



ΔΙΕΘΝΕΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

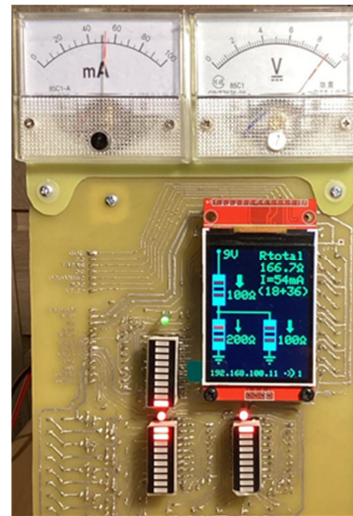
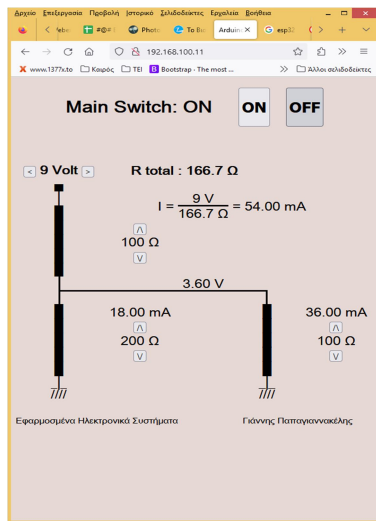
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ



ΠΜΣ «ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Υλοποίηση εργαστηρίου απλών εφαρμογών
ηλεκτροτεχνίας με πραγματικό κύκλωμα ελεγχόμενο
μέσω ιστοσελίδας»



του φοιτητή
Ιωάννη Παπαγιαννακέλη
Αρ. Μητρώου: 52019m

Επιβλέπων
Άγγελος Γιακουμής
Επίκουρος Καθηγητής

Θεσσαλονίκη, Φεβρουάριος 2024

Τίτλος Δ.Ε. Υλοποίηση εργαστηρίου απλών εφαρμογών ηλεκτροτεχνίας με πραγματικό κύκλωμα ελεγχόμενο μέσω ιστοσελίδας.

Κωδικός Δ.Ε. 22243

Όνοματεπώνυμο φοιτητή : Ιωάννης Παπαγιαννακέλης

Όνοματεπώνυμο εισηγητή : Άγγελος Γιακουμής

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. : 02-09-2022

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 17-02-2024

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 Ιωάννη Παπαγιαννακέλη που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίας 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 γυναίκα μου, Βάσω

Πρόλογος

Με την περάτωση των σπουδών μου στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα «Εφαρμοσμένα Ηλεκτρονικά Συστήματα» του τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων, ολοκληρώθηκε ένας κύκλος σπουδών σε ένα τμήμα με πολύ υψηλό επίπεδο σπουδών, άριστη φήμη στην ακαδημαϊκή κοινότητα και -κυρίως- στην αγορά εργασίας. Οι εντυπώσεις από τις σπουδές μου είναι θετικότερες και οι γνώσεις που μου προσφέρθηκαν από το εξαιρετικό προσωπικό του τμήματος μου δίνουν τα ερεθίσματα να ασχοληθώ με πλήθος συστημάτων, τόσο σε επίπεδο λογισμικού όσο και υλικού. Οι τεχνολογικές προκλήσεις της σύγχρονης εποχής, όπως και το ενδιαφέρον μου για ενσωματωμένα συστήματα και έλεγχο συστημάτων ισχύος μέσα από αυτά, είχαν σαν αποτέλεσμα να επιλέξω τη συγκεκριμένη εργασία. Δόθηκε έμφαση στη σχεδίαση, κατασκευή και ασφάλεια ενός συστήματος ελεγχόμενο μέσω ιστοσελίδας. Τα προβλήματα τα οποία αντιμετωπίστηκαν είτε με απλές τεχνικές, είτε με σημαντικές μεταβολές της αρχικής σχεδίασης, με οδήγησαν σε μια πιο ολοκληρωμένη θεώρηση τέτοιων συστημάτων.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένα σύστημα όπου ο μικροελεγκτής ESP32, ελέγχει ένα κύκλωμα τριών μεταβλητών αντιστάσεων έτσι ώστε να προσομοιώσει όλους τους συνδυασμούς συνδεσμολογίας για τη μελέτη του νόμου του Ohm. Ο έλεγχος γίνεται με αναλογικό και ψηφιακό τρόπο. Η απεικόνιση γίνεται στα αναλογικά όργανα του συστήματος, σε μια ενσωματωμένη οθόνη TFT και σε ενδείκτες στάθμης LED, ορατών μέσω μιας IP κάμερας. Ο μικροελεγκτής ελέγχεται μέσω της ιστοσελίδας, την οποία ο ίδιος φιλοξενεί. Υπάρχουν υποσυστήματα τα οποία μετατρέπουν την τάση τροφοδοσίας 12V αφενός σε τάση 3.3V για την λειτουργία του συστήματος, αφετέρου σε ρυθμιζόμενη από το χρήστη τάση για εφαρμογή στις αντιστάσεις, έτσι ώστε να του δίνεται η δυνατότητα να πειραματιστεί και να επαληθεύσει το νόμο του Ohm. Η ιστοσελίδα επιτρέπει στον χρήστη τη μεταβολή των παραμέτρων του κυκλώματος (τάση και τιμές αντιστάσεων). Το σύστημα διαθέτει μηχανισμούς προστασίας για την αποφυγή μεγάλων ρευμάτων.

Στην εργασία, αφού περιγράφεται το πρόβλημα και προτείνεται σαν λύση το συγκεκριμένο κύκλωμα, γίνεται αναλυτική περιγραφή των απαιτήσεων των επί μέρους εξαρτημάτων και επισημαίνονται τα κριτήρια επιλογής τους. Κατόπιν αναλύονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των κυκλωμάτων ελέγχου και εξηγείται η συνδεσμολογία και παραμετροποίηση των εξαρτημάτων. Ακολούθως εξηγείται το πρωτόκολλο επικοινωνίας το οποίο χρησιμοποιείται και αναλύεται η λειτουργία του προγράμματος. Στη συνέχεια επισημαίνονται οι μηχανισμοί ασφαλείας, περιγράφεται η κατασκευή και δίνονται κάποια στιγμιότυπα δοκιμών. Τέλος, δίνονται ο πλήρης κώδικας της εφαρμογής και μια μαθηματική/θεωρητική ανάλυση της τεχνικής μετατροπής παλμών σε συνεχή τάση.

«Implementation of a laboratory of simple electrical engineering applications with a real circuit controlled via a website»

Ioannis Papagiannakelis

Abstract

In this thesis, a system was designed and implemented where the ESP32 microcontroller controls a circuit of three variable resistors in order to simulate all combinations of wiring for the study of Ohm's law. The control is done in analog and digital way. The display is on the analog instruments of the system, on a built-in TFT screen and on LED level indicators, visible through an IP camera. The microcontroller is controlled through the website, which it hosts. There are subsystems that convert the 12V supply voltage on the one hand to a 3.3V voltage for system operation, on the other hand to a user-adjustable voltage to apply to the resistors, so as to enable him to experiment and verify Ohm's law. The website allows the user to change the circuit parameters (voltage and resistance values). The system has protection mechanisms to avoid large currents.

In the thesis, after the problem is described and the specific circuit is proposed as a solution, a detailed description of the requirements of the individual components is made and their selection criteria are highlighted. Then the basic operating principles of the control circuits are analyzed and the connection and parameterization of the components is explained. Next, the communication protocol used is explained and the operation of the program is analyzed. Then the safety mechanisms are highlighted, the construction is described and some test snapshots are given. Finally, the complete application code and a mathematical/theoretical analysis of the PWM-to-DC conversion technique are given.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που με βοήθησαν άμεσα ή έμμεσα στην αποπεράτωση αυτής της εργασίας.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντά μου, Επίκουρο Καθηγητή του τμήματος κ. Αγγελο Γιακουμή, πρώτα από όλα για τις γνώσεις που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, τη συμπαράσταση και τη βοήθειά του, όπως και για την ανάθεση της εργασίας αυτής. Επιπλέον ευχαριστώ όλους τους φίλους και συναδέλφους για τη βοήθεια που μου προσέφεραν σε διάφορα στάδια της υλοποίησης. Ενδεικτικά αναφέρω τον Μιγάλη Μανούση και την Κατερίνα Κίτσιου. Επίσης ευχαριστώ τον ανιψιό μου, Αποστόλη Ταξινταρίδη, έμπειρο προγραμματιστή, για την πολύτιμη βοήθειά του σε θέματα επικοινωνιών.

Ευχαριστώ επιπλέον τη σύζυγό μου, Βάσω Κρικέλη, για τη στάση και την υπομονή της σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Χωρίς την ενθάρρυνσή της δε θα είχα τη δύναμη να συνεχίσω και να ολοκληρώσω αυτόν τον κύκλο.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	v
Περίληψη.....	vi
Abstract	vii
Ευχαριστίες	viii
Περιεχόμενα	ix
Κατάλογος Σχημάτων/Εικόνων.....	xi
Κατάλογος Πινάκων.....	xii
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή.....	13
Κεφάλαιο 2ο: Συνοπτική Περιγραφή	15
Κεφάλαιο 3ο: Εξαρτήματα - υποσυστήματα.....	17
3.1 ESP32	17
3.1.1 Απαιτήσεις από το μικροελεγκτή για το συγκεκριμένο κύκλωμα:	18
3.2 Απεικόνιση σε οθόνη TFT	18
3.3 Αντιστάσεις	19
3.3.1 Σύνδεση αντιστάσεων - Απεικόνιση σε ενδείκτες 10 LED.....	19
3.3.2 Χαρακτηριστικά του driver LM3914	20
3.3.3 Ρύθμιση για τη συγκεκριμένη εφαρμογή	22
3.3.4 Έλεγχος αντιστάσεων.....	22
3.3.5 Πάνω αντίσταση.....	24
3.4 Έλεγχος τιμής αντίστασης με αναλογικό σήμα.....	28
3.5 Ενδιάμεση σύνδεση Αντιστάσεων	30
3.6 Τροφοδοσία εξαρτημάτων.....	32
3.6.1 Συνδεσμολογία για την παραγωγή 3.3 V	33
3.6.2 Συνδεσμολογία για την παραγωγή 0 έως 10 V.....	36
Κεφάλαιο 4ο: Ιστοσελίδα - έλεγχος μικροελεγκτή	40
4.1 Πρωτόκολλο επικοινωνίας - χρόνοι απόκρισης	43
4.1.1 Πρωτόκολλο HTTP.....	43
4.1.2 WebSockets	44
4.2 Λειτουργία του προγράμματος.....	45
4.2.1 Συνάρτηση υπολογισμού της συνολικής αντίστασης του κυκλώματος (R_total).....	46
4.2.2 Συνάρτηση υπολογισμού ρευμάτων και ενδιάμεσης τάσης (update_current).....	46
4.2.3 Η βασική συνάρτηση (process_event)	47

Κεφάλαιο 5ο: Ασφάλεια του συστήματος.....	50
Κεφάλαιο 6ο: Η κατασκευή	51
6.1 Η μπροστινή πλακέτα (front panel).....	52
6.2 Η πίσω πλακέτα (ESP board)	54
Κεφάλαιο 7ο: Δοκιμές - Στιγμιότυπα	56
Κεφάλαιο 8ο: Συμπεράσματα - Προτάσεις	58
8.1 Συμπεράσματα.....	58
8.2 Βελτιώσεις - Προτάσεις	58
Βιβλιογραφία - Αναφορές	59
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Κώδικας της εφαρμογής.....	60
circuit_ohm.ino : Κύριος κώδικας.....	60
html_page.ino : Εκχώρηση περιεχόμενου ιστοσελίδας σε μεταβλητή.....	66
definitions.h : Αντιστοιχίσεις τιμών / εξόδων	69
my_net.h : Διαπιστευτήρια σύνδεσης	70
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Κύκλωμα ομαλοποίησης παλμών PWM	71
Συμπεριφορά Κυκλώματος	71
Οριακές τιμές	76
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ : Σχέδια κατασκευής.....	77

