μέσω Web Socket (θύρα 81) για δεδομένα πραγματικού χρόνου και HTTP (θύρα 80) για την εξυπηρέτηση στατικών αρχείων. Αυτός ο διαχωρισμός διασφαλίζει ότι οι κρίσιμες λειτουργίες μέτρησης εκτελούνται με σταθερότητα στον μικροελεγκτή, ενώ η ευελιξία του προγραμματισμού διατηρείται στο επίπεδο της εφαρμογής.

6.3 Επιλογή Περιβάλλοντος Ανάπτυξης

Το Arduino IDE επιλέχθηκε ως το κύριο περιβάλλον ανάπτυξης για τον προγραμματισμό του ESP32, η προηγούμενη εμπειρία με την πλατφόρμα της Arduino μειώνει σημαντικά το χρόνο ανάπτυξης, καθώς το περιβάλλον προσφέρει οικεία δομή και workflow. Η εκτενής υποστήριξη βιβλιοθηκών είναι επίσης ένα κρίσιμο πλεονέκτημα, βιβλιοθήκες όπως η ESPAsyncWebServer, WebSocketsServer, ArduinoJSON και ADS1115 είναι άμεσα διαθέσιμες μέσω του Library Manager, διασφαλίζοντας σταθερότητα και αξιοπιστία. Το περιβάλλον διαθέτει επίσης ενσωματωμένα εργαλεία serial monitor και debugging που διευκολύνουν την αντιμετώπιση προβλημάτων.

Για την ανάπτυξη της γραφικής διεπαφής, χρησιμοποιήθηκε το Visual Studio Code για την σύνταξη HTML, CSS και JavaScript.

6.4 Έλεγχος Υλικού

6.4.1 Έλεγχος Πολυπλέκτη

Οι δυο TMUX4051 πολυπλέκτες ελέγχονται μέσω 8 general purpose input output pins του ESP32, τρεις γραμμές επιλογής διεύθυνσης (A0, A1, A2) και μια γραμμή ενεργοποίησης (EN) για κάθε πολυπλέκτη.

Οι γραμμές A0, A1, A2 διαμορφώνονται ως έξοδοι και δημιουργούν 3 bit δυαδικό κώδικα για επιλογή ενός από τα 8 κανάλια. Η γραμμή EN είναι υπεύθυνη για την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του κάθε πολυπλέκτη. Η σειριακή σάρωση των καναλιών είναι απαραίτητη επειδή και οι δυο πολυπλέκτες μοιράζονται την ίδια είσοδο του ADC, εάν οι δυο ήταν ενεργοί ταυτόχρονα, τα σήματα τους θα αναμειγνύονταν παράγοντας εσφαλμένες μετρήσεις. Μετά την αλλαγή καναλιού υπάρχει καθυστέρηση 50ms που επιτρέπει στη σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος να σταθεροποιηθεί πριν από νέα μέτρηση.

6.4.2 Παραμετροποίηση ADC και Έλεγχος

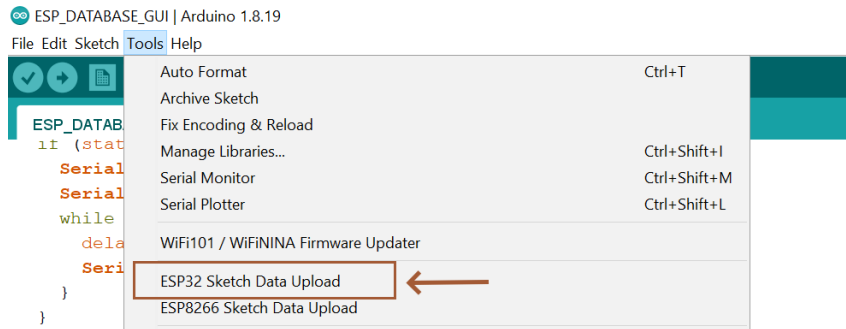
Ο ADS1115 είναι ένας 16 bit delta sigma ADC που επικοινωνεί μέσω I2C (SDA GPIO 21, SCL GPIO 22). Το σύστημα χρησιμοποιεί single shot conversion mode αντί για continuous mode για μεγαλύτερη σταθερότητα μετρήσεων. Κάθε μέτρηση περιμένει την ολοκλήρωση του conversion και στην συνέχεια διαβάζει το αποτέλεσμα. Ο τύπος $(adc.convertToVoltage(raw) - 2) * 6$ μετατρέπει την κλιμακωμένη τάση στην πραγματική τάση του αρχικού σήματος. Κάθε μέτρηση επαναλαμβάνεται 16 φορές και από αυτές υπολογίζεται ο μέσος όρος, βελτιώνοντας την ακρίβεια μέτρησης χωρίς να αυξάνεται υπερβολικά ο χρόνος εκτέλεσης του ελέγχου (περίπου 125ms ανα κανάλι). Χρησιμοποιείται επίσης χειρισμός σφαλμάτων για την επαλήθευση ότι κάθε δείγμα είναι έγκυρο και όχι διευρυμένα δεδομένα από την επικοινωνία μέσω I2C.

6.5 Web Server Implementation

Ο ESP32 λειτουργεί ως ασύγχρονος Web Server χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη ESPAsyncWebServer που επιτρέπει μη-blocking operations. Αυτό επιτρέπει στον Μικροελεγκτή να χειρίζεται ταυτόχρονα πολλαπλά αιτήματα χωρίς να διακόπτει τον κύριο βρόχο λειτουργίας του ή άλλες κρίσιμες διεργασίες όπως την μέτρηση σημάτων. Ο Server εξυπηρετεί τις τρεις παρακάτω κύριες λειτουργίες.

6.5.1 SPIFFS File System

Το Serial Peripheral Interface Flash File System (SPIFFS) χρησιμοποιεί τμήμα της 8MB Flash μνήμης του ESP32 για αποθήκευση αρχείων. Αυτό επιτρέπει την αποθήκευση ολόκληρης της Web εφαρμογής εντός του μικροελεγκτή, καθιστώντας τη συσκευή αυτόνομη χωρίς ανάγκη εξωτερικού Web Server. Τα αρχεία μεταφορτώνονται στο SPIFFS μέσω του Arduino IDE SPIFFS Sketch Data Upload Tool, μια φορά κατά την διάρκεια προγραμματισμού της συσκευής και έπειτα παραμένουν αποθηκευμένα ακόμα και αν χαθεί η τροφοδοσία ρεύματος.



Εικόνα 6-1 Εργαλείο μεταφόρτωσης αρχείων στην μνήμη Flash του ESP32

6.5.2 Static File Serving

Τα αρχεία της γραφικής διεπαφής (main.html, style.css, script.js) αποθηκεύονται στο SPIFFS file system και εξυπηρετούνται μέσω HTTP GET requests.

6.5.3 Web Socket Communication

Το Web Socket παρέχει πλήρη αμφίδρομη επικοινωνία για μεταφορά δεδομένων μεταξύ Client και Server. Όταν ένας client συνδέεται, το websocket.onEvent() ειδοποιεί τον server για τη νέα σύνδεση. Όταν φτάνει το μήνυμα “start_test” ο server εκτελεί τη διαδικασία μέτρησης και απαντά με τα αποτελέσματα σε JSON μορφή μέσω websocket.broadcastTXT(). Αυτή η προσέγγιση είναι πιο αποδοτική σε σχέση με άλλες που απαιτούν νέα σύνδεση μεταξύ Client – Server με κάθε νέο αίτημα. Εφόσον η συσκευή χρησιμοποιείται από ένα χρήστη την φορά, το Web Socket κρατάει ένα ανοιχτό κανάλι που επιτρέπει τόσο στον Server όσο και στον Client να στέλνουν δεδομένα οποιαδήποτε στιγμή χωρίς ανάγκη νέων πόρων.

```
{"measured_values": [4.872, 5.146, 4.389, 5.012, 4.657, 5.284, 4.933, 4.518, 5.097, 4.761, 5.221, 4.304, 4.689, 5.033, 4.845, 5.268]}
```

Εικόνα 6-2 Αποτελέσματα μετρήσεων σε JSON μορφή

6.6 Γραφική Διεπαφή

Η διεπαφή που βλέπει ο χρήστης είναι οργανωμένη σε ενότητες που καθεμιά εξυπηρετεί συγκεκριμένο σκοπό στη διαδικασία δοκιμής.

6.6.1 Πίνακας Μετρήσεων

Ο πίνακας μετρήσεων αποτελεί τον πυρήνα της διεπαφής και περιλαμβάνει 16 σειρές που αντιστοιχούν στα 16 διαθέσιμα κανάλια. Κάθε σειρά περιέχει πέντε στήλες, το όνομα του αγκίστρου που συνδέεται με το κύκλωμα υπό έλεγχο (P01 – P16), ένα input field για την ελάχιστη αποδεκτή τάση (Minimum voltage), ένα input field για τη μέγιστη αποδεκτή τάση (Maximum voltage), ένα κελί στο οποίο εμφανίζεται η μετρημένη τάση μετά την εκτέλεση της δοκιμής (Measured) και ένα κελί στο οποίο εμφανίζεται η κατάσταση του ελέγχου (PASS, FAIL, N/A) με χρωματική κωδικοποίηση (Πράσινο, Κοκκίνο, Λευκό). Στο τέλος του πίνακα εμφανίζονται δυο input fields για εισαγωγή Serial Number και Work Order, τα οποία χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση και καταγραφή κάθε δοκιμής στη βάση δεδομένων.

Testpoint margins and Test identification				
Probe	Minimum Voltage	Maximum Voltage	Measured	Result
P 01	Minimum voltage	Maximum voltage	N/A	N/A
P 02	Minimum voltage	Maximum voltage	N/A	N/A
P 03	Minimum voltage	Maximum voltage	N/A	N/A
P 04	Minimum voltage	Maximum voltage	N/A	N/A
P 05	Minimum voltage	Maximum voltage	N/A	N/A
P 06	Minimum voltage	Maximum voltage	N/A	N/A
P 07	Minimum voltage	Maximum voltage	N/A	N/A
P 08	Minimum voltage	Maximum voltage	N/A	N/A
P 09	Minimum voltage	Maximum voltage	N/A	N/A
P 10	Minimum voltage	Maximum voltage	N/A	N/A
P 11	Minimum voltage	Maximum voltage	N/A	N/A
P 12	Minimum voltage	Maximum voltage	N/A	N/A
P 13	Minimum voltage	Maximum voltage	N/A	N/A
P 14	Minimum voltage	Maximum voltage	N/A	N/A
P 15	Minimum voltage	Maximum voltage	N/A	N/A
P 16	Minimum voltage	Maximum voltage	N/A	N/A

Serial Number Work Order [Reset Table](#)

Εικόνα 6-3 Απόσπασμα γραφικής διεπαφής – Πίνακας μετρήσεων

6.6.2 Δείκτης Κατάστασης και Εκκίνηση Ελέγχου

Δίπλα από τον πίνακα βρίσκεται το κουμπί εκκίνησης του ελέγχου που ξεκινά τη διαδικασία μετρήσεων, περιλαμβάνεται επίσης ένδειξη κατάστασης που ενημερώνει τον χρήστη για την πρόοδο της δοκιμής (Test Running, Test Complete).

Test execution and Status	
<i>Run Test</i>	

Εικόνα 6-4 Απόσπασμα γραφικής διεπαφής – Ένδειξη κατάστασης

Test execution and Status	
<i>Run Test</i>	Test running...

Εικόνα 6-5 Απόσπασμα γραφικής διεπαφής – Ένδειξη κατάστασης με τρεχούμενο έλεγχο

Test execution and Status	
<i>Run Test</i>	Test complete

Εικόνα 6-6 Απόσπασμα γραφικής διεπαφής – Ένδειξη κατάστασης με ολοκληρωμένο έλεγχο

6.6.3 Περιοχή Εμφάνισης Αποτελεσμάτων

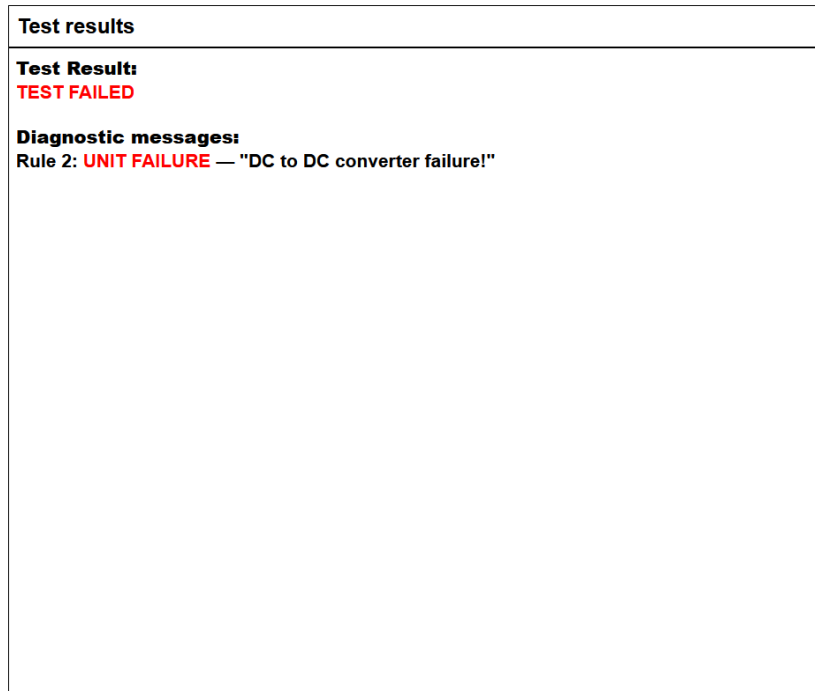
Σε αυτό το σημείο εμφανίζονται το αποτέλεσμα της συνολικής δοκιμής (TEST PASSED/FAILED) και τα διαγνωστικά μηνύματα από τυχόν κανόνες που ενεργοποιήθηκαν.



Εικόνα 6-7 Απόσπασμα γραφικής διεπαφής – Περιοχή εμφάνισης αποτελεσμάτων



Εικόνα 6-8 Απόσπασμα γραφικής διεπαφής – Εμφάνιση θετικού αποτελέσματος μετά από έλεγχο



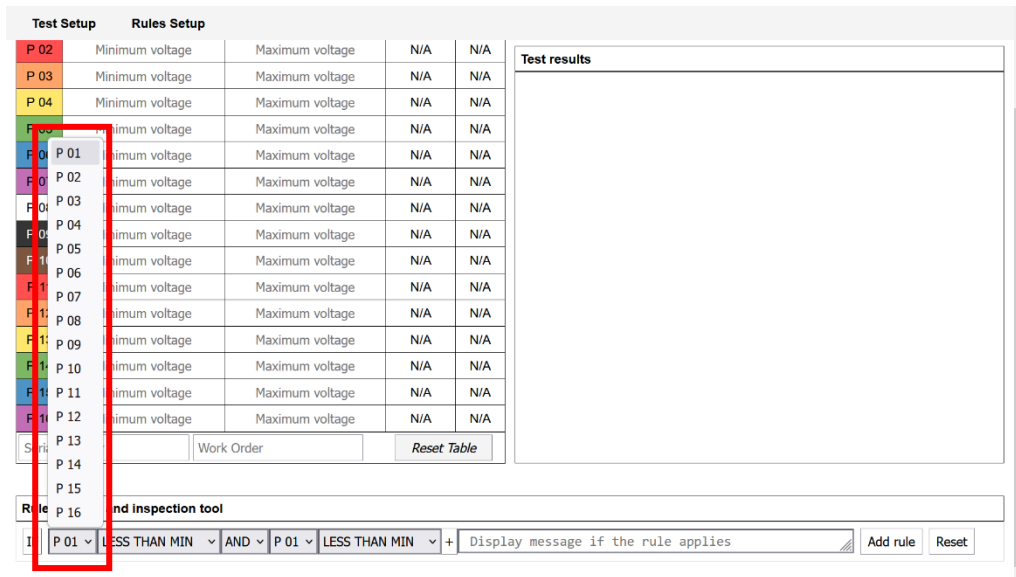
Εικόνα 6-9 Απόσπασμα γραφικής διεπαφής – Εμφάνιση αρνητικού αποτελέσματος με μήνυμα από ενεργοποιημένο κανόνα

6.6.4 Χτίστης Κανόνων

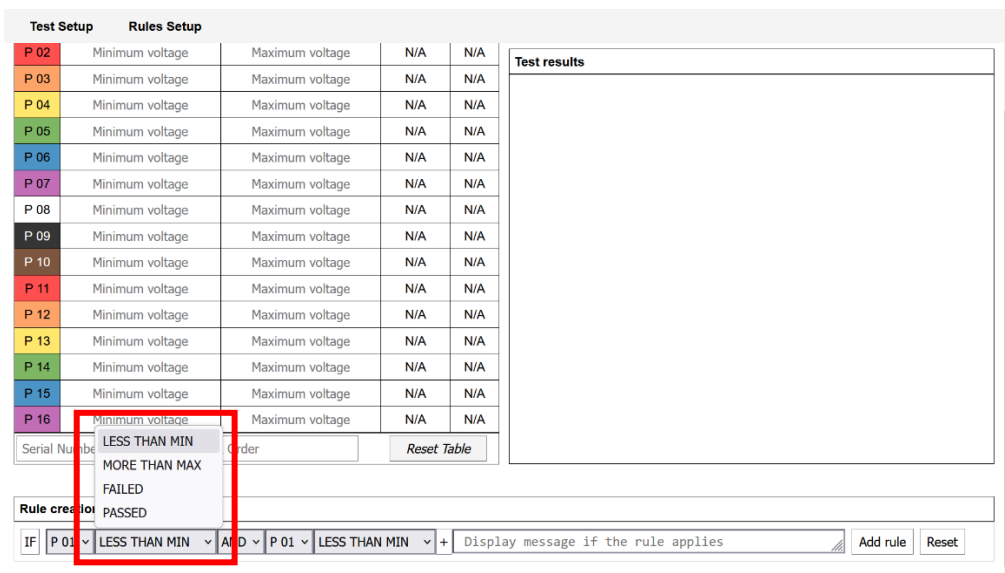
Η ενότητα δημιουργίας κανόνων επιτρέπει στον χρήστη να ορίσει σύνθετους διαγνωστικούς κανόνες. Χρησιμοποιώντας dropdown menu ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ένα από τα 16 άγκιστρα (P01 – P16), να ορίσει συνθήκες (LESS THAN MIN, MORE THAN MAX, FAILED, PASSED) και να τις συνδυάσει με λογικούς τελεστές (AND/OR) σε περίπτωση που ένας κανόνας αφορά παραπάνω από ένα άγκιστρο. Τέλος, κάθε κανόνας συνοδεύεται από ένα Text Area όπου ο χρήστης μπορεί να εισάγει προσαρμοσμένο διαγνωστικό μήνυμα.