Κατάλογος Σχημάτων/Εικόνων

Εικόνα 2.1 : Το βασικό κύκλωμα.....	15
Εικόνα 2.2 : Διάφοροι συνδυασμοί τιμών αντιστάσεων	15
Εικόνα 3.1 : Έξοδοι/είσοδοι (pinout) ESP32	17
Εικόνα 3.2 : Η οθόνη της κατασκευής	19
Εικόνα 3.3 : Driver LM3914 με ενδείκτη LED 10 τομέων (DIY kit).....	20
Εικόνα 3.4 : LM3914 - Προτεινόμενη σύνδεση απεικόνισης.....	21
Εικόνα 3.5 : Ρύθμιση ρεύματος LED στο LM3914	22
Εικόνα 3.6 : Κύκλωμα ελέγχου ενός LED και μιας αντίστασης.....	23
Εικόνα 3.7 : Απλοποιημένο κύκλωμα ελέγχου των κάτω αντιστάσεων	24
Εικόνα 3.8 : Το ρελέ στερεάς κατάστασης PLA132 και η συνδεσμολογία του.....	25
Εικόνα 3.9 : Ο συγκριτής LM339	26
Εικόνα 3.10 : Τμήμα κυκλώματος ελέγχου της πάνω αντίστασης.....	27
Εικόνα 3.11 : Η πάνω αντίσταση μαζί με το κύκλωμα ελέγχου της.....	27
Εικόνα 3.12 : Κύκλωμα ομαλοποίησης παλμών PWM.....	28
Εικόνα 3.13 : Έξοδος πάνω αντίστασης πριν (πράσινο) και μετά (κίτρινο) την ομαλοποίηση	29
Εικόνα 3.14 : Κυμάτωση εξόδου προσεγγιστικά	29
Εικόνα 3.15 : Προσωρινό Κύκλωμα - Εξαρτήματα	30
Εικόνα 3.16 : Προσωρινό Κύκλωμα - Ενδείκτες LED	30
Εικόνα 3.17 : Μια αντίσταση, δύο αντιστάσεις σε σειρά και δύο αντιστάσεις παράλληλα.....	31
Εικόνα 3.18 : Συνδεσμολογία ρελέ πάνω αντίστασης.....	31
Εικόνα 3.19 : Συνδεσμολογία ρελέ κάτω αντιστάσεων	32
Εικόνα 3.20 : Ρελέ ελέγχου αντιστάσεων	32
Εικόνα 3.21 : Ο τελεστικός ενισχυτής OPA548.....	33
Εικόνα 3.22 : Ρύθμιση μεγίστου ρεύματος στον OPA548	34
Εικόνα 3.23 : Προτεινόμενη σύνδεση στη μη αναστρέφουσα είσοδο	35
Εικόνα 3.24 : Κύκλωμα παραγωγής τάσης 3.3 V	36
Εικόνα 3.25 : Όρια τάσεων εξόδου σε σχέση με την τάση τροφοδοσίας.....	36
Εικόνα 3.26 : Κύκλωμα παραγωγής ρυθμιζόμενης τάσης	37
Εικόνα 3.27 : Συμπεριφορά της αναλογικής εξόδου του ESP32	38
Εικόνα 3.28 : Απαιτούμενες τιμές εισόδου στον DAC σε σχέση με τις υπολογισθείσες	39
Εικόνα 4.1 : Η ιστοσελίδα ελέγχου του κυκλώματος.....	40
Εικόνα 4.2 : Διαδικασία σύνδεσης στο server που εξυπηρετεί τις συσκευές SONOFF	42
Εικόνα 4.3 : Λειτουργία του πρωτοκόλλου HTTP.....	43
Εικόνα 4.4 : Λειτουργία της τεχνικής Websockets	44
Εικόνα 4.5 : Διακόπτης OFF λόγω μη επιτρεπτού ρεύματος.....	48
Εικόνα 5.1 : Ασφάλειες και όργανα ένδειξης.....	50
Εικόνα 6.1 : Τα τμήματα της κατασκευής.....	51
Εικόνα 6.2 : Front Panel - όψη εξαρτημάτων.....	53
Εικόνα 6.3 : Front Panel - εμπρόσθια όψη.....	53
Εικόνα 6.4 : ESP board - όψη εξαρτημάτων	54
Εικόνα 6.5 : Η κατασκευή, εμπρός και πίσω όψη.....	55
Εικόνα 7.1 : Στιγμιότυπο 1 : 9 Volt, 54 mA.....	56
Εικόνα 7.2 : Στιγμιότυπο 2 : 8 Volt, 16 mA.....	57
Εικόνα 7.3 : Στιγμιότυπο 3 : 8 Volt, 10 mA.....	57

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1 : Τεχνικά Χαρακτηριστικά Επεξεργαστή ESP32 [3]	17
Πίνακας 3.2 : Τεχνικά χαρακτηριστικά του MOSFET BS170.....	23
Πίνακας 3.3 : Λειτουργία των εξόδων του LM3914 και των εξαρτώμενων στοιχείων	24
Πίνακας 3.4 : Χαρακτηριστικά του SSR PLA132	25
Πίνακας 3.5 : Τεχνικά χαρακτηριστικά του συγκριτή LM339.....	26
Πίνακας 3.6 : Είσοδοι / έξοδοι συγκριτών LM339 - λειτουργία SSR.....	27
Πίνακας 3.7 : Λειτουργία ακροδεκτών OPA548.....	33
Πίνακας 3.8 : Απαιτούμενη είσοδος στον DAC για τις επιθυμητές τάσεις εξόδου	38
Πίνακας 4.1 : Βασικός Αλγόριθμος του προγράμματος.....	45
Πίνακας 4.2 : Μεταβλητές του προγράμματος - ελεγχόμενες έξοδοι.....	49
Πίνακας 6.1 : Συνδέσεις των δύο πλακετών.	52

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

Η γνώση των βασικών εννοιών του ηλεκτρισμού είναι απαραίτητη για να προχωρήσει κανείς σε ανώτερες σπουδές ή εξειδίκευση σχετικά με ηλεκτρολογικά και ηλεκτρονικά θέματα. Η παρουσίαση των εννοιών του ρεύματος, της τάσης και της αντίστασης όσο οργανωμένα και συστηματικά και αν γίνει από κάποιον εισηγητή, δεν είναι αρκετή για την πλήρη κατανόηση των φυσικών αυτών μεγεθών. Για τον λόγο αυτό η εισήγηση συνοδεύεται κατά κανόνα και με τα εργαστηριακά πειράματα. Εκεί ο εκπαιδευόμενος, με τη βοήθεια και την επίβλεψη του καθηγητή, ασχολείται με πραγματικά κυκλώματα τα οποία του δίνονται έτοιμα ή τα συνθέτει ο ίδιος και καλείται να μεταβάλλει διάφορες παραμέτρους τους και να παρατηρήσει τα αποτελέσματα αυτών των μεταβολών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων πειραμάτων είναι η μελέτη και η επαλήθευση του νόμου του Ohm, όπως και ο υπολογισμός της συνολικής αντίστασης αντιστατών συνδεδεμένων σε σειρά, παράλληλα ή με μεικτή συνδεσμολογία.

Στα κυκλώματα αυτά, η απεικόνιση των ηλεκτρικών μεγεθών δεν είναι εύκολη. Για να βλέπει ο εκπαιδευόμενος τα μεγέθη που επηρεάζει, όπως η τάση και η αντίσταση, χρησιμοποιούμε για την τάση εξωτερικά όργανα όπως το βολτόμετρο, συνδεδεμένο σε δύο σημεία του κυκλώματος, το σημείο το δυναμικό του οποίου θέλουμε να μετρήσουμε και τη γείωση. Σε περίπτωση που θέλουμε την τάση σε παραπάνω από ένα σημεία του κυκλώματος θα χρειαστούμε πολλαπλά βολτόμετρα. Συνήθως το ένα βολτόμετρο είναι ενσωματωμένο στο χρησιμοποιούμενο τροφοδοτικό και μας δίνει τη συνολική τάση με την οποία τροφοδοτείται το κύκλωμα. Με επιπλέον βολτόμετρα μπορούμε να δούμε την τάση και σε άλλα σημεία.

Η αντίσταση είναι συνήθως συγκεκριμένη και συμπαγούς κατασκευής και η τιμή της φαίνεται πάνω της με τη βοήθεια του χρωματικού κώδικα αντιστάσεων. Για οποιαδήποτε αλλαγή θα πρέπει να διακόψουμε την τροφοδοσία, να την αντικαταστήσουμε με άλλη, επίσης συγκεκριμένης τιμής και να ξαναεφαρμόσουμε την προβλεπόμενη τάση. Εάν χρησιμοποιήσουμε ποτενσιόμετρο, δεν είναι εύκολο να ξέρουμε την αντίστασή του σε κάθε θέση του δρομέα, εκτός εάν χρησιμοποιήσουμε διπλό ποτενσιόμετρο, με κοινό δρομέα, όπου στο ένα από τα δύο θα έχουμε συνδεδεμένο ένα ωμόμετρο και το δεύτερο θα χρησιμοποιείται για το κύκλωμα.

Μπορούμε επίσης να χρησιμοποιήσουμε ένα από τα κουτιά μεταβλητής αντίστασης του εμπορίου, κόστους από περίπου 50€ τα φθηνότερα, από σελίδες πώλησης του εξωτερικού. Αυτά αποτελούνται από ποτενσιόμετρα συνδεδεμένα σε σειρά, με τέτοιον τρόπο και τέτοιες τιμές αντιστάσεων ώστε να συνθέτουν κάθε τιμή αντίστασης στο εύρος των προδιαγραφών κατασκευής. Υπάρχουν και άλλα με περιστροφικούς διακόπτες επιλογής (τους συναντάμε και στα πολύμετρα) για επιλογή τιμών αντιστάσεων που επιθυμεί ο χρήστης. Τέλος, υπάρχουν και κουτιά της κατηγορίας αυτής στα οποία ο χρήστης επιλέγει τη απαιτούμενη συνδεσμολογία αντιστατών, συνδέοντας το κύκλωμά του σε συγκεκριμένες υποδοχές πάνω στο κουτί (μπόρνες) χρησιμοποιώντας αρσενικά βύσματα σύνδεσης (μπανάνες Φ 4 mm).

Εκτός από τα κουτιά που περιέχουν ποτενσιόμετρα, τα οποία όμως συνήθως δεν επιτρέπουν ρεύμα με ισχύ πάνω από 0.5 – 1 Watt, τα υπόλοιπα αποσυνδέουν και επανασυνδέουν το κύκλωμα με κάθε αλλαγή τιμής αντίστασης. Αυτό στις περισσότερες περιπτώσεις δε μας ενοχλεί. Όμως η τιμή της αντίστασης είναι δύσκολα απεικονίσιμη και προκύπτει από το άθροισμα επί μέρους τιμών αντιστάσεων. Αυτό πολλές φορές δημιουργεί σύγχυση στο μαθητευόμενο, έναν -κατά κανόνα- μη εξοικειωμένο χρήστη.

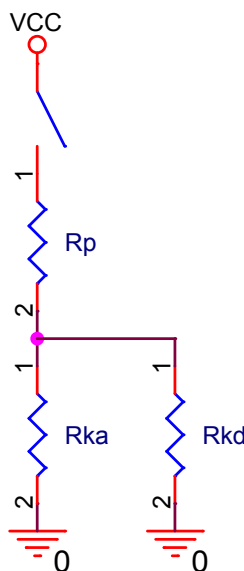
Τέλος, το ρεύμα που διαρρέει τη διάταξη είναι δυνατόν να μετρηθεί μόνο με διακοπή του κυκλώματος σε κάποιο σημείο και παρεμβολή στο σημείο εκείνο ενός αμπερομέτρου. Στην περίπτωση κυκλωμάτων με παραπάνω από έναν κλάδους, όπως π.χ. στην περίπτωση παράλληλων αντιστάσεων, χρειαζόμαστε πολλά αμπερόμετρα, ένα για κάθε κλάδο.

Όλα τα παραπάνω προβλήματα στην απεικόνιση μπορούν να λυθούν αν χρησιμοποιήσουμε ένα πρόγραμμα προσομοίωσης. Τα προγράμματα αυτά εμφανίζουν τις τιμές τάσεων και ρευμάτων σε διάφορα σημεία και κλάδους αντίστοιχα του κυκλώματος. Οι αντιστάσεις απεικονίζονται με διάφορους τρόπους σε κατανοητή μορφή από το χρήστη. Η μεταβολή τους, όπως και η μεταβολή της τάσης είναι πολύ εύκολη. Όμως, εφόσον ο εκπαιδευόμενος αλληλεπιδρά με ένα λογισμικό και όχι με ένα πραγματικό κύκλωμα, η εκπαιδευτική τους αξία πέφτει κατακόρυφα, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται μόνο σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει δυνατότητα χρήσης πραγματικών εξαρτημάτων.