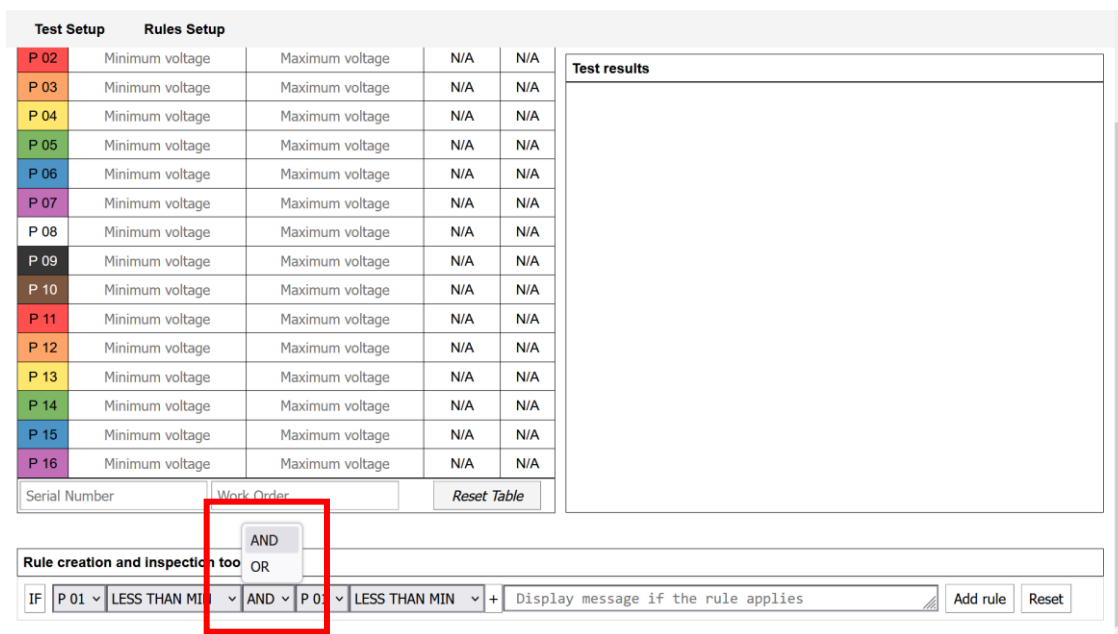
Εικόνα 6-10 Απόσπασμα γραφικής διεπαφής – Χτίστης κανόνων



Εικόνα 6-11 Απόσπασμα γραφικής διεπαφής – Επιλογή αγκίστρου κατά την δημιουργία ενός κανόνα

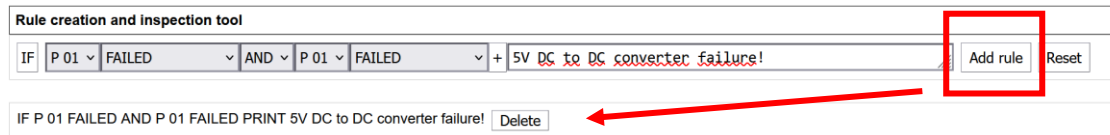


Εικόνα 6-12 Απόσπασμα γραφικής διεπαφής – Επιλογή συνθήκης κατά την δημιουργία ενός κανόνα



Εικόνα 6-13 Απόσπασμα γραφικής διεπαφής – Επιλογή λογικού τελεστή κατά την δημιουργία ενός κανόνα

Οι δημιουργημένοι κανόνες εμφανίζονται σε μορφή καρτών κάτω από το χτίστη κανόνων. Κάθε κάρτα δείχνει την περιγραφή του κανόνα σε αναγνώσιμη μορφή και περιλαμβάνει ένα κουμπί διαγράψης για εύκολη διαχείριση. Αυτή η οπτική αναπαράσταση επιτρέπει στον χρήστη να επαληθεύει τους κανόνες πριν την εκτέλεση του ελέγχου.



Εικόνα 6-14 Απόσπασμα γραφικής διεπαφής – Εισαγωγή μηνύματος και δημιουργία κανόνα

6.7 Επικοινωνία με Βάση Δεδομένων

Το σύστημα χρησιμοποιεί ενδεικτικά την PostgreSQL για μόνιμη αποθήκευση των αποτελεσμάτων, επιτρέποντας ιστορική ανάλυση και παρακολούθηση της ποιότητας των κυκλωμάτων υπό έλεγχο.

6.7.1 Αρχιτεκτονική Βάσης Δεδομένων

Η βάση δεδομένων οργανώνεται μέσω του πίνακα `test_result_history` που αποθηκεύει τα αποτελέσματα των ελέγχων. Ο πίνακας αποτελείται από τα ακόλουθα πεδία.

Table 2 Πίνακας “test_result_history” της βάσης δεδομένων

ΠΕΔΙΟ	ΤΥΠΟΣ	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ
<i>Entry ID</i>	INT 11	Κλειδί του πίνακα, κάθε εισαγωγή παίρνει ένα μοναδικό ID
Serial Number	VARCHAR 50	Σειριακός αριθμός του κυκλώματος υπό έλεγχο
Work Order	VARCHAR 50	Εντολή Εργασίας

Timestamp	DATETIME	Ημερομηνία και ώρα εκτέλεσης μέτρησης
Probe Number	INT 11	Αριθμός ακροδέκτη από τους 16 διαθέσιμους
Voltage Measured	FLOAT	Μετρημένη τάση στον ακροδέκτη
MIN Voltage	FLOAT	Ελάχιστη αποδεκτή τάση στον ακροδέκτη
MAX Voltage	FLOAT	Μέγιστη αποδεκτή τάση στον ακροδέκτη
Test Point FAIL/PASS	TINYINT 1	Επιτυχία/Αποτυχία με βάση το εύρος ελάχιστης και μέγιστης αποδεκτής τάσης
Diagnostic Message from Rules Applied	TEXT	Μηνύματα από τυχόν εφαρμοσμένους κανόνες

6.7.2 PHP Backend Interface

Ένα PHP Script που εκτελείται σε απομακρυσμένο server μαζί με την βάση δεδομένων δέχεται POST requests από τον client. Το Script επικυρώνει τα εισερχόμενα JSON δεδομένα και εισάγει την καταχώρηση του Test Session στην βάση δεδομένων μέσω SQL statement. Αυτή η προσέγγιση διαχωρίζει έως ένα βαθμό την αποθήκευση δεδομένων από το πρόγραμμα του μικροελεγκτή, επιτρέποντας τροποποίηση του backend χωρίς αλλαγές στο ESP32.

6.8 Ροή Λειτουργίας ενός Τυπικού Ελέγχου

Βήμα 1 – Αρχικοποίηση: Όταν ο χρήστης φορτώνει τη σελίδα, το windows.onload καλεί την init() που δημιουργεί ένα Web Socket connection στο ESP32.

Βήμα 2 – Ρύθμιση Παραμέτρων: Ο χρήστης εισάγει Serial Number, Work Order, ορίζει Min/Max όρια για όσα σημεία μέτρησης χρειάζεται από τον πίνακα και προαιρετικά δημιουργεί διαγνωστικούς κανόνες χρησιμοποιώντας το χτίστη κανόνων.

Βήμα 3 – Έναρξη Δοκιμής: Με το πάτημα του κουμπιού “Run Test” καλεί την μέθοδο runTest() που εμφανίζει “Test running...” και στέλνει μέσω Web Socket την εντολή “start_test”

Βήμα 4 – Μέτρηση Τάσεων: Το ESP32 λαμβάνει το μήνυμα και εκτελεί την μέθοδο muxMeasurement(), η οποία ενεργοποιεί διαδοχικά τον πρώτο πολυπλέκτη, επιλέγει τα κανάλια 0 έως 7 παίρνοντας τον μέσο όρο από το κάθε ένα και επαναλαμβάνει την διαδικασία για τον δεύτερο πολυπλέκτη.

Βήμα 5 – Αποστολή Δεδομένων: Η μέθοδος sendJson() δημιουργεί JSON αντικείμενο με τον πίνακα measured_values και το μεταδίδει μέσω Web Socket στον συνδεδεμένο Client.