Στην παρούσα εργασία, οι παράμετροι ενός πραγματικού κυκλώματος τριών αντιστάσεων σε συνδεσμολογία αστέρα που διαρρέεται από ρεύμα, απεικονίζονται με αρκετούς τρόπους. Η συνολικά εφαρμοζόμενη τάση απεικονίζεται στην ενσωματωμένη οθόνη του συστήματος και στο βολτόμετρο που αυτό διαθέτει. Τα ρεύματα σε κάθε κλάδο φαίνονται στην οθόνη αριθμητικά και γραφικά, ανάλογα με το πάχος ενός βέλους, ενώ το συνολικό ρεύμα φαίνεται και στο ενσωματωμένο αμπερόμετρο. Τέλος οι αντιστάσεις εμφανίζονται στην οθόνη αριθμητικά, σύμφωνα με το χρωματικό κώδικα αντιστάσεων και εκτός οθόνης σε ενδείκτες 10 LED. Η συνολική αντίσταση εμφανίζεται μόνο αριθμητικά. Όλα τα παραπάνω στοιχεία όπως και η τάση στο κέντρο του αστέρα παρουσιάζονται με περισσότερη ακρίβεια και στην ιστοσελίδα η οποία ελέγχει το κύκλωμα και μας επιτρέπει να μεταβάλλουμε τις τιμές αντιστάσεων και συνολικής εφαρμοζόμενης τάσης.

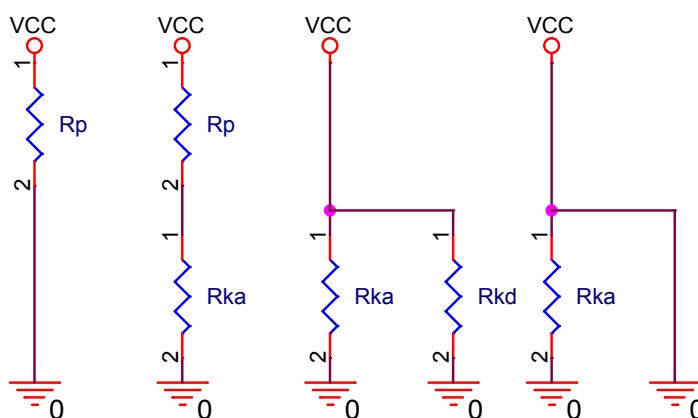
Κεφάλαιο 2ο: Συνοπτική Περιγραφή

Το κύκλωμα (εικόνα 2.1) αποτελείται από τρεις αντιστάσεις, μεταβαλλόμενες από 0 έως $1\text{k}\Omega$ σε βήματα των 100Ω . Οι αντιστάσεις συνδέονται με το ένα άκρο τους κοινό (συνδεσμολογία αστέρα) και οι δύο από αυτές έχουν το ελεύθερο άκρο τους στη γη ενώ η τρίτη έχει το ελεύθερο άκρο στην εφαρμοζόμενη τάση.



Εικόνα 2.1 : Το βασικό κύκλωμα

Επιτρέπονται τιμές άπειρης αντίστασης/ανοικτού κυκλώματος. Δίνοντας επομένως τους κατάλληλους συνδυασμούς τιμών μηδενικής, άπειρης και υπαρκτής αντίστασης, επιτυγχάνεται μελέτη κυκλώματος με μία αντίσταση, δύο αντιστάσεις σε σειρά, δύο αντιστάσεις παράλληλα και δύο παράλληλες σε σειρά με μια αντίσταση. Στην εικόνα 2.2 απεικονίζεται το κύκλωμα με μία αντίσταση ($R_{ka} = 0$, $R_{kd} = \infty$), δύο αντιστάσεις σε σειρά ($R_{kd} = \infty$), δύο αντιστάσεις παράλληλα ($R_p = 0$) και μηδενική αντίσταση / βραχυκύκλωμα ($R_p = R_{kd} = 0$).



Εικόνα 2.2 : Διάφοροι συνδυασμοί τιμών αντιστάσεων

Η τάση εφαρμόζεται στην πάνω αντίσταση. Οι επιτρεπόμενες τιμές είναι από 0 έως 10 Volt σε βήματα του ενός Volt. Το ρεύμα που διαρρέει τις αντιστάσεις (εάν είναι κάτω από το επιτρεπτό όριο των 100 mA) απεικονίζεται στην οθόνη της κατασκευής. Η συνολικά εφαρμοζόμενη τάση, όπως και το συνολικό ρεύμα εμφανίζονται επιπλέον και στα ενσωματωμένα αναλογικά όργανα. Ο χρήστης μπορεί να ρυθμίσει μέσω ιστοσελίδας τιμές αντιστάσεων και τάσης. Ο κεντρικός διακόπτης στην εικόνα 2.1 απενεργοποιείται εάν το ρεύμα ξεπεράσει το όριο των 100 mA.

Το κύκλωμα τροφοδοτείται από τροφοδοτικό 12V / 2A.

Κεφάλαιο 3ο: Εξαρτήματα - υποσυστήματα

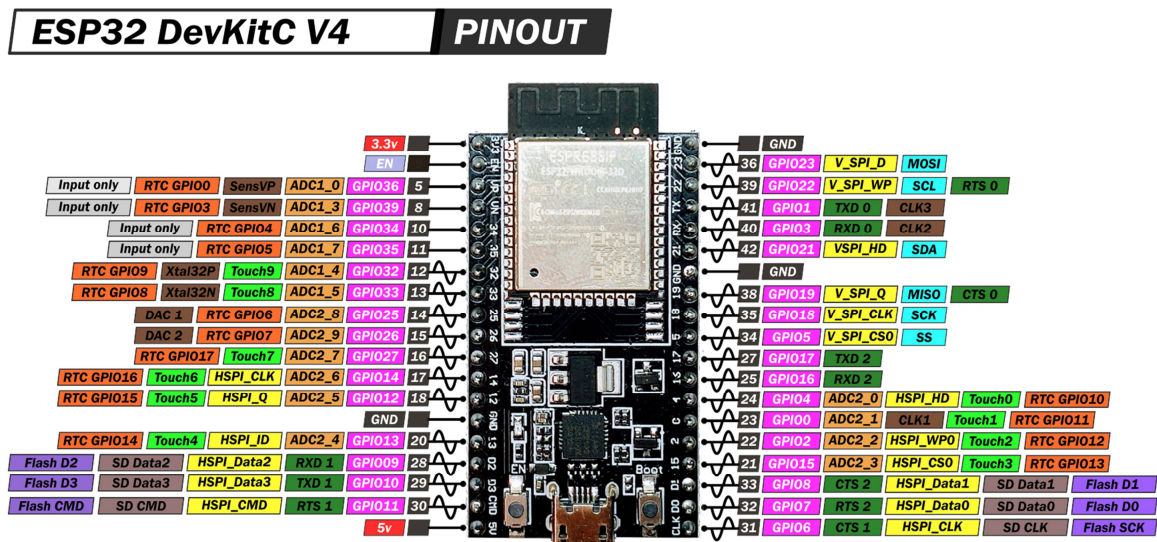
3.1 ESP32

Το κύκλωμα ελέγχεται από το μικροελεγκτή ESP32. Η επιλογή του έγινε με βάση τις δυνατότητές του και την ευκολία προγραμματισμού του. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου μικροελεγκτή φαίνονται στον πίνακα 3.1 και υπερκαλύπτουν τις απαιτήσεις της κατασκευής, εκτός από τον αριθμό διαθέσιμων Ψηφιοαναλογικών μετατροπέων (DACs), οπότε εφαρμόζεται άλλη μέθοδος ελέγχου όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω. Τονίζεται ότι ο πίνακας τεχνικών χαρακτηριστικών του μικροελεγκτή, όπως και όλοι οι πίνακες τεχνικών χαρακτηριστικών των εξαρτημάτων τα οποία χρησιμοποιούνται στην εργασία, δεν είναι πλήρεις, αλλά περιέχουν μόνο τα δεδομένα που σχετίζονται με τη συγκεκριμένη κατασκευή.

Πίνακας 3.1 : Τεχνικά Χαρακτηριστικά Επεξεργαστή ESP32 [3]

Σύστημα	ESP 32
Εταιρεία	ESPRESSIF Systems
Μοντέλο	DevKitC v4
Επεξεργαστής	Tensilica Xtensa LX6 / Dual-Core
Αρχιτεκτονική	32-bit
Μνήμη	520kB /448kB Flash
Συχνότητα λειτουργίας	160 / 240Mhz
Ασύρματη συνδεσιμότητα	Wi-Fi: 802.11 b/g/n, Bluetooth: v4.2
Συνδεσιμότητα περιφερειακών	2 × 8-bit DACs, 4 × SPI, LED PWM (up to 16 channels)
Απαιτήσεις ισχύος	100mA@5V max
Απαιτήσεις ψύξης	-
Περιβάλλον / Γλώσσα προγραμματισμού	Arduino IDE / C#
Τιμή (ενδεικτική)	8 \$

Οι αντιστοιχίσεις εξόδων/εισόδων φαίνονται στην εικόνα 3.1 [4]



Εικόνα 3.1 : Έξοδοι/είσοδοι (pinout) ESP32

3.1.1 Απαιτήσεις από το μικροελεγκτή για το συγκεκριμένο κύκλωμα:

Έλεγχος της τιμής των 3 μεταβαλλόμενων αντιστάσεων: Εφόσον κάθε αντίσταση παίρνει 12 τιμές (0, 100Ω, 200Ω ... 1kΩ, άπειρο) θα χρειαζόμασταν 4 ακροδέκτες του μικροελεγκτή για κάθε αντίσταση, δηλαδή 12 συνολικά, για να τις ελέγξουμε ξεχωριστά την κάθε μία με ψηφιακό τρόπο. Θα απαιτούνταν και η χρήση αποκωδικοποιητών. Με βάση τον περιορισμένο αριθμό ακροδεκτών εισόδου/εξόδου στη συγκεκριμένη υλοποίηση (development board), ο αριθμός 12 κρίνεται υπερβολικός. Ακόμη και αν ελέγχαμε με τους ίδιους 4 ακροδέκτες όλες τις αντιστάσεις με τη βοήθεια 2-σε-4-bit αποκωδικοποιητή (συνολικά 6 ακροδέκτες), αυτό θα απαιτούσε την ύπαρξη στοιχείων μνήμης, όπως π.χ. D-flip flops, για την συγκράτηση της κατάστασης των εξόδων που δεν ελέγχονται κάποια στιγμή, αλλά είχαν δεχθεί μια τιμή στο παρελθόν. Κάτι τέτοιο θα αύξανε την πολυπλοκότητα του συστήματος.

Η λύση που τελικά επιλέχθηκε είναι ο αναλογικός έλεγχος των αντιστάσεων με έναν ακροδέκτη για κάθε αντίσταση. Δυστυχώς ο ESP32 έχει τη δυνατότητα για 2 μόνο αναλογικές εξόδους (DAC). Έτσι χρησιμοποιήθηκαν 3 PWM έξοδοι, των οποίων το σήμα ομαλοποιήθηκε για να ελέγξουν τις αντιστάσεις με τη βοήθεια των ολοκληρωμένων LM3914. Το συγκεκριμένο κύκλωμα περιέχει 10 συγκριτές και απεικονίζει σε μια σειρά LED την αναλογική του είσοδο. Λεπτομερής περιγραφή του συγκεκριμένου τμήματος υπάρχει στη συνέχεια.

Έλεγχος της τιμής της παραγόμενης/εφαρμοζόμενης τάσης: Ο τελεστικός ενισχυτής ισχύος ο οποίος χρησιμοποιήθηκε (OPA548) παράγει τάση ανάλογη με την τάση που εφαρμόζεται στον ακροδέκτη ελέγχου του. Εδώ χρησιμοποιήθηκε μια από τις δύο αναλογικές εξόδους του μικροελεγκτή, όπως και μια ψηφιακή έξοδος για την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση του τελεστικού

Έλεγχος της οθόνης TFT: Χρησιμοποιήθηκε το πρωτόκολλο SPI για τη γραφική απεικόνιση των δεδομένων στην οθόνη 2,4"

Έλεγχος των διακοπών: Ελέγχεται ο διακόπτης (ηλεκτρομηχανικό ρελέ) κάθε αντίστασης

Σύνδεση με τοπικό δίκτυο: Ο μικροελεγκτής συνδέεται σε τοπικό δίκτυο μέσω της ενσωματωμένης στη συγκεκριμένη υλοποίηση ασύρματης κάρτας Wi-Fi.