Βήμα 6 – Εμφάνιση Αποτελεσμάτων: Ο browser λαμβάνει τα δεδομένα και η processMessage() τα αναλύει. Έπειτα η processTestPoint() συγκρίνει κάθε τιμή με τα όρια της και καλείται η ruleCheck() για να γίνει αξιολόγηση των κανόνων. Τέλος μέσω της updateTestPointUI() εμφανίζονται οι μετρήσεις, τα PASS/FAIL και τα μηνύματα από τους κανόνες που ενεργοποιήθηκαν στον χρήστη.

Βήμα 7 – Αποθήκευση: Η sendTestResultsToDB() στέλνει όλα τα αποτελέσματα στο PHP backend που τα αποθηκεύει στη PostgreSQL βάση δεδομένων και η διεπαφή εμφανίζει “Test complete” στον χρήστη επιτρέποντας την εκτέλεση ενός νέου ελέγχου.

6.9 Επίλογος

Η ανάπτυξη του λογισμικού για το σύστημα αντιπροσωπεύει τον πρακτικό συνδυασμό πολλαπλών τεχνολογιών σε ένα ενιαίο, λειτουργικό σύνολο. Από τη χαμηλού επιπέδου αλληλεπίδρασή με το υλικό, μέχρι τη δυναμική διεπαφή του χρήστη και την αυτοματοποιημένη καταγραφή δεδομένων, η δομή που υλοποιήθηκε επικεντρώνεται στον χρήστη που το χρησιμοποιεί. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα πλήρες περιβάλλον που μεταφράζει την τεχνική πολυπλοκότητα του κυκλώματος σε απλές, κατανοητές πληροφορίες.

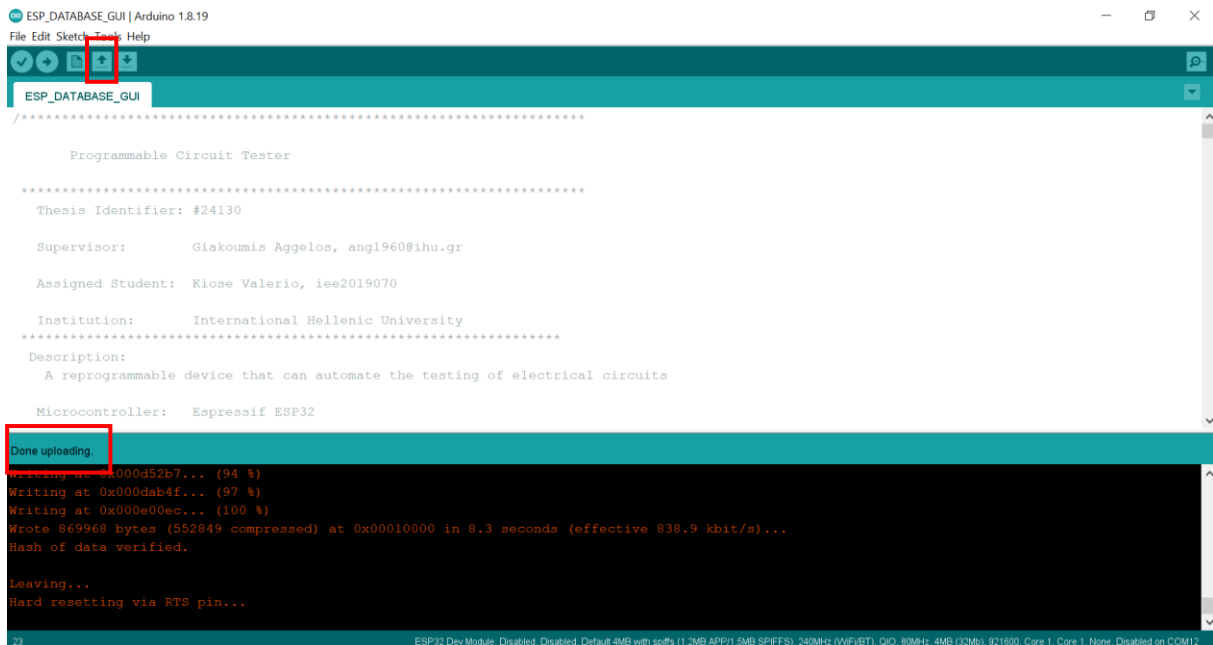
Κεφάλαιο 7ο: Προγραμματισμός και Δοκιμή Συσκευής

7.1 Εισαγωγή

Με την ολοκλήρωση της κατασκευαστικής διαδικασίας και της ανάπτυξης του λογισμικού, το τελικό στάδιο της εργασίας αφορά τον προγραμματισμό της συσκευής και την αξιολόγηση της λειτουργίας της υπό πραγματικές συνθήκες χρήσης. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η διαδικασία παραμετροποίησης της συσκευής μέσω της γραφικής διεπαφής, η επαλήθευση της λειτουργικότητας των επιμέρους υποσυστημάτων και η αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος μέτρησης.

7.2 Μεταφόρτωση Προγράμματος στο ESP32

Η συσκευή είναι έτοιμη για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή, χρησιμοποιώντας ένα καλώδιο USB η πλακέτα συνδέεται με τον υπολογιστή και μέσω του Arduino IDE μεταφορτώνονται τα αρχεία HTML, CSS, JavaScript και το πρόγραμμα του ESP32.



Εικόνα 7-1 Μεταφόρτωση του προγράμματος στο ESP32

7.3 Δοκιμή Συσκευής

Για την δοκιμή της συσκευής είναι απαραίτητη η δημιουργία μιας δοκιμαστικής ρουτίνας μέσω της γραφικής διεπαφής που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 6. Η διαδικασία ακολουθεί τα εξής βήματα:

Ορίζεται στους ακροδέκτες που θα χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκεια του αυτοματοποιημένου ελέγχου το αναμενόμενο εύρος τάσης.

Testpoint margins and Test identification		
Probe	Minimum Voltage	Maximum Voltage
P 01	4.8	5.2
P 02	4.8	5.2
P 03	4.8	5.2
P 04	2.8	3.6
P 05	4.8	5.2

Εικόνα 7-2 Ορισμός εύρους τάσης στους ακροδέκτες υπό χρήση
Εισάγεται ο συριακός αριθμός του κυκλώματος υπό έλεγχο και η εντολή εργασίας

TEST_TRY_033	Wor202601EE001	Reset Table
--------------	----------------	-------------

Εικόνα 7-3 Εισαγωγή συριακού αριθμού και εντολής εργασίας στα ανάλογα πεδία
Μέσω του χτιστή κανόνων δημιουργείται ένας λογικός κανόνας που συσχετίζει συγκεκριμένα σφάλματα μέτρησης με πιθανό πρόβλημα του κυκλώματος.

IF P 05 FAILED AND P 01 PASSED PRINT Open circuit in junction 13.

Εικόνα 7-4 Δημιουργία κανόνα

7.3.1 Λειτουργική Επαλήθευση του Συστήματος

Πολυπλέκτες

Με το πάτημα του κουμπιού εκκίνησης, η συσκευή εκτελεί διαδοχικά μετρήσεις σε όλους τους προγραμματισμένους ακροδέκτες και ο πολυπλέκτης μεταβαίνει σωστά από κανάλι σε κανάλι, όπως επιβεβαιώνεται από τις μετρήσεις.

Testpoint margins and Test identification					Test execution and Status	
Probe	Minimum Voltage	Maximum Voltage	Measured	Result	Run Test	Test complete
P 01	4.8	5.2	4.829 V	PASS		
P 02	4.8	5.2	4.818 V	PASS		
P 03	4.8	5.2	4.821 V	PASS		
P 04	2.8	3.6	3.211 V	PASS		
P 05	4.8	5.2	4.825 V	PASS		

Test results	
Test Result:	TEST PASSED
Diagnostic messages:	

Εικόνα 7-5 Αποτέλεσμα μετρήσεων μέσω αυτόματης εναλλαγής καναλιού εισόδου

Επικοινωνία Μεταξύ Client – Server

Η επικοινωνία μεταξύ Client – Server μέσω των Web Socket λειτουργεί αξιόπιστα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων εμφανίζονται σε πραγματικό χρόνο στον πίνακα μετρήσεων της διεπαφής, με ορθή ένδειξη FAIL/PASS για κάθε μέτρηση βάσει των ορισμένων ορίων.