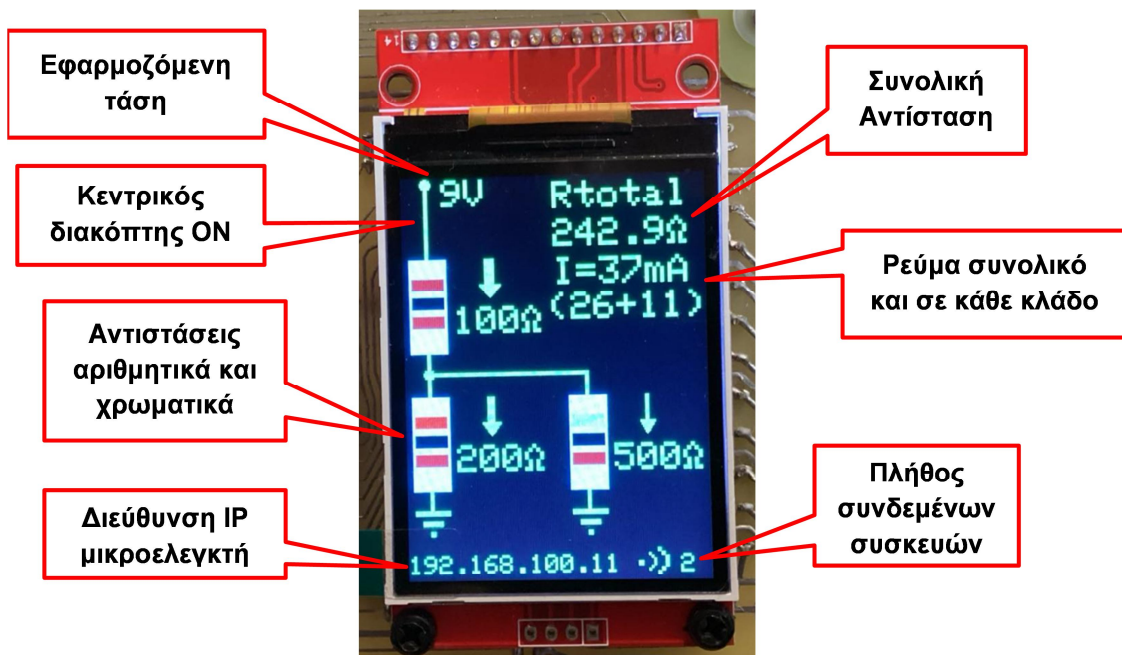
Φιλοξενία της ιστοσελίδας ελέγχου του κυκλώματος: Για τον έλεγχο του κυκλώματος θα πρέπει να συνδεθεί τουλάχιστον ένας υπολογιστής ή κινητό στην IP διεύθυνση του ESP32 για να φορτώσει την ιστοσελίδα του συστήματος και να ελέγξει πλήρως το κύκλωμα

Σημειώνεται ότι οι ψηφιακές εξόδους του ESP32 παράγουν 3.3 Volt σε κατάσταση HIGH. Όταν επομένως αυτές θα έπρεπε να ελέγξουν στοιχεία του κυκλώματος στα 12 Volt (όπως π.χ τα ηλεκτρομηχανικά ρελέ), ακόμη και αν απαιτούσαν ελάχιστο ρεύμα, ήταν απαραίτητη η χρήση διακοπτικού κυκλώματος που υλοποιήθηκε με το MOSFET BS170

3.2 Απεικόνιση σε οθόνη TFT

Χρησιμοποιήθηκε η οθόνη TFT 2.4 in, 320X240, 65K colors ελεγχόμενη από το drive IC ST7789V. Η συγκεκριμένη οθόνη επικοινωνεί με το μικροελεγκτή με το πρωτόκολλο SPI. Απαιτεί 7 αγωγούς για λειτουργία (3.3V, GND, ChipSelect, Reset, Data/Command, MasterOutSlaveIn, SystemClock). Οι οθόνες οι οποίες βασίζονται στο ολοκληρωμένο ST7789 είναι αρκετά διαδεδομένες, παράγονται σε διάφορα μεγέθη σε χαμηλές τιμές και υπάρχει πληθώρα βιβλιοθηκών για την υποστήριξή τους. Στην οθόνη απεικονίζονται οι αντιστάσεις (συνδεσμολογία και τιμή καθεμιάς αριθμητικά και στο διεθνή χρωματικό κώδικα αντιστάσεων), η εφαρμοζόμενη τάση, η ολική αντίσταση, το ρεύμα που διαρρέει

τις αντιστάσεις συνολικά και καθεμιά ξεχωριστά. Ακόμη φαίνονται η IP διεύθυνση του μικροελεγκτή καθώς και ο αριθμός των συσκευών (clients) που είναι συνδεδεμένες στη σελίδα του.



Εικόνα 3.2 : Η οθόνη της κατασκευής

Η εικόνα ενημερώνεται κάθε φορά που δίνεται μια εντολή μεταβολής αντίστασης ή τάσης από τον χρήστη (οποιονδήποτε από τους χρήστες) ή το αργότερο κάθε 5 δευτερόλεπτα αυτόματα.

3.3 Αντιστάσεις

Για τις μεταβλητές αντιστάσεις του κυκλώματος θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ψηφιακά ποτενσιόμετρα. Τα κυκλώματα αυτά, μπορούν να μεταβάλλουν την τιμή της αντίστασης εξόδου τους, όπως οι κλασσικοί χειροκίνητοι ροοστάτες και μπορούν να ρυθμιστούν είτε μέσω πρωτοκόλλου SPI, είτε μέσω I²C, είτε ακόμη με την εφαρμογή παλμών αύξησης ή μείωσης τιμής σε συγκεκριμένες εισόδους, για να αποφεύγεται η χρήση μικροελεγκτή ή άλλης σύνθετης συσκευής για τον έλεγχό τους. Υπάρχουν σε σχετική ποικιλία τιμών αντίστασης με πιο συνηθισμένες τις τιμές 1,10,50,100 kΩ [5] και διαβαθμίσεων ακρίβειας με τιμές από 32 βήματα (5 bit) έως 1024 βήματα (10 bit) [6].

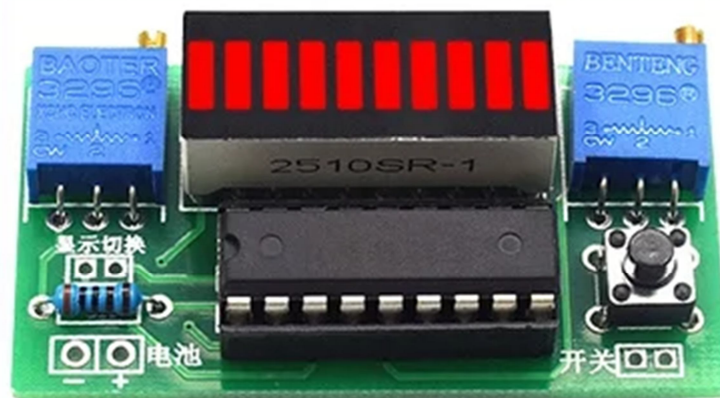
Δυστυχώς τα παραπάνω κυκλώματα δεν δέχονται μεγάλα ρεύματα. Τα περισσότερα επιτρέπουν μέγιστο ρεύμα 1 έως 4 mA, με κάποια από αυτά να επιτρέπουν στιγμιαία έως και 20 mA. Τα ολοκληρωμένα αυτά είναι κατάλληλα για διατάξεις ανίχνευσης τάσης, αν συνδεθούν σαν διαιρέτες τάσης, με την έξοδό τους συνδεδεμένη στην είσοδο κυκλώματος ενίσχυσης, συνήθως κάποιο τελεστικό ενισχυτή. Τα όρια ρεύματος από τους κατασκευαστές είναι πολύ μακριά από τα 100 mA, μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα στο σχεδιαζόμενο κύκλωμα. Έτσι οδηγούμαστε στη χρήση κλασσικών αντιστάσεων με κατάλληλη συνδεσμολογία που βραχυκυκλώνει/παρακάμπτει κάποιες από αυτές.

3.3.1 Σύνδεση αντιστάσεων - Απεικόνιση σε ενδείκτες 10 LED

Κάθε μεταβλητή αντίσταση του κυκλώματος αποτελείται από 10 αντιστάσεις των 100 Ω συνδεδεμένες σε σειρά. Κάθε σύνδεση μεταξύ αντιστάσεων μπορεί να έρθει σε επαφή με τη γη μέσω του

MOSFET BS170 σε λειτουργία διακόπτη. Το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να διαρρεύσει το κύκλωμα, άρα και κάθε αντίσταση ξεχωριστά είναι 100 mA. Για μέγιστη τάση 10 V αυτό συνεπάγεται καταναλισκόμενη ισχύ σε κάθε αντίσταση $10\text{ V} \times 100\text{ mA} = 1\text{ W}$. Επιλέχθηκαν επομένως αντιστάσεις $100\ \Omega / 2\text{ Watt}$ σαν στοιχεία των μεταβλητών αντιστάσεων.

Για να γίνει ορατό το μέγεθος της κάθε αντίστασης, πέρα από τον αριθμό στην οθόνη TFT που απεικονίζει το μέγεθός της, χρησιμοποιήθηκε το ολοκληρωμένο κύκλωμα LM3914 σε συνδυασμό με μια σειρά από 10 ορθογώνια LED. Ο συγκεκριμένος συνδυασμός χρησιμοποιείται κατά κόρον σε διατάξεις γραμμικής απεικόνισης αναλογικών μεγεθών (υπάρχει και αντίστοιχο ο.κ. για λογαριθμική απεικόνιση της εισόδου του). Παλαιότερα χρησιμοποιούνταν σε panel ένδειξης π.χ. έντασης ήχου. Σήμερα συναντάται πολύ συχνά σε απλές συσκευές ένδειξης φόρτισης μπαταριών. Μάλιστα η τιμή για μη συντονισμένα κυκλώματα για χομπίστες (Do It Yourself kit) είναι συνήθως αρκετά μικρότερη από το κόστος των επιμέρους εξαρτημάτων εάν τα προμηθευτεί κανείς ξεχωριστά.



Εικόνα 3.3 : Driver LM3914 με ενδείκτη LED 10 τομέων (DIY kit)

Το συγκεκριμένο σύστημα απεικόνισης διαθέτει 10 LED που απεικονίζουν το μέγεθος του αναλογικού μεγέθους το οποίο δέχεται στην είσοδο. Στην κατασκευή ανάβουν τόσα LED όσο το μέγεθος της αντίστασης σε εκατοντάδες Ohm. Επιπλέον υπάρχει ένα μικρό στρογγυλό LED 3mm στο άκρο κάθε μονάδας απεικόνισης. 2 LED από τα 10 ON σημαίνει αντίσταση 200 Ω. Όλα τα LED ON σημαίνει αντίσταση 1kΩ. Όλα τα LED OFF με το μικρό στρογγυλό LED ON σημαίνει αντίσταση 0 Ω. Όλα τα LED OFF με το μικρό στρογγυλό LED OFF σημαίνει άπειρη αντίσταση (ανοικτό κύκλωμα).

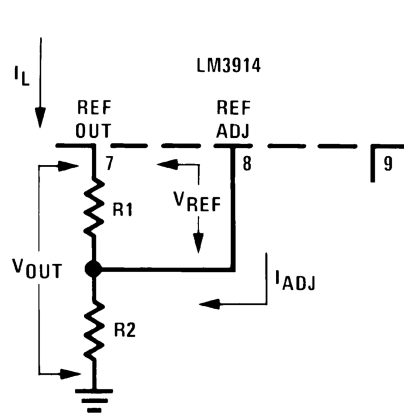
3.3.2 Χαρακτηριστικά του driver LM3914

Το LM3914 είναι ένα μονολιθικό ολοκληρωμένο κύκλωμα που ανιχνεύει το επίπεδο αναλογικής τάσης στην είσοδό του και οδηγεί 10 LED, παρέχοντας μια γραμμική αναλογική ένδειξη [7]. Περιέχει 10 συγκριτές συνδεδεμένους σε έναν δεκαπλό διαιρέτη τάσης, οι οποίοι επιτρέπουν να ανάβει ένα μόνο, ή μια σειρά από LED (dot/bar mode, επιλέγεται από το χρήστη), σε αναλογία τάσης εισόδου σε σχέση με τα όρια τάσεων που έχουν οριστεί.

- Παραγωγή συγκεκριμένης τάσης (1.25V) ανάμεσα σε 2 ακροδέκτες (7-8), με τη βοήθεια της οποίας μπορούμε να ρυθμίσουμε όρια τάσεων και ρεύματα στα LED. Δεν απαιτείται χρήση εξωτερικής διόδου Zener.
- Έξοδοι ανοικτού συλλέκτη, μπορούν να οδηγήσουν TTL ή CMOS Logic κυκλώματα.