Measured	Result
N/A	N/A
N/A	N/A
N/A	N/A
N/A	N/A
N/A	N/A

Εικόνα 7-6 Πίνακας χωρίς δεδομένα



Measured	Result
4.829 V	PASS
4.818 V	PASS
4.821 V	PASS
3.211 V	PASS
4.825 V	PASS

Εικόνα 7-7 Εμπλουτισμός πίνακα μέσω Web Socket

Αποθήκευση στη Βάση Δεδομένων

Κάθε μέτρηση καταγράφεται επιτυχώς στη βάση δεδομένων με τα σωστά πεδία.

```

1 SELECT * FROM test_results_history;
    
```

#	id	serial_number	work_order	probe	voltage	min_voltage	max_voltage	testpoint_result	diagnostic_message	created_at
1713	1,713	TEST_TRY_0...	Wor20260...	1	4.829	4.8	5.2	1	Test Result:TEST PASSEDDia...	2026-01-23 01:50:34
1714	1,714	TEST_TRY_0...	Wor20260...	2	4.818	4.8	5.2	1	Test Result:TEST PASSEDDia...	2026-01-23 01:50:34
1715	1,715	TEST_TRY_0...	Wor20260...	3	4.821	4.8	5.2	1	Test Result:TEST PASSEDDia...	2026-01-23 01:50:34
1716	1,716	TEST_TRY_0...	Wor20260...	4	3.211	2.8	3.6	1	Test Result:TEST PASSEDDia...	2026-01-23 01:50:34
1717	1,717	TEST_TRY_0...	Wor20260...	5	4.825	4.8	5.2	1	Test Result:TEST PASSEDDia...	2026-01-23 01:50:34

Εικόνα 7-8 Καταγραφές στην βάση δεδομένων

Αξιολόγηση Κανόνων

Τέλος, το σύστημα αξιολόγησης των κανόνων αναγνωρίζει σωστά πότε οι συνθήκες των κανόνων πληρούνται και εμφανίζει τα αντίστοιχα διαγνωστικά μηνύματα στον χρήστη.

Testpoint margins and Test identification					Test execution and Status	
Probe	Minimum Voltage	Maximum Voltage	Measured	Result	Run Test	Test complete
P 01	4.8	5.2	4.821 V	PASS		
P 02	4.8	5.2	4.828 V	PASS		
P 03	4.8	5.2	4.823 V	PASS		
P 04	2.8	3.6	3.336 V	PASS		
P 05	4.8	5.2	-0.011 V	FAIL		

Test results
Test Result: TEST FAILED
Diagnostic messages: Rule 1: UNIT FAILURE — "Open circuit in junction 13."

Εικόνα 7-9 Αποτέλεσμα με εμφάνιση μηνύματος από ενεργοποιημένο κανόνα

7.3.2 Απόδοση του Συστήματος Μέτρησης

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών με διαφορετικά κυκλώματα παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφοροποιήσεις στην απόδοση του συστήματος. Συγκεκριμένα, σε μετρήσεις τάσεων από πηγές χαμηλής αντίστασης εξόδου (output impedance) όπως τροφοδοτικά ή voltage regulators παρουσιάζεται αποδεκτή συμπεριφορά, οι μετρήσεις είναι σταθερές και επαναλήψιμες επιτρέποντας τον έλεγχο του κυκλώματος βάσει των ορίων. Ωστόσο, κατά τη μέτρηση κόμβων με υψηλότερη αντίσταση όπως διαιρέτες τάσης και ορισμένες εξοδοί ενσωματωμένων κυκλωμάτων, παρατηρήθηκαν αποκλίσεις από τις αναμενόμενες τιμές. Οι μετρήσεις παρουσίαζαν μεγάλη διακύμανση ανάλογα με τον τύπο του κυκλώματος που ελέγχονταν, καθιστώντας αδύνατη την αξιόπιστη αξιολόγηση της κατάστασης του κυκλώματος. Η αιτία του προβλήματος εντοπίζεται στην αντίσταση εισόδου του υποσυστήματος μέτρησης. Όταν το σήμα περνά μέσα από τους πολυπλέκτες το πρώτο πράγμα που συναντά είναι ο διαιρέτης τάσης, σε ένα ιδανικό σενάριο η μέτρηση δεν θα επηρεάζονταν από τον διαιρέτη τάσης και

όντως σε κάποιες περιπτώσεις δεν επηρεάζεται, όμως όπως αναφέρθηκε στο 2^ο κεφάλαιο για τα πρώτα όργανα μέτρησης, όταν η αντίσταση εισόδου του οργάνου είναι μικρή, αλλοιώνεται η συμπεριφορά του κυκλώματος υπό μέτρηση καθώς η παράλληλη σύνδεση της αντίστασης μειώνει την ισοδύναμη αντίσταση του κυκλώματος.

Η λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η απομόνωση του διαιρετή τάσης από το κύκλωμα υπό έλεγχο, ώστε το πρώτο πράγμα που να συναντάται μετά τους πολυπλέκτες να είναι μια μεγάλη αντίσταση που δεν θα συμβάλει στην μείωση της ισοδύναμης αντίστασης του κυκλώματος υπό έλεγχο.

7.4 Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Βελτίωση

Η συσκευή που αναπτύχθηκε λειτουργεί ως αυτοματοποιημένο σύστημα ελέγχου κυκλωμάτων, επιτυγχάνοντας εξοικονόμηση χρόνου μέσω της διαδοχικής μέτρησης πολλαπλών κόμβων χωρίς την ανάγκη ιδιαίτερων δεξιοτήτων από τον χρήστη. Η γραφική διεπαφή επιτρέπει την εύκολη δημιουργία δοκιμαστικών ρουτίνων, ενώ η αποθήκευση των αποτελεσμάτων παρέχει πλήρη ιχνηλασιμότητα των αποτελεσμάτων. Δυστυχώς το εύρος πρακτικής εφαρμογής περιορίζεται λόγω των προβλημάτων ακρίβειας που προκύπτουν από την φόρτωση των κυκλωμάτων υπό έλεγχο, όμως με κάποιες τεχνικές βελτιώσεις η λειτουργικότητα του συστήματος μπορεί να επεκταθεί στο μέλλον.

Η κρισιμότερη τεχνική βελτίωση είναι η προσθήκη ενός σταδίου απομόνωσης μεταξύ των πολυπλεκτών και του διαιρέτη τάσης. Ένας τελεστικός ενισχυτής σε διάταξη ακολούθου τάσης θα έλυνε το πρόβλημα της φόρτωσης των κυκλωμάτων υπό έλεγχο λόγω της μεγάλης αντίστασης εισόδου του. Αυτή η τροποποίηση απαιτεί επανασχεδιασμό του τυπωμένου κυκλώματος και αποτελεί προτεραιότητα για οποιαδήποτε μελλοντική έκδοση.

Ακόμη μια βελτίωση που θα μειώνει σημαντικά τον χρόνο προετοιμασίας για ένα έλεγχο, είναι η προσθήκη δυνατότητας αποθήκευσης των ρυθμίσεων και κανόνων που έχει εισάγει ο χρήστης. Αυτό θα επέτρεπε την άμεση εναλλαγή μεταξύ διαφορετικών ρουτινών ελέγχου ή τον διαμοιρασμό αυτών μεταξύ πολλαπλών συσκευών. Προετοιμασία μιας ρουτίνας, λειτουργία άπειρων συσκευών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] J. Al-Khalili, “The birth of the electric machines: A commentary on Faraday (1832) ‘Experimental researches in electricity’,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 373, 2015.
- [2] Britannica, “Foundations of electrochemistry and electrodynamics,” *Britannica*, 2025. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/electromagnetism/Foundations-of-electrochemistry-and-electrodynamics>
- [3] M. Faraday, “Experimental researches in electricity,” *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 1831–1838. Digital Library of India, 1839.
- [4] Wikipedia, “Timeline of electrical and electronic engineering,” *Wikipedia*, 2025. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Timeline_of_electrical_and_electronic_engineering
- [5] R. Forrester, “History of electricity,” *SSRN Electronic Journal*, Nov. 10, 2016.
- [6] IEEE Circuits and Systems Society, *Circuits and Systems: A Short History*. IEEE CAS, 2022.
- [7] Wikipedia, “Relay,” *Wikipedia*, 2025. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Relay>
- [8] Britannica, “Sir John Ambrose Fleming,” *Britannica*, 2025. [Online]. Available:

<https://www.britannica.com/biography/John-Ambrose-Fleming>

[9] J. S. Kilby, “Invention of the integrated circuit,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. ED-23, no. 7, pp. 648–654, July 1976.

[10] Britannica, “Jack Kilby,” *Britannica*, 2025. [Online]. Available:

<https://www.britannica.com/biography/Jack-Kilby>

[11] A. Hanson, “Laminated conductors on insulating board,” U.S. Patent 782,391A, 1904.

[12] Keysight Technologies, “In-circuit test systems.” *Keysight Technologies* [Online]. Available:

<https://www.keysight.com/us/en/pdproducts/in-circuit-test-systems.html>

[13] Keysight Technologies, “How in-circuit tests ensure PCBA quality and reliability,” *Keysight Blogs*, May 14, 2024. [Online]. Available: <https://www.keysight.com/blogs/en/tech/educ/2024/in-circuit-test>

[14] S. D. Millman, “Improving quality: Yield versus test coverage,” in *Economics of Electronic Design, Manufacture and Test*, M. Abadir and T. Ambler, Eds. Boston, MA, USA: Springer, 1994, pp. 243–256.

[15] C. F. Coombs, Jr., Ed., *Printed Circuits Handbook*, 6th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2007.

[17] Hewlett-Packard Company, “A practical interface system for electronic instruments,” *Hewlett-Packard Journal*, Oct. 1972.

[18] IEEE, “IEEE Standard Digital Interface for Programmable Instrumentation,” Standard 488-1975, New York, USA, 1975.

[19] NetScope, “Επίσημη Προσφορά & Τεχνικό Φυλλάδιο Προϊόντων”, Βόλος, Ελλάδα, 2025.