3.3.3 Ρύθμιση για τη συγκεκριμένη εφαρμογή

Επιλέχθηκε bar mode (ανάβουν όλα τα LED από το πρώτο έως την τιμή που απεικονίζεται). Έτσι συνδέθηκε το pin 9 στα 12 Volt.



Εικόνα 3.5 : Ρύθμιση ρεύματος LED στο LM3914

Το ρεύμα στα LED ρυθμίζεται ανάλογα με τις τιμές των αντιστάσεων στο παραπάνω σχήμα. Ο κατασκευαστής δίνει τον τύπο $I_{LED} \approx \frac{12.5}{R_1}$ Όρια: 2 - 30 mA. Η R_1 τέθηκε 1.2 kΩ οπότε $I_{LED} \approx 10$ mA

Όρια τάσεων: Με δεδομένο ότι ο μικροελεγκτής παράγει τάση 3.3V σε λογικό HIGH, επιλέχθηκε η τιμή 3V ως πάνω όριο με δεδομένες κάποιες απώλειες, (π.χ. τα ρεύματα που θα οδηγήσουν τα FET σύνδεσης-αποσύνδεσης αντιστάσεων) και ως κάτω όριο τα 0V. Η τάση αναφοράς παράγεται στο pin7, το οποίο συνδέεται με το pin6 (πάνω όριο της απεικονιζόμενης τάσης).

Ο τύπος της τάσης που δίνεται είναι

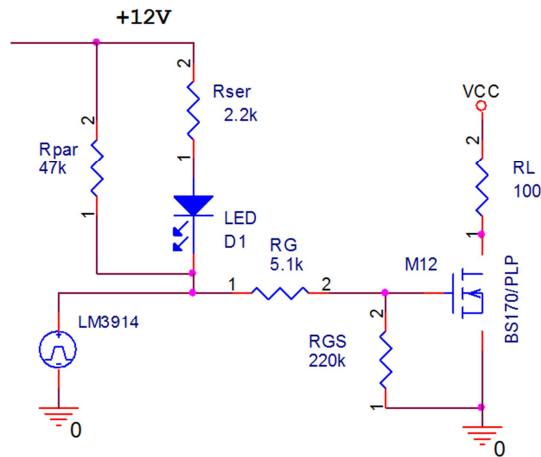
$$V_{OUT} = V_{REF} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{ADJ} R_2$$

όπου V_{REF} η παραγόμενη τάση αναφοράς (V pin7-pin8, 1.25V), I_{ADJ} το ρεύμα στο pin8 (120μA max). Για τιμή της $R_2 = 1.5k\Omega$, προκύπτει

$$V_{out} = V_{REF} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{ADJ} R_2 = 1.25 \text{ V} \left(1 + \frac{1.5 \text{ k}\Omega}{1.2 \text{ k}\Omega} \right) + 0.12 \text{ mA} \cdot 1.5 \text{ k}\Omega = 3.0 \text{ V} \quad (3-1)$$

3.3.4 Έλεγχος αντιστάσεων

Στο σχήμα 3.6 φαίνεται η σύνδεση μιας αντίστασης (RL) με τη γη.



Εικόνα 3.6 : Κύκλωμα ελέγχου ενός LED και μιας αντίστασης

Θεωρητικά οι δύο αντιστάσεις R_{par} και R_{ser} δεν χρειάζονται. Όμως, όπως αναφέρεται και στο Datasheet του κατασκευαστή του LM3914, σε πολλές συνδεσμολογίες του ολοκληρωμένου εμφανίζονται ανεπιθύμητα ρεύματα, με ενοχλητικότερο αποτέλεσμα το μη πλήρες σβήσιμο των LED (fading). Έτσι συστήνονται διάφορες τιμές αντιστάσεων, κυρίως σε σειρά με τα LED, για την μείωση, όχι την πλήρη εξάλειψη, του φαινομένου σε ενδεικτικές υλοποιήσεις που προτείνονται. Μετά από αρκετές δοκιμές βρέθηκε ότι ο συνδυασμός των αντιστάσεων $47k\Omega$ παράλληλα και $2.2k\Omega$ σε σειρά, τα LED δείχνουν σχεδόν απενεργοποιημένα. Στο πραγματικό κύκλωμα, για οικονομία όγκου εξαρτημάτων χρησιμοποιήθηκαν δικτυώματα αντιστάσεων (resistor networks), δηλαδή πολλαπλές ίσες αντιστάσεις με ένα κοινό άκρο.

Σαν διακόπτης επιλέχθηκε το n-channel MOSFET BS170. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του (Πίνακας 3.2) υπερκαλύπτουν τις απαιτήσεις της σχεδίασης ($V_{max} = 12V$, $I_{max} = 100mA$).

Πίνακας 3.2 : Τεχνικά χαρακτηριστικά του MOSFET BS170

Χαρακτηριστικό	Τιμή/μονάδα
V_{DS} max.	60V
Gate-source voltage V_{GS} max.	15V
Drain current (DC) I_D max.	500 mA
Gate threshold voltage ($V_{GS} = V_{DS}$; $I_D = 1$ mA) $V_{GS(th)}$	min. 0.8V, max. 3.0V
Drain-source ON-resistance ($V_{GS} = 10$ V; $I_D = 200$ mA) $R_{DS(on)}$ max.	5Ω

Η αντίσταση $5\ \Omega$ που εμφανίζεται προσθέτει ένα σφάλμα στις μετρήσεις μας με μέγιστη τιμή $5\Omega/100\Omega = 5\%$ μόνο στην περίπτωση κατά την οποία η τιμή της αντίστασης είναι 100Ω . Σε μεγαλύτερες τιμές, π.χ. $300 - 400\ \Omega$ και πάνω το σφάλμα είναι αμελητέο. Τονίζεται ότι τα αναλογικά όργανα που χρησιμοποιούνται δεν έχουν μεγάλη ακρίβεια στις ενδείξεις τους.

Ο ακροδέκτης Gate του MOSFET συνδέεται μέσω ενός διαιρέτη τάσης $5.1k/220k$ με την έξοδο του LM3914 και τη γη (στην τελική σχεδίαση χρησιμοποιήθηκε $5.1k/100k$, λόγω διαθεσιμότητας εξαρτημάτων). Η σύνδεση με τη γη γίνεται για να διασφαλίσει την κατάσταση OFF του MOSFET πριν το LM3914 φέρει τις εξόδους του στην επιθυμητή τάση.

Οι μετρήσεις στις εξόδους του LM3914 έδειξαν τάσεις $10.1\ V$ με την έξοδο σε κατάσταση HIGH και $0.6\ V$ με την έξοδο σε κατάσταση LOW, κάτι που καλύπτει τα όρια τάσεων του κατασκευαστή για διακοπτική λειτουργία.

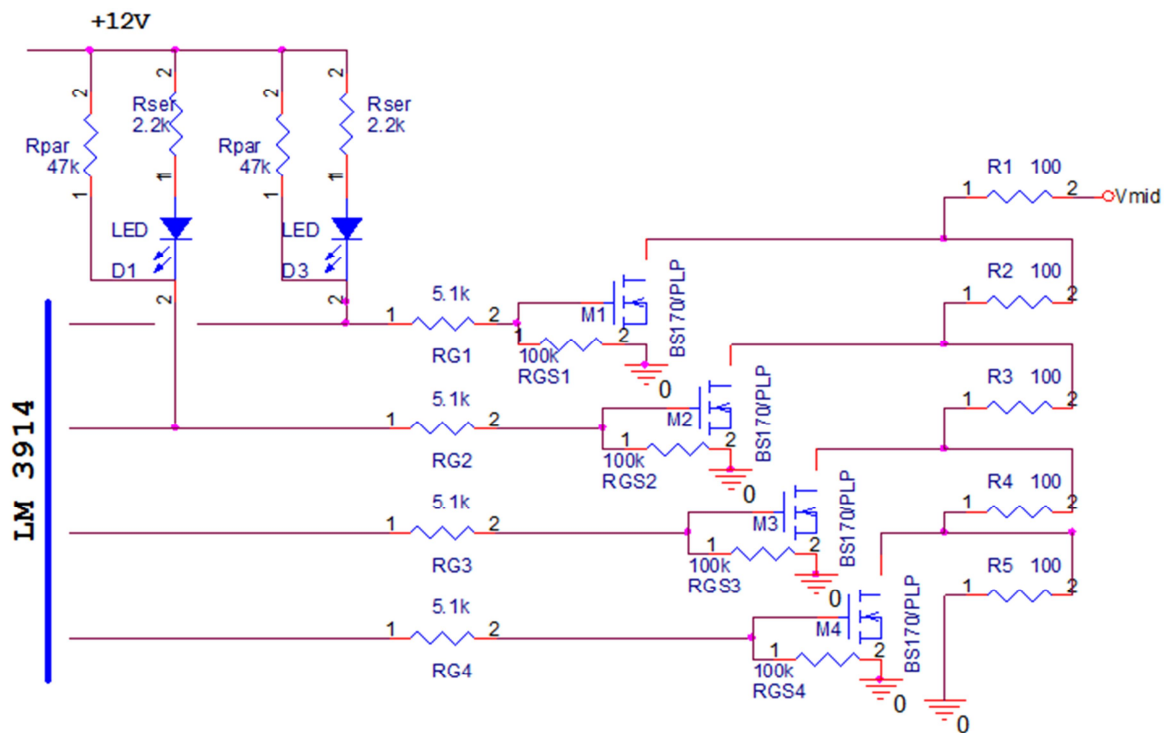
Τονίζεται η λειτουργία των εξόδων (Πίνακας 3.3):

Πίνακας 3.3 : Λειτουργία των εξόδων του LM3914 και των εξαρτώμενων στοιχείων

Έξοδος LM3914	LED	BS170	Κάτω μέρος της αντίστασης RL
HIGH	OFF	ON	Γειωμένο
LOW	ON	OFF	Απομονωμένο

Επομένως, με σβηστό το αντίστοιχο LED η ελεγχόμενη αντίσταση 100Ω, είναι συνδεδεμένη στη γη, άρα δεν υπάρχει.

Στο επόμενο απλοποιημένο σχήμα 3.7 φαίνεται η σύνδεση σε σειρά 5 αντιστάσεων, τα διακοπτικά κυκλώματα σε 4 από αυτές (R2 έως R5) και το πλήρες κύκλωμα μόνο στις R2 και R3 που απεικονίζονται με το LED D3 και D1 αντίστοιχα. Το πλήρες κύκλωμα κάθε μεταβλητής αντίστασης αποτελείται από 10 αντιστάσεις και 10 πλήρη κυκλώματα MOSFET και LED. Το σημείο Vmid πάνω δεξιά στο σχήμα έχει κι αυτό το δικό του διακοπτικό κύκλωμα στο πραγματικό κύκλωμα, εφόσον η τιμή μηδέν είναι αποδεκτή τιμή της μεταβλητής αντίστασης.



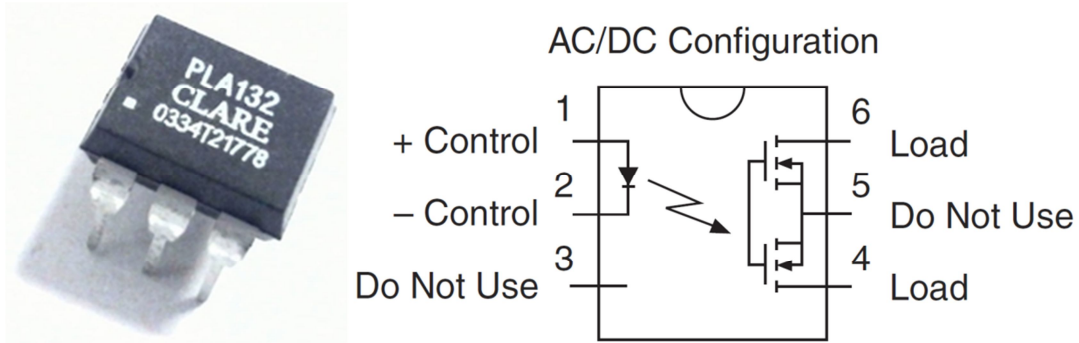
Εικόνα 3.7 : Απλοποιημένο κύκλωμα ελέγχου των κάτω αντιστάσεων

3.3.5 Πάνω αντίσταση

Όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, προϋποθέτουν ότι το MOSFET BS170 θα βρίσκεται πάντα με τον ακροδέκτη S σε δυναμικό μηδέν. Αυτό ισχύει για τις δύο κάτω αντιστάσεις, αλλά δεν είναι καθόλου σίγουρο ότι θα ισχύει για όλες τις περιπτώσεις και στην πάνω αντίσταση. Π.χ. αν η πάνω αντίσταση μηδενιστεί, ο ακροδέκτης S του MOSFET, όπως και ο ακροδέκτης D θα βρεθούν σε δυναμικό της

τροφοδοσίας (έως 10V), οπότε εμφανίζεται αβεβαιότητα για τη συμπεριφορά του κυκλώματος σε κάθε περίπτωση, δηλαδή αν θα άγει ή θα απομονώνει.

Για να αποφευχθούν οι παραπάνω καταστάσεις αβεβαιότητας, αποφασίστηκε να σχεδιαστεί τελείως διαφορετικά το διακοπτικό κύκλωμα της πάνω αντίστασης με χρήση εξαρτημάτων τα οποία έχουν τελείως απομονωμένες τις εισόδους τους από τις εξόδους τους. Τα πιο συνηθισμένα τέτοια εξαρτήματα είναι τα ρελέ. Το ρελέ που χρησιμοποιήθηκε είναι το ρελέ στερεάς κατάστασης (Solid State Relay) σε μορφή ολοκληρωμένου, PLA132 [8] (Εικόνα 3.8).



Εικόνα 3.8 : Το ρελέ στερεάς κατάστασης PLA132 και η συνδεσμολογία του

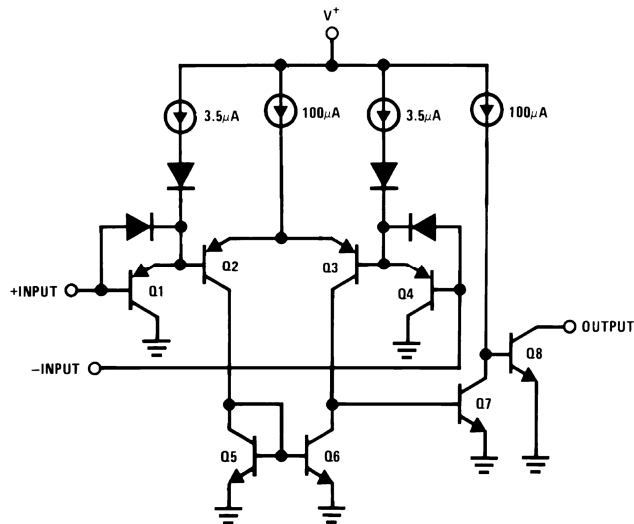
Τα τεχνικά χαρακτηριστικά που μας αφορούν, φαίνονται στον πίνακα 3.4.

Πίνακας 3.4 : Χαρακτηριστικά του SSR PLA132

Χαρακτηριστικό	Τιμή/μονάδα
Blocking Voltage	60 V
Load Current	600 mA
Input Control Current	2 mA
On-Resistance (max)	1 Ω

Τα βασικότερα χαρακτηριστικά, η ικανότητα διέλευσης ρεύματος του συγκεκριμένου ρελέ (600 mA) και η ανθεκτικότητα σε τάση (60V), υπερκαλύπτουν τις απαιτήσεις της σχεδίασης ($V_{\max} = 12V$, $I_{\max} = 100mA$). Ακόμη η παρασιτική αντίσταση του 1Ω (max) σε συνδυασμό και με τη συνδεσμολογία που χρησιμοποιείται όπως παρουσιάζεται παρακάτω, προσθέτει ένα πολύ μικρό σφάλμα στις μετρήσεις του όλου κυκλώματος.

Για την εξασφάλιση της αξιόπιστης λειτουργίας, τα παραπάνω SSR οδηγούνται το καθένα από έναν συγκριτή, για να διασφαλίσουμε ότι θα λειτουργούν σε συγκεκριμένα όρια τάσης τα οποία δε θα επηρεαστούν από επιπλέον ρεύματα ενεργοποίησης του ενσωματωμένου LED σε κάθε ένα, πέρα από την ενεργοποίηση των LED του ενδείκτη 10 τομέων. Επιλέχθηκε ο συγκριτής LM339 ανοικτού συλλέκτη [9] (Εικόνα 3.9). Ο πίνακας 3.5 περιέχει τα βασικότερα χαρακτηριστικά του.



Εικόνα 3.9 : Ο συγκριτής LM339

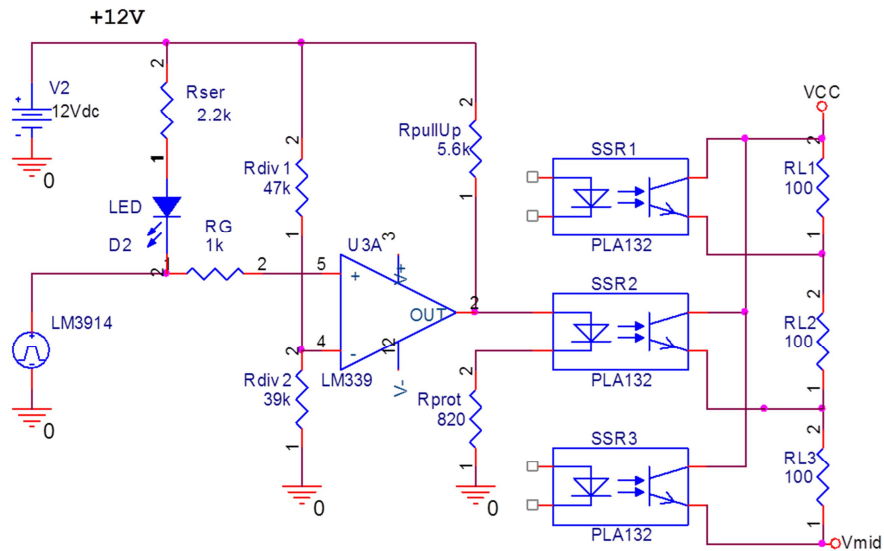
Πίνακας 3.5 : Τεχνικά χαρακτηριστικά του συγκριτή LM339

Χαρακτηριστικό	Τιμή/μονάδα
Recommended Supply Voltage (Single Supply)	2 ... 28 V
Output Sink Current (max)	16 mA
Input Common-Mode Voltage Range	0 ... $V^+ - 1.5 V$
Input Offset Voltage	< 10 mV

Με δεδομένες τις τιμές 10.1 και 0.6 V (μέση τιμή 5.35 V) στις εξόδους του LM339, εφαρμόστηκε τάση 5.44 V στην αναστρέφουσα είσοδο του συγκριτή μέσω ενός διαιρέτη τάσης 47/39kΩ, συνδεδεμένου από τη γη στα 12 V.

$$V_{-} = 12 V \cdot \frac{39 k\Omega}{39 + 47 k\Omega} = 5.44 V \quad (3-2)$$

Στο σχήμα 3.10 φαίνεται το κύκλωμα ελέγχου ενός ρελέ PLA132, όπως και ο τρόπος σύνδεσης τριών από αυτά με τις αντιστάσεις που ελέγχουν και το σημείο V_{mid} (σημείο του κέντρου του αστέρα των τριών μεταβλητών αντιστάσεων).



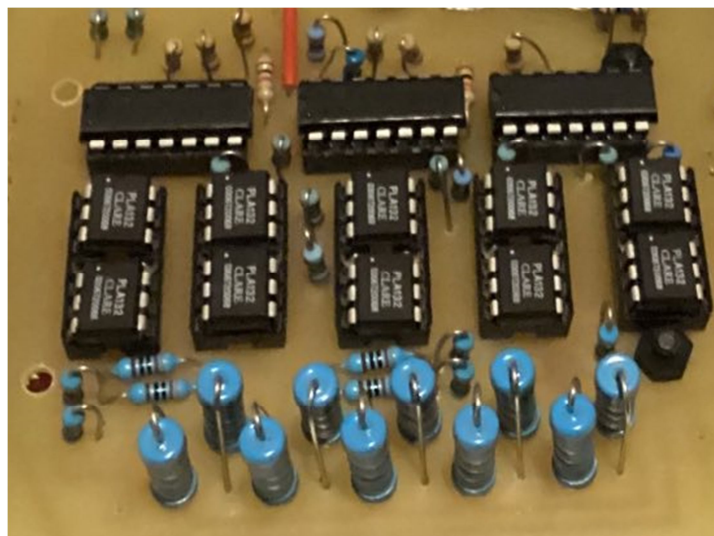
Εικόνα 3.10 : Τμήμα κυκλώματος ελέγχου της πάνω αντίστασης.

Επισημαίνεται και εδώ η λειτουργία των εξόδων (πίνακας 3.6):

Πίνακας 3.6 : Είσοδοι / έξοδοι συγκριτών LM339 - λειτουργία SSR

Έξοδος LM3914	LED	Έξοδος LM339	PLA132	Κάτω μέρος της ελεγχόμενης αντίστασης RL
HIGH	OFF	HIGH	ON	Σε δυναμικό Vcc
LOW	ON	LOW	OFF	Απομονωμένο από το δυναμικό Vcc

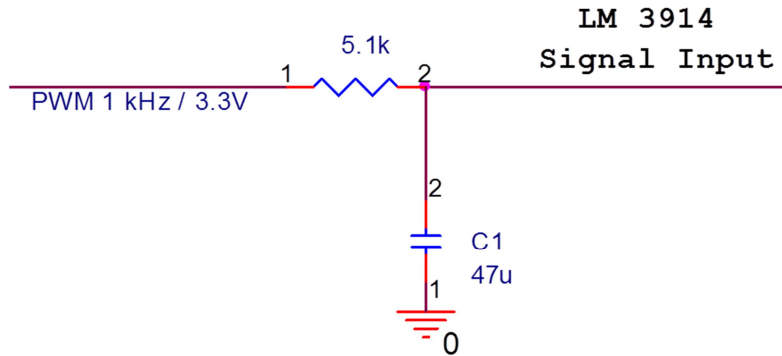
Όπως είναι φανερό από το σχήμα, όσο μικραίνει η τιμή της μεταβλητής αντίστασης, ενεργοποιούνται (ON) πρώτα τα πάνω ρελέ (SSR1 στο σχήμα), κατόπιν το μεσαίο (SSR2), με την ελάχιστη τιμή των 100Ω να έχουμε μόνο το κάτω ρελέ (SSR3) σε κατάσταση OFF και τα υπόλοιπα να άγουν. Τονίζεται και πάλι ότι χρησιμοποιήθηκαν 10 ολοκληρωμένα PLA132 και 3 ολοκληρωμένα συγκριτών LM339, εφόσον ο συγκριτής υπάρχει σε συσκευασία 4 τεμαχίων ανά ολοκληρωμένο κύκλωμα. Τα 10 SSRs που υπάρχουν σε συσκευασία των 6 ακροδεκτών τοποθετήθηκαν για ευκολία ανά δύο, σε πέντε βάσεις ολοκληρωμένων των 14 ακροδεκτών (εικόνα 3.11).