[20] National Instruments, “Stand-Alone Data Acquisition Devices”, National Instruments DAQ Brochure, 2026. [Online]. Available: <https://www.ni.com/en/shop/data-acquisition/entry-level-usb-daq.html>

Βιβλιογραφία Εικόνων

[21] Science Museum Group, “Voltaic pile by Newton & Co”, . [Online]. Available: <https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co136567/voltaic-pile-by-newton-co>

[22] R. Beckers, “How to find happiness with LiFePO4 (Lithium-Ion) Batteries”, *Solicity Inc.*, 2015. [Online]. Available: <https://www.solacity.com/how-to-keep-lifepo4-lithium-ion-batteries-happy/>

[23] Taylor & Francis Group, “Principles and Applications”, *CRC PRESS*, 2005. [Online]. Available: https://www.gurevich-publications.com/books/electric_relays.html

[24] Wikipedia, “Relay”, Wikipedia, . [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Relay>

[25] Wikipedia, “Fleming Valve”, Wikipedia, 1904. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Fleming_valve

[26] Wikipedia, “Triode Audion”, Wikipedia, 1908. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Audion>

[27] Compute History Museum, “Inventing the Transistor”, *Compute History Museum*, 1947. [Online]. Available: <https://www.computerhistory.org/revolution/digital-logic/12/273>

[28] Chip History Center, “First Monolithic Silicon IC Chip”, *Chip History Center*, 1955. [Online]. Available: <https://www.chiphistory.org/monolithic-silicon-first-ic-chip>

- [29] Science & Society Picture Library, “First working device to use a printed circuit board”, *Science & Society Picture Library*, 1942. [Online]. Available: <https://www.gettyimages.ae/detail/news-photo/this-radio-was-the-first-working-device-to-use-a-printed-news-photo/90761581>
- [30] V. Guy, “Point-to-point wiring done right...”, *diyaudio*, 2011. [Online]. Available: <https://www.diyaudio.com/community/threads/point-to-point-wiring-done-right.194520/>
- [31] PCBPowerIndia, “Flexible PCB Manufacturing Process - How Flex PCBs Are Manufactured”, *LinkedIn*, 2025. [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/flexible-pcb-manufacturing-process-how-flex-pog0f>
- [31] E. Schlaepfen, W. H. Oskay, “Open Circuits”, San Fransisco, No Starch Press, 2023.
- [32] Wikipedia, “Point to point consruction in electronic circuits”, *Wikipedia*, 1948. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Point-to-point_construction
- [33] Arshon, “Electrical circuit measuring”, *Arshon*, 2024. [Online]. Available: <https://arshon.com/blog/wp-content/uploads/2024/11/Screenshot-2024-11-07-165106.jpg>
- [34] Tecnova, “Functional testing via bed of nails method”, *Tecnova*, 2025. [Online]. Available: <https://www.tecnova.com/wp-content/uploads/2024/12/Functional-Bed-of-Nails-Test.png.webp>
- [35] B. Cockfield, “PCB testing on a bed of nails”, *Hackaday*, 2019. [Online]. Available: <https://hackaday.com/2019/02/09/test-pcbs-on-a-bed-of-nails/>
- [36] C. Lott, “Have fun usin IEEE-488”, *Hackaday*, 2022. [Online]. Available: <https://hackaday.com/2022/01/31/save-money-and-have-fun-using-ieee-488/>
- [37] Exapro, “KEYSIGHT I3070 Test and rework machine”, *Exapro*, 2020. [Online]. Available: <https://www.exapro.com/keysight-i3070-p250415192/>
- [38] Teradyne, “TestStation”, *Teradyne*, 2025. [Online]. Available: <https://www.teradyne.com/ja/teststation-lh/>
- [39] Keysight, “TP-5000 Functional Test System”, *Keysight*, 2025. [Online]. Available: <https://www.keysight.com/us/en/product/E2230B/functional-test-system.html>
- [40] Plantautomation, “Spectrum-9000”, *Plantautomation*, [Online]. Available: <https://www.plantautomation-technology.com/products/teradyne-inc/spectrum-9100>
- [41] B. Mihai, “The NI USB 6008”, *Researchgate*, 2017. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/The-NI-USB-6008-multifunction-I-O-device-This-paper-aims-to-create-a-virtual-instrument_fig2_320852772
- [42] QQTrading, “ESP32-DevKitCVE”, *QQTrading*, 2025. [Online]. Available: <https://qqtrading.com.my/ESP32-WROVER-E-WiFi-Bluetooth-DevBoard>
- [43] Texas Instruments, “Ultra-Small, Low-Power, 16-Bit Analog-to-Digital Converter with Internal Reference”, ADS1115 datasheet, 2009.
- [44] Texas Instruments, “LM4051-N Precision Micropower Shunt Voltage Reference”, LM4051-N datasheet, 2018.
- [45] Texas Instruments, “OPAx387 Ultra-High Precision, Zero-Drift, Low-Input-Bias-Current Op Amps”, OPA387 datasheet, 2023.

[46] Texas Instruments, “TXS0102 2-Bit Bidirectional Voltage-Level Translator for Open-Drain and Push-Pull Applications”, TXS0102 datasheet, 2023.

[47] Renesas, “Super Voltage Converters”, ICL7660S datasheet, 2020.

[48] Texas Instruments, “TMUX405x-Q1 Automotive 24-V, 8:1, 1-Channel, and 4:1, 2-Channel Multiplexers with 1.8-V Logic”, TMUX4051-Q1 datasheet, 2023.

[49] Texas Instruments, “TLV761 16-V, 1-A, Fixed Output Linear Voltage Regulator”, TLV761 datasheet, 2023.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Συνολικό Κόστος Συσκευής

Κόστος ηλεκτρονικών στοιχείων από Mouser: 43€

Κόστος τυπωμένου κυκλώματος από JLCPCB: 12€

Συνολικό κόστος συσκευής: 55€

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Πρόγραμμα ESP32

```
/*
*****

  Programmable Circuit Tester

*****

  Thesis Identifier: #24130

  Supervisor:      Giakoumis Aggelos, ang1960@ihu.gr

  Assigned Student: Kiose Valerio, iee2019070

  Institution:     International Hellenic University
*****

  Description:
  A reprogrammable device that can automate the testing of electrical
  circuits

  Microcontroller: Espressif ESP32

  Compiler:        Arduino IDE

  Notes:
*****/

#include <WiFi.h>           // WiFi connection
#include <AsyncTCP.h>       // Asynchronous TCP Library required by
ESPAsyncWebServer.h
#include <HTTPClient.h>     // Communication with the SQL server
```

```

#include <ESPAsyncWebServer.h> // Asynchronous Webserver Creation
#include <WebSocketsServer.h> // Communication between client and server
through Websockets
#include <ArduinoJson.h> // JSON encapsulation
#include <FS.h> // File system library required by SPIFFS.h
#include <SPIFFS.h> // Access to onboard flash memory for file
storage (SPIFFS)
#include <Wire.h> // Base library used by the I2C communication
protocol
#include <ADS1115.h> // ADC Library

using namespace ADS1115;

ADS1115_ADC adc(I2CAddress::Gnd);

float measured_values[16]; //Here we store the voltage measurements for
each of the 16 measuring probes

const int TMUX1_A0 = 26; // Multiplexer 1 control pins
const int TMUX1_A1 = 33;
const int TMUX1_A2 = 32;
const int TMUX1_EN = 25;

const int TMUX2_A0 = 14; // Multiplexer 2 control pins
const int TMUX2_A1 = 13;
const int TMUX2_A2 = 12;
const int TMUX2_EN = 27;

// SSID and password of Wifi connection:
const char* ssid = "";
const char* password = "";

AsyncWebServer server(80); // Initialization of webserver at port 80 and
websocket at port 81
WebSocketsServer webSocket = WebSocketsServer(81);

void setup() {
  pinMode(TMUX1_A0, OUTPUT);
  pinMode(TMUX1_A1, OUTPUT);
  pinMode(TMUX1_A2, OUTPUT);
  pinMode(TMUX2_A0, OUTPUT);
  pinMode(TMUX2_A1, OUTPUT);
  pinMode(TMUX2_A2, OUTPUT);
  pinMode(TMUX1_EN, OUTPUT);
  pinMode(TMUX2_EN, OUTPUT);

  Serial.begin(115200);

  Wire.begin();

```

```

setupADC(); //Analog to Digital Converter set up

if (!SPIFFS.begin()) { // Check if SPIFFS is initialized
  Serial.println("SPIFFS could not initialize");
}

connectWiFi(); // Connect to WiFi

// Route to Load main.html file
server.on("/", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest * request) {
  request->send(SPIFFS, "/main.html", "text/html");
});

// Show 404 error if main.html is not found
server.onNotFound([](AsyncWebServerRequest * request) {
  request->send(404, "text/plain", "File not found");
});

// Route to Load style.css file
server.on("/style.css", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest * request) {
  request->send(SPIFFS, "/style.css", "text/css");
});

// Show 404 error if style.css is not found
server.onNotFound([](AsyncWebServerRequest * request) {
  request->send(404, "text/plain", "File not found");
});

// Route to Load script.js file
server.on("/script.js", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest * request) {
  request->send(SPIFFS, "/script.js", "text/javascript");
});

// Show 404 error if script.js is not found
server.onNotFound([](AsyncWebServerRequest * request) {
  request->send(404, "text/plain", "File not found");
});

server.serveStatic("/", SPIFFS, "/");

websocket.begin();
websocket.onEvent(websocketEvent);
server.begin();
}

void loop() {
  websocket.loop();
}

/*****
websocketEvent()
-When a web socket event is received, websocketEvent() checks what the

```

client is doing and acts accordingly, the client can either be connected, disconnected and or sending data to the server.