Εικόνα 3.11 : Η πάνω αντίσταση μαζί με το κύκλωμα ελέγχου της

3.4 Έλεγχος τιμής αντίστασης με αναλογικό σήμα

Για την παραγωγή αναλογικής τάσης ελέγχου καθεμιάς από τις τρεις αντιστάσεις, χρησιμοποιήθηκε ένας ακροδέκτης του μικροελεγκτή για κάθε αντίσταση για την παραγωγή σήματος διαμόρφωσης εύρους παλμών (Pulse Width Modulation). Το σήμα ομαλοποιήθηκε πριν οδηγήσει το driver LM3914 με τη βοήθεια του παρακάτω κυκλώματος RC (εικόνα 3.12)



Εικόνα 3.12 : Κύκλωμα ομαλοποίησης παλμών PWM

Η μέση τιμή της τάσης στην έξοδο του παραπάνω κυκλώματος είναι

$$\bar{V} = a \cdot V_1 \quad (3-3)$$

και η κυμάτωση V_{ripple} , δηλαδή η περιοχή τάσεων που παίρνει τιμές η έξοδος, με μέση τιμή την \bar{V} :

$$V_{\text{ripple}} = V_1 \frac{1 - e^{-\frac{aT}{RC}}}{1 - e^{-\frac{T}{RC}}} \left(1 - e^{-\frac{(1-a)T}{RC}} \right) \quad (3-4)$$

όπου

V_1 : Η τάση στην κατάσταση High του παλμού

a : το ποσοστό του χρόνου όπου ο παλμός είναι σε κατάσταση High ($0 \leq a \leq 1$)

T : Η περίοδος του παλμού (second)

R, C : Τα μεγέθη της Αντίστασης (Ω) και του πυκνωτή (F) ή η σταθερά χρόνου εκφόρτισης του κυκλώματος RC

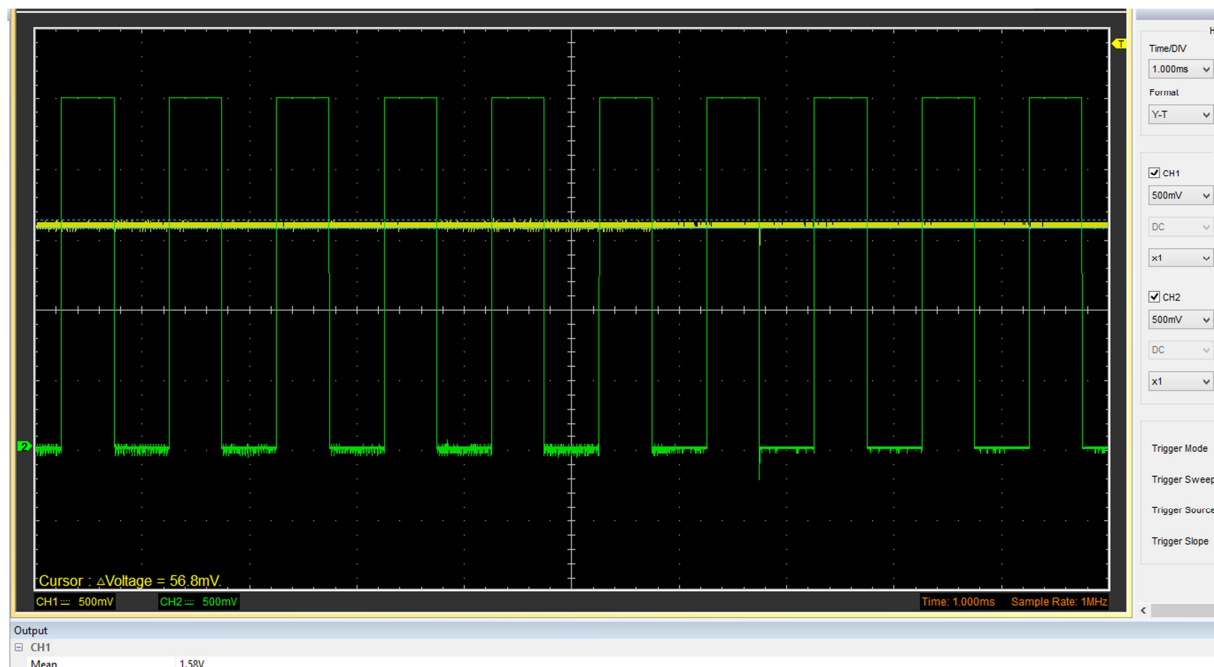
Στο παράρτημα Β φαίνεται πώς προκύπτουν οι παραπάνω τύποι, όπως και επιπλέον στοιχεία για τη συμπεριφορά του κυκλώματος ομαλοποίησης παλμών.

Στο κύκλωμα που κατασκευάστηκε επιλέχθηκε συχνότητα PWM 1 kHz ($T = 1 \text{ ms}$), $R=5.1 \text{ k}\Omega$ και $C = 47\mu\text{F}$. Η τάση εξόδου του ESP32 (V_1) είναι 3.3V. Η μέγιστη κυμάτωση προκύπτει για $a=50\%$ και για τα παραπάνω στοιχεία του κυκλώματος είναι

$$V_{\text{ripple}} = 52.1 \text{ mV} \quad (3-5)$$

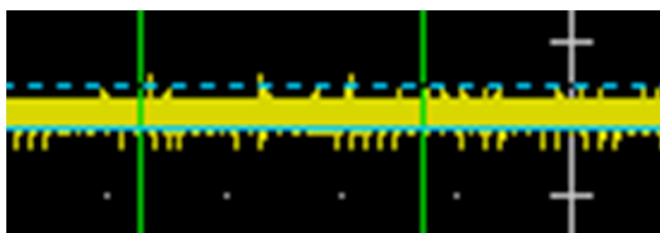
Το a δίνεται με τη μορφή ενός byte (PWM Resolution: 8 bit). Η τιμή 255 αντιστοιχεί σε $a=100\%$ (έξοδος 3.3 V), η τιμή 127 σε 50% (έξοδος $3.3 \cdot 50\% = 1.65 \text{ V}$), η τιμή 0 σε 0% (έξοδος 0 V), κ.τ.λ.

Στα παρακάτω στιγμιότυπα οθόνης γίνεται προσπάθεια απεικόνισης σε φτηνό USB παλμογράφο (Hantek6022) για $\alpha=50\%$. Δυστυχώς τα παράσιτα ήταν πολλά και δεν κατέστη δυνατή η μέτρηση της κυμάτωσης (μέγιστη και ελάχιστη τιμή εξόδου, κίτρινη γραμμή, εικόνα 3.13) Η μέση τιμή μετρήθηκε στα 1.58 V, αρκετά κοντά στο 1.65 V που υπολογίσθηκε.



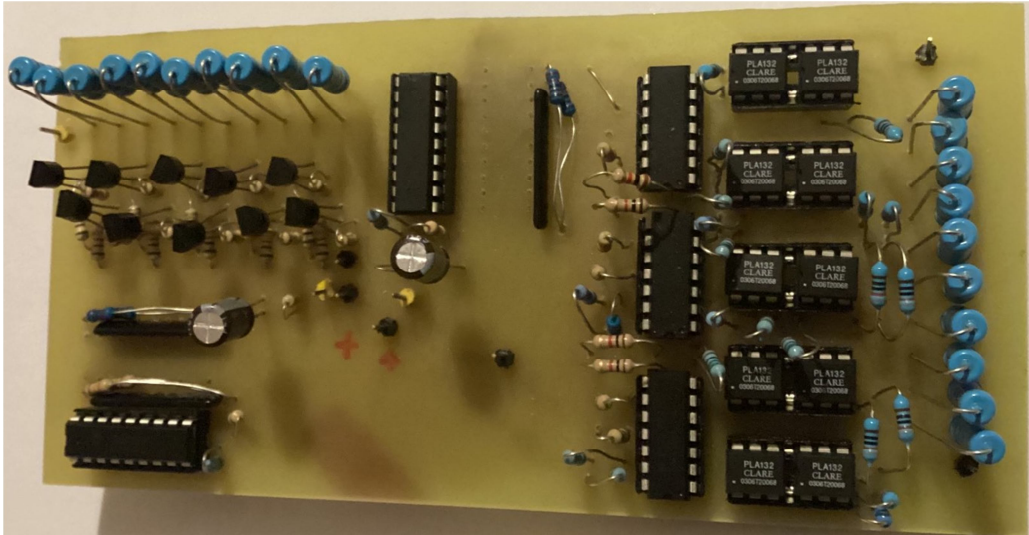
Εικόνα 3.13 : Έξοδος πάνω αντίστασης πριν (πράσινο) και μετά (κίτρινο) την ομαλοποίηση

Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε προσεγγιστικά με τη χρήση του δρομέα (μπλε γραμμές, εικόνα 3.13) και μετρήθηκε στα 56.8 mV, πολύ κοντά, για την ακρίβεια που είχαμε, με την υπολογισθείσα τιμή των 52.1 mV (εικόνα 3.14).

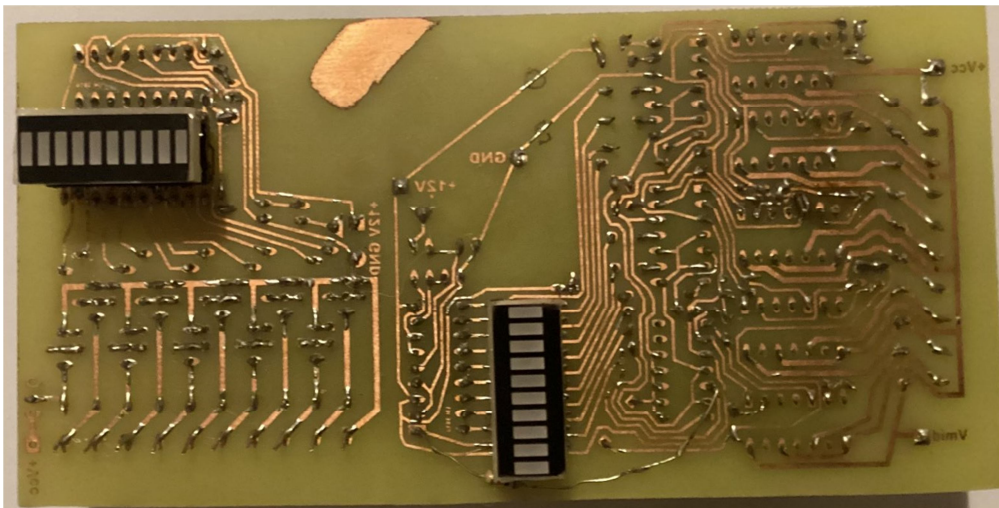


Εικόνα 3.14 : Κυμάτωση εξόδου προσεγγιστικά

Λόγω του σύνθετου του κυκλώματος ελέγχου αντιστάσεων, δεν ήταν εύκολη η δοκιμή του σε ράστερ. Έτσι κρίθηκε σκόπιμο να κατασκευαστεί ένα προσωρινό κύκλωμα σε δοκιμαστική τυπωμένη πλακέτα όπου έγιναν έλεγχοι με εφαρμογή αναλογικής τάσης από ποτενσιόμετρο σαν είσοδο και διαπιστώθηκε η αξιόπιστη λειτουργία του. Το προσωρινό κύκλωμα αποτελούνταν από μια αντίσταση ελεγχόμενη από FET και μια αντίσταση ελεγχόμενη από ρελέ και συγκριτές (εικόνες 3.15, 3.16)



Εικόνα 3.15 : Προσωρινό Κύκλωμα - Εξαρτήματα



Εικόνα 3.16 : Προσωρινό Κύκλωμα - Ενδείκτες LED

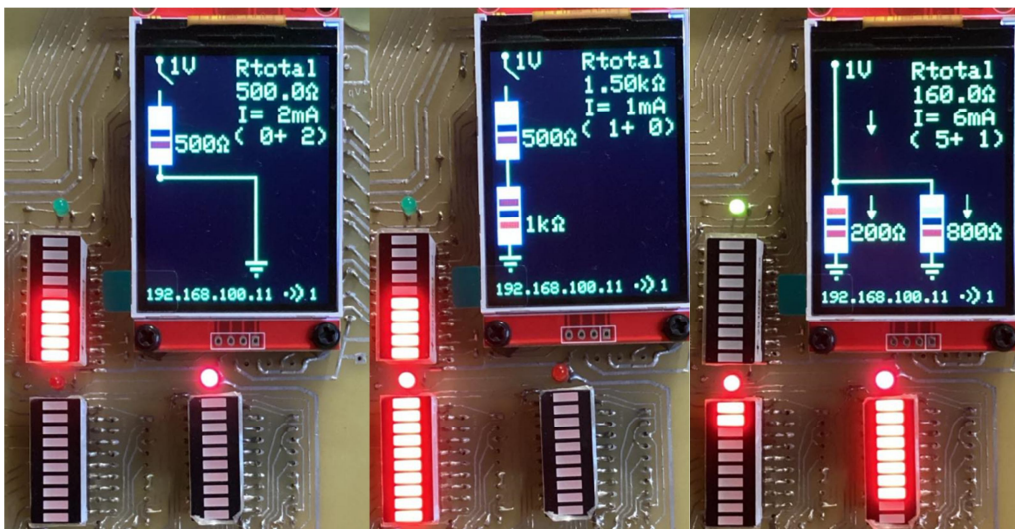
3.5 Ενδιάμεση σύνδεση Αντιστάσεων

Οι αντιστάσεις ελέγχονται η κάθε μία ξεχωριστά με τη βοήθεια ενός ηλεκτρομηχανικού ρελέ. Η υλοποίηση σχεδιάστηκε με απλά ρελέ και όχι στερεής κατάστασης για λόγους αξιοπιστίας. Όπως είναι γνωστό, σε περίπτωση δυσλειτουργίας, ένα ρελέ στερεής κατάστασης μπορεί να βρεθεί σε κατάσταση ON ή OFF. Όμως ένα απλό ρελέ συμβατικής τεχνολογίας είναι πρακτικά απίθανο να βρεθεί σε κατάσταση ON εάν σταματήσει να λειτουργεί.