-Parameters:

num: id of the client who send the event,

type: type of message,

payload: actual data sent,

length: Length of payload

```
*****/
void websocketEvent(byte num, WStype_t type, uint8_t * payload, size_t length)
{
  switch (type) {
    case WStype_DISCONNECTED:
      Serial.println("Client disconnected");
      break;

    case WStype_CONNECTED:
      Serial.println("Client connected");
      break;

    case WStype_TEXT:
      if (strncmp((char*)payload, "start_test", 10) == 0) {
        muxMeasurement();
        sendJson();
      }
      break;
  }
}

/*****
  sendJson()
  -Sends ADC reading information to web clients.
*****/
void sendJson() {
  StaticJsonDocument<512> doc; // enough space for 16 float values

  JsonArray values = doc.createNestedArray("measured_values");
  for (uint8_t i = 0; i < 16; i++) {
    values.add(measured_values[i]);
  }

  String jsonString;
  serializeJson(doc, jsonString);

  websocket.broadcastTXT(jsonString);

  Serial.println("Sent measured_values to client:");
  Serial.println(jsonString);
}
```

```

/*****
    connectWiFi()
    -Uses the variables [ssid] and [password] to establish a wifi connection.
*****/
void connectWiFi() {
    WiFi.begin(ssid, password);
    Serial.println("Establishing connection to WiFi with SSID: " +
String(ssid));
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(1000);
        Serial.print(".");
    }
    Serial.print("Connected to network with IP address: ");
    Serial.println(WiFi.localIP());
}

/*****
    singleMeasurement()
    -Saves a single measurement from the ADS1115 ADC and converts the raw
    value to a voltage that is human readable.
*****/
float singleMeasurement() {
    float voltage = NAN;
    int16_t raw;
    Status status;

    status = adc.startSingleShotConversion(0);
    if (status != Status::Ok) {
        Serial.println("ERROR: startSingleShotConversion failed");
        return NAN;
    }

    status = adc.readConversion(raw);
    if (status != Status::Ok) {
        Serial.println("ERROR: readConversion failed");
        return NAN;
    }

    voltage = (adc.convertToVoltage(raw)-2)*6;
    return voltage;
}

/*****
    averagedMeasurement()
    -Makes 16 measurements and gives the average
*****/
float averagedMeasurement(uint8_t numSamples = 16) {
    if (numSamples < 1) {
        Serial.println("ERROR: numSamples must be at least 1");
    }
}

```

```

    return NAN;
}

float sum = 0;
uint8_t validCount = 0;

for (int i = 0; i < numSamples; i++) {
    float voltage = singleMeasurement();

    if (!isnan(voltage)) {
        sum += voltage;
        validCount++;
    }

    delayMicroseconds(50);
}

if (validCount == 0) {
    Serial.println("ERROR: No valid samples");
    return NAN;
}

return sum / validCount;
}

/*****
muxMeasurement()
  -Cycles between all of the 16 multiplexer pins so the ADC can measure
  all the test points of the unit under test.
*****/
void muxMeasurement(){
    for (uint8_t i = 0; i < 8; i++) {
        enableTMUX(1, true);
        enableTMUX(2, false);
        selectTMUXChannel(1, i);
        delay(50);
        measured_values[i] = averagedMeasurement();
    }

    for (uint8_t i = 0; i < 8; i++) {
        enableTMUX(1, false);
        enableTMUX(2, true);
        selectTMUXChannel(2, i);
        delay(50);
        measured_values[i + 8] = averagedMeasurement();
    }

    enableTMUX(1, false);
    enableTMUX(2, false);

```

```

}

/*****
selectTMUXChannel()
  -Cycles between all of the 16 multiplexer pins so the ADC can measure
  all the test points of the unit under test.
  -Parameters:
  muxNum: sets either multiplexer 1 or multiplexer 2,
  channel: sets which channel of the multiplexer to measure from
*****/
void selectTMUXChannel(uint8_t muxNum, uint8_t channel) {
  bool b0 = channel & 0x01;
  bool b1 = (channel >> 1) & 0x01;
  bool b2 = (channel >> 2) & 0x01;

  if (muxNum == 1) {
    digitalWrite(TMUX1_A0, b0);
    digitalWrite(TMUX1_A1, b1);
    digitalWrite(TMUX1_A2, b2);
  } else {
    digitalWrite(TMUX2_A0, b0);
    digitalWrite(TMUX2_A1, b1);
    digitalWrite(TMUX2_A2, b2);
  }
}

/*****
enableTMUX()
  -Controls the state of the multiplexers between enabled or disabled since
  only one multiplexer can be enabled at a time because of signals mixing.
  -Parameters:
  muxNum: sets either multiplexer 1 or multiplexer 2,
  enable: sets the multiplexers to enabled or disabled states
*****/
void enableTMUX(uint8_t muxNum, bool enable) {
  if (muxNum == 1)
    digitalWrite(TMUX1_EN, enable ? LOW : HIGH);
  else
    digitalWrite(TMUX2_EN, enable ? LOW : HIGH);
}

/*****
setupADC()
  Set the initial settings for the ADS1115 analog to digital converter.
*****/
void setupADC(){
  delay(50);
  if (!adc.isConnected()) {
    Serial.println("ERROR: ADS1115 not connected!");
  }
}

```

```

while (1) {
    delay(1000);
    Serial.println("Waiting for ADS1115...");
}
}

Status status = adc.init();
if (status != Status::Ok) {
    Serial.print("ERROR: ADS1115 init failed, status = ");
    Serial.println((int)status);
    while (1) {
        delay(100);
        Serial.println("Retrying...");
    }
}

adc.setPga(Pga::FSR_4_096V);
adc.setDataRate(DataRate::SPS_128);
status = adc.uploadConfig();
if (status != Status::Ok) {
    Serial.print("ERROR: uploadConfig failed, status = ");
    Serial.println((int)status);
    while (1) {
        delay(100);
        Serial.println("Retrying uploadConfig...");
    }
}

Serial.println("ADS1115 ready.");
}

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: JavaScript

```

var Socket;
var table = document.getElementById("table_values");
let min_array = [];
let max_array = [];
let results_array = [];
let values_array = [];
let command_rules = [];

/*****
    init()
    -Initial settings about websockets.
*****/
function init() {
    Socket = new WebSocket('ws://' + window.location.hostname + ':81/');

```

```

Socket.onmessage = function(event) {
    processMessage(event);
};

Socket.onerror = function(error) {
    console.error('WebSocket error:', error);
};

Socket.onclose = function() {
    console.log('WebSocket disconnected, attempting reconnect...');
    setTimeout(init, 2000);
};
}

/*****
runTest()
-Clears any previous Status messages and starts the test by signaling
the microcontroller
*****/
function runTest() {
    const statusDiv = document.querySelector('#rule-print div:nth-child(2)');
    const resultsDiv = document.querySelector('#rule-print div:nth-child(4)');

    resultsDiv.innerHTML = "";
    statusDiv.innerHTML = `

```

```

var message = JSON.parse(event.data);
console.log("Received message:", message);

if (!message.measured_values || !Array.isArray(message.measured_values)) {
    console.error("Invalid JSON structure:", message);
    return;
}

var measurements = message.measured_values;

for (let i = 0; i < measurements.length && i < 16; i++) {
    processTestPoint(i, measurements[i]);
}

ruleCheck();
finalizeTestUI();
sendTestResultsToDB();
} catch (error) {
    console.error("Error processing message:", error);
}
}

/*****
processTestPoint()
- Checks if the voltages measured for each test point comply with the
minimum and maximum ranges, after that it updates the graphical interface
so the user can see the results.
- Parameters:
index: Holds a value for every device probe, we have 16 probes so the
index is from 0 up to 15
voltage: measured voltage value at each device probe
*****/
function processTestPoint(index, voltage) {
    var row = table.tBodies[0].rows[index];
    if (!row) {
        console.warn(`Row ${index} not found`);
        return;
    }

    var minInput = row.cells[1].querySelector('input');
    var maxInput = row.cells[2].querySelector('input');

    if (!minInput || !maxInput) {
        console.warn(`Missing inputs for row ${index}`);
        return;
    }
}

```

```

var min = parseFloat(minInput.value) || -12;
var max = parseFloat(maxInput.value) || 12;

values_array[index] = voltage;
min_array[index] = min;
max_array[index] = max;

var result = (voltage >= min && voltage <= max) ? 1 : 0;
results_array[index] = result;

updateTestPointUI(index, voltage, result);
}

/*****
updateTestPointUI()
- Updates the graphical interface so the user can visualise whats going
on.
- Parameters:
index: Holds a value for every device probe, we have 16 probes so the
index is from 0 up to 15
voltage: measured voltage value at each device probe
result: 1 for pass, 0 for fail
*****/
function updateTestPointUI(index, voltage, result) {
    var row = table.tBodies[0].rows[index];
    if (!row) return;

    row.cells[3].textContent = voltage.toFixed(3) + " V";
    var resultCell = row.cells[4];
    resultCell.textContent = result ? "PASS" : "FAIL";
    resultCell.className = result ? "passed" : "failed";
}

/*****
appendCard()
-Appends a graphical list of the rules the user inserted in the device,
every
rule lives inside a HTML card.
-Parameters:
event: Holds info about who called processMessage and for what reason.
*****/
function appendCard(event){
    var parentDiv = event.target.parentNode;
    var newDropdown1 = document.createElement("select");
    var newDropdown2 = document.createElement("select");
    var newDropdown3 = document.createElement("select");
    var lastDiv = parentDiv.lastElementChild;
    newDropdown1.innerHTML = `

```

```

    <select>
      <option value="and">AND</option>
      <option value="or">OR</option>
    </select>
  `;
  newDropdown2.innerHTML = `
    <select>
      <option value="0">P 01</option>
      <option value="1">P 02</option>
      <option value="2">P 03</option>
      <option value="3">P 04</option>
      <option value="4">P 05</option>
      <option value="5">P 06</option>
      <option value="6">P 07</option>
      <option value="7">P 08</option>
      <option value="8">P 09</option>
      <option value="9">P 10</option>
      <option value="10">P 11</option>
      <option value="11">P 12</option>
      <option value="12">P 13</option>
      <option value="13">P 14</option>
      <option value="14">P 15</option>
      <option value="15">P 16</option>
    </select>
  `;

  newDropdown3.innerHTML = `
    <select>
      <option value="<">LESS THAN MIN</option>
      <option value=">">MORE THAN MAX</option>
      <option value="f">FAILED</option>
      <option value="p">PASSED</option>
    </select>
  `;

  parentDiv.insertBefore(newDropdown1, lastDiv);
  parentDiv.insertBefore(newDropdown2, lastDiv);
  parentDiv.insertBefore(newDropdown3, lastDiv);
}

/*****
  addRule()
  -Parses the graphical rules the user inserted and converts them to rules
  the device can run and compute.
  -Parameters:
  event: Holds info about who called processMessage and for what reason.
  *****/
function addRule(event){
  var string_command = "if(";

```

```

var parentDiv = event.target.parentNode;
var selects = parentDiv.querySelectorAll('select');
for (var i = 0; i < selects.length; i++){
  switch (selects[i].value){
    case "<":
      string_command += ("<" + "min_array[" + selects[i-1].value + "]");
      break;
    case ">":
      string_command += (">" + "max_array[" + selects[i-1].value + "]");
      break;
    case "f":
      string_command += ('==0');
      break;
    case "p":
      string_command += ('==1');
      break;
    case "or":
      string_command += ("||");
      break;
    case "and":
      string_command += ("&&");
      break;
    default:
      if (selects[i+1].value == "f" || selects[i+1].value == "p"){
        string_command += "results_array[" + selects[i].value + "]";
      }else{
        string_command += "values_array[" + selects[i].value + "]";
      }
      break;
  }
}

string_command += ")rulePrint('" + parentDiv.querySelector('textarea').value
+ "')";

command_rules.push(string_command);

const template = document.getElementById('rule-card');
const ruleHolder = document.getElementById('rule-div');

const inputs = template.querySelectorAll('input, select, textarea');

let textContent = 'IF ';

inputs.forEach(el => {
  let label = '';
  if (el.id) {
    const foundLabel = template.querySelector(`label[for="${el.id}"]`);
    if (foundLabel) label = foundLabel.textContent.trim() + ': ';
  }

```

```

    }

    if (el.tagName === 'SELECT') {
        textContent += `${label}${el.options[el.selectedIndex].text}\n`;
    } else if (el.tagName === 'TEXTAREA' || el.tagName === 'INPUT') {
        textContent += `PRINT ${label}${el.value}\n`;
    }
}
});

const newRule = document.createElement('div');
newRule.classList.add('card');
newRule.textContent = textContent.trim();

const deleteButton = document.createElement('button');
deleteButton.textContent = 'Delete';
deleteButton.className = 'add_TP';
deleteButton.onclick = () => newRule.remove();
newRule.appendChild(deleteButton);

ruleHolder.appendChild(newRule);
}

/*****
ruleCheck()
  -Runs tests on all the user inserted rules after measurements are taken,
  after that it graphically displays the output to the user along with the
  user inserted diagnostic message of said rule.
*****/
function ruleCheck() {
    const resultsDiv = document.querySelector('#rule-print div:nth-child(4)');
    resultsDiv.innerHTML = "";

    let anyFail = results_array.includes(0);
    resultsDiv.innerHTML += `Test Result:  
`;
    resultsDiv.innerHTML += anyFail
        ? `TEST FAILED  
  
`
        : `TEST PASSED  
  
`;

    resultsDiv.innerHTML += `Diagnostic messages:  
`;

    for (let i = 0; i < command_rules.length; i++) {
        try {
            let ruleStr = command_rules[i];

            let conditionMatch = ruleStr.match(/if\s*\(\(.*\)\)/);
            let condition = conditionMatch ? conditionMatch[1] : null;

            let messageMatch = ruleStr.match(/rulePrint\(['`](.*?)['`]\)/);
            let message = messageMatch ? messageMatch[1] : "";

```

```

    let rulePassed = false;
    if (condition) {
        rulePassed = eval(condition);
    }

    if (rulePassed) {
        resultsDiv.innerHTML += `

Rule ${i + 1}: Rule ${i + 1}:



81


```

```

const resultsDiv = document.querySelector('#rule-print div:nth-child(4)');
const diagnostic_message = resultsDiv.innerText;
let probes = [];

for (let i = 0; i < values_array.length; i++) {
  probes.push({
    probe: i + 1,
    voltage: values_array[i],
    min: min_array[i],
    max: max_array[i],
    result: results_array[i]
  });
}

fetch('http://192.168.1.120/thesis/test_data.php', {
  method: 'POST',
  headers: {'Content-Type': 'application/json'},
  body: JSON.stringify({
    serial_number: sn,
    work_order: wo,
    diagnostic_message: diagnostic_message,
    probes: probes})
})
.then(response => response.json())
.then(data => {
  if (data.success) {
    console.log('Test results saved successfully!');
  } else {
    console.error('Error saving test results:', data.error);
  }
})
.catch(err => console.error('Fetch error:', err));
}

/*****
getRuleCardTemplate()
  -A black state of a rule card so we can reset back to it.
*****/
function getRuleCardTemplate() {
  return `
<div class="inline-block">
  <button>IF</button>
</div>
<div class="inline-block">
  <select>
    <option value="0">P 01</option>
    <option value="1">P 02</option>
    <option value="2">P 03</option>
    <option value="3">P 04</option>
  </select>

```

```

    <option value="4">P 05</option>
    <option value="5">P 06</option>
    <option value="6">P 07</option>
    <option value="7">P 08</option>
    <option value="8">P 09</option>
    <option value="9">P 10</option>
    <option value="10">P 11</option>
    <option value="11">P 12</option>
    <option value="12">P 13</option>
    <option value="13">P 14</option>
    <option value="14">P 15</option>
    <option value="15">P 16</option>
</select>
<select>
    <option value="<">LESS THAN MIN</option>
    <option value=">">MORE THAN MAX</option>
    <option value="f">FAILED</option>
    <option value="p">PASSED</option>
</select>
<button class="add_TP" onclick="appendCard(event)">+</button>
</div>
<textarea class="rule_comment" placeholder=" Display message if the rule
applies" rows="1" cols="50" maxlength="50"></textarea>
<button class="add_TP" onclick="addRule(event)">Add rule</button>
<button class="add_TP" onclick="resetCard()">Reset</button>
`
;
}

/*****
resetCard()
-A function that resets the card used to make rules for insertion to
the test.
*****/
function resetCard() {
    const card = document.getElementById('rule-card');
    card.innerHTML = getRuleCardTemplate();
}

/*****
clearTable()
-A function that resets the whole table of previous minimum and maximum
entries, exists just to help the user be quick.
*****/
function clearTable() {
    const tableBody = document.getElementById("table_values").tBodies[0];
    if (!tableBody) return;

    for (let row of tableBody.rows) {
        const minInput = row.cells[1].querySelector("input");

```

```
const maxInput = row.cells[2].querySelector("input");
if (minInput) minInput.value = "";
if (maxInput) maxInput.value = "";

row.cells[3].textContent = "N/A";
const resultCell = row.cells[4];
resultCell.textContent = "N/A";
resultCell.className = "unmeasured";
}

min_array = [];
max_array = [];
values_array = [];
results_array = [];

console.log("Table cleared.");
}
window.onload = function(event) { init(); }
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: Εικόνες Gerber