Η σύνδεση των δύο κάτω αντιστάσεων γίνεται μέσω των δύο ρελέ με το κέντρο του αστέρα (υπενθυμίζεται ότι το άλλο άκρο τους είναι συνδεδεμένο στη γη). Η πάνω αντίσταση είναι μόνιμα συνδεδεμένη με το σημείο αυτό. Το ελεύθερο άκρο της συνδέεται μέσω ενός τρίτου ρελέ με την τάση τροφοδοσίας. Το τρίτο αυτό ρελέ παίζει και το ρόλο του κεντρικού διακόπτη της διάταξης.

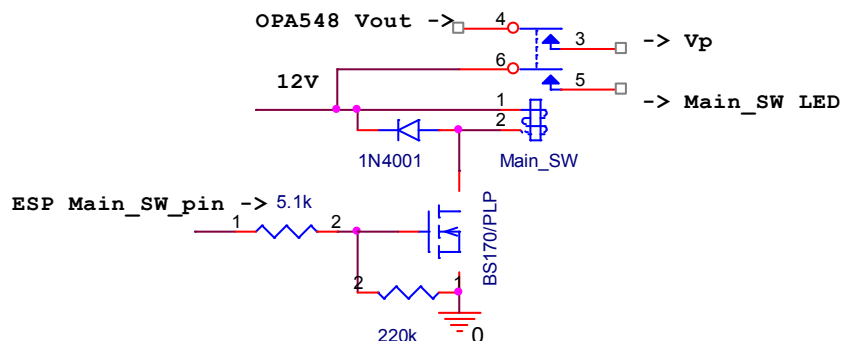
Επιλέχθηκαν ρελέ τυπωμένου κυκλώματος διπλών επαφών (DPDT) 12V/2A. Η μία επαφή χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του κυκλώματος των αντιστάσεων. Η δεύτερη χρησιμοποιήθηκε για την ενεργοποίηση ενδεικτικού μικρού LED 3 mm που δείχνει αν η κάθε αντίσταση είναι σε τιμές από 0 έως $1k\Omega$, ή είναι άπειρη (ανοιχτό κύκλωμα, ηλεκτρικά απομονωμένος κλάδος). Σε περίπτωση ανοιχτού κυκλώματος το ενδεικτικό LED είναι σβηστό, ενώ αν η αντίσταση υπάρχει και διαρρέεται από ρεύμα, το LED είναι αναμμένο. Τονίζεται ότι όλα τα LED στους ενδείκτες 10 τομέων είναι σβηστά, τόσο στην τιμή αντίστασης $0\ \Omega$ όσο και στην τιμή άπειρο / ανοιχτό κύκλωμα. Η διαφορά αυτών των καταστάσεων φαίνεται από το μικρό ενδεικτικό LED σε κάθε αντίσταση.

Στην παρακάτω εικόνα 3.17 φαίνονται διάφοροι συνδυασμοί : Πρώτα μόνο μια αντίσταση, (κάτω αριστερά άπειρη, κάτω δεξιά μηδέν), κατόπιν δύο αντιστάσεις σε σειρά (κάτω αριστερά $1\ k\Omega$, κάτω δεξιά άπειρη) και τέλος δύο αντιστάσεις παράλληλα (πάνω αντίσταση μηδέν, κάτω αριστερά $200\ \Omega$, κάτω δεξιά $800\ \Omega$). Ο κεντρικός διακόπτης είναι ON και το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα μόνο στην δεξιότερη περίπτωση.



Εικόνα 3.17 : Μια αντίσταση, δύο αντιστάσεις σε σειρά και δύο αντιστάσεις παράλληλα

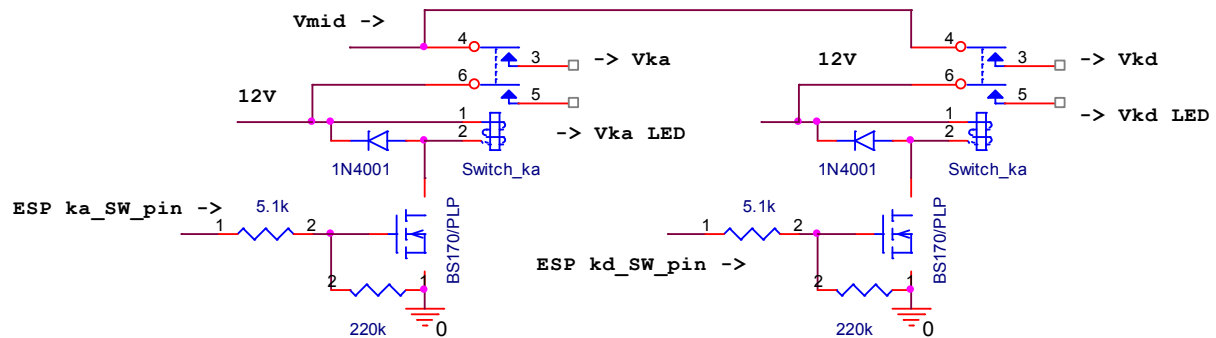
Τοποθετήθηκε ένα πράσινο LED στην πάνω αντίσταση που δείχνει την κατάσταση του κεντρικού διακόπτη και δύο κόκκινα LED στις κάτω αντιστάσεις. Η συνδεσμολογία για το ρελέ της πάνω αντίστασης φαίνεται στην εικόνα 3.18



Εικόνα 3.18 : Συνδεσμολογία ρελέ πάνω αντίστασης

Ο έλεγχος του MOSFET από το μικροελεγκτή γίνεται μέσω του ακροδέκτη `Main_SW_pin` που αντιστοιχεί στην έξοδο με το ψευδώνυμο (definition name) `MainLED_pin` και αντιστοιχεί στον ακροδέκτη 27 του μικροελεγκτή, μέσω τάσεων 0 και 3.3 V. Η μία επαφή του ρελέ συνδέει την έξοδο του τελεστικού παραγωγής τάσης με το πάνω σημείο του αστέρα των αντιστάσεων και η δεύτερη επαφή συνδέει τα 12 V στο πράσινο LED μέσω μιας αντίστασης 1kΩ.

Για τις δύο κάτω αντιστάσεις το κύκλωμα είναι παρόμοιο, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.19.



Εικόνα 3.19 : Συνδεσμολογία ρελέ κάτω αντιστάσεων

Και εδώ ο έλεγχος των MOSFET γίνεται μέσω των ακροδεκτών `ka_SW_pin` που αντιστοιχεί στην έξοδο `LEDka_pin` (ακροδέκτης 12 του ESP32) και `kd_SW_pin` (έξοδος `LEDkd_pin`, ακροδέκτης 13). Η μία επαφή του κάθε ρελέ συνδέει το μέσο του αστέρα των αντιστάσεων με το πάνω μέρος της κάθε μιας από τις δύο κάτω αντιστάσεις ενώ η δεύτερη συνδέει τα 12 V σε καθένα από τα μικρά κόκκινα LED μέσω μιας αντίστασης 1kΩ. Στην εικόνα 3.20 φαίνεται το τμήμα κυκλώματος των 3 ρελέ, μαζί με τα διακοπικά κυκλώματα που τα ελέγχουν.

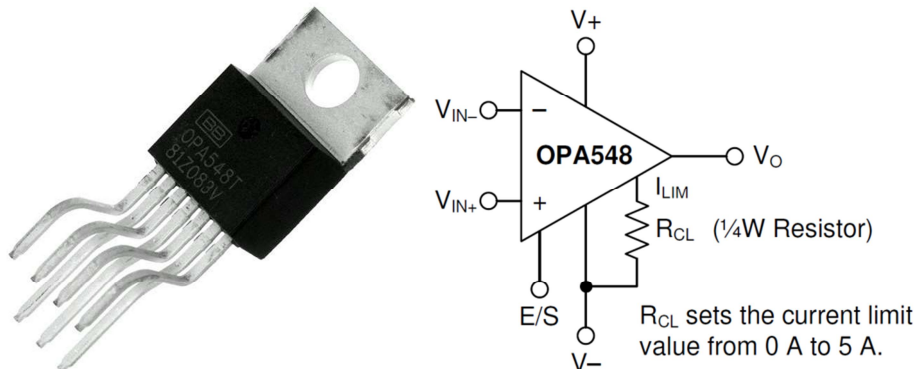


Εικόνα 3.20 : Ρελέ ελέγχου αντιστάσεων

3.6 Τροφοδοσία εξαρτημάτων

Για την παραγωγή των επιθυμητών τάσεων χρησιμοποιήθηκαν 2 τελεστικοί ενισχυτές ρυθμιζόμενης τάσης εξόδου OPA548 [10] (εικόνα 3.21, είναι οι τελεστικοί της σειράς που χρησιμοποιείται στα τροφοδοτικά μεταβλητής τάσης εξόδου κινεζικής κατασκευής). Ο πρώτος χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή της τάσης 3.3 V για την τροφοδοσία του ESP32 και της TFT οθόνης και ο δεύτερος για την

παραγωγή της μεταβλητής τάσης για εφαρμογή στο πάνω άκρο του αστέρα των τριών μεταβλητών αντιστάσεων.



Εικόνα 3.21 : Ο τελεστικός ενισχυτής OPA548

Ο συγκεκριμένος τελεστικός, με μέγιστο ρεύμα εξόδου τα 3 A, έχει τα εξής βασικά χαρακτηριστικά [10].

- Μονοπολική τροφοδοσία : 8 V - 60 V
- Μέγιστο ρεύμα : 3 A (5 A peak)
- Ρεύματα εισόδων τελεστικού (Input bias current) : 0.5 μ A max
- Ρυθμιζόμενη τάση εξόδου
- Ρυθμιζόμενο μέγιστο ρεύμα εξόδου
- Απενεργοποίηση στους 160⁰ C
- Δυνατότητα ανίχνευσης απενεργοποίησης λόγω υπερθέρμανσης, ή ελεγχόμενης απενεργοποίησης του τελεστικού εάν ο συγκεκριμένος ακροδέκτης χρησιμοποιηθεί σαν είσοδος.

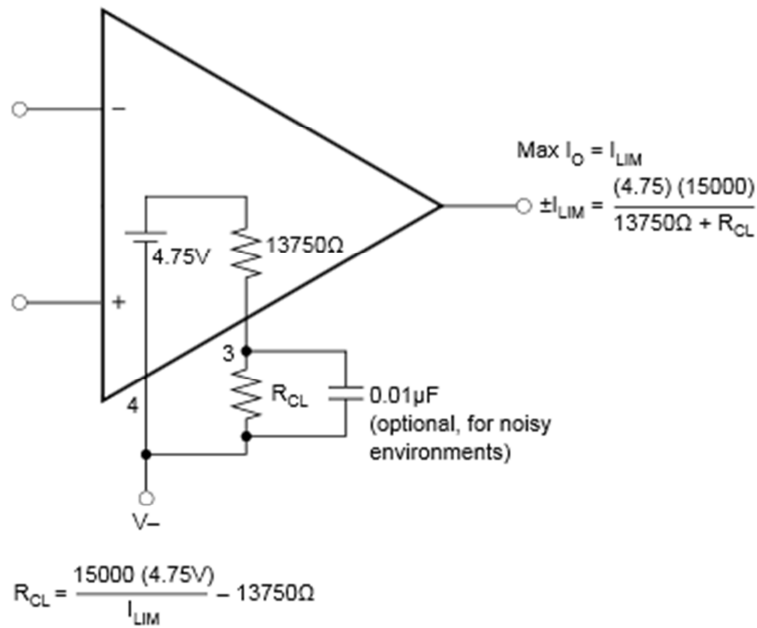
Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται συνοπτικά η λειτουργία του κάθε ακροδέκτη του τελεστικού

Πίνακας 3.7 : Λειτουργία ακροδεκτών OPA548

Pin	Όνομα	I/O	Περιγραφή
1	V _{IN+}	I	Μη αναστρέφουσα είσοδος
2	V _{IN-}	I	Αναστρέφουσα είσοδος
3	I _{LIM}	I	Έλεγχος μέγιστου ρεύματος εξόδου
4	V-	I	Αρνητική τροφοδοσία
5	V+	I	Θετική τροφοδοσία
6	V _O	O	Έξοδος
7	E/S	I/O	Είσοδος : Ενεργοποίηση/απενεργοποίηση τελεστικού. Έξοδος : Κατάσταση απενεργοποίησης λόγω υπερθέρμανσης

3.6.1 Συνδεσμολογία για την παραγωγή 3.3 V

Σύμφωνα με τον κατασκευαστή, ο τελεστικός παράγει μια σταθερή τάση αναφοράς ανάμεσα στους ακροδέκτες 3 (I_{LIM}) και 4 (V-) με την παρεμβολή μιας αντίστασης 13.75 k Ω (εικόνα 3.22)

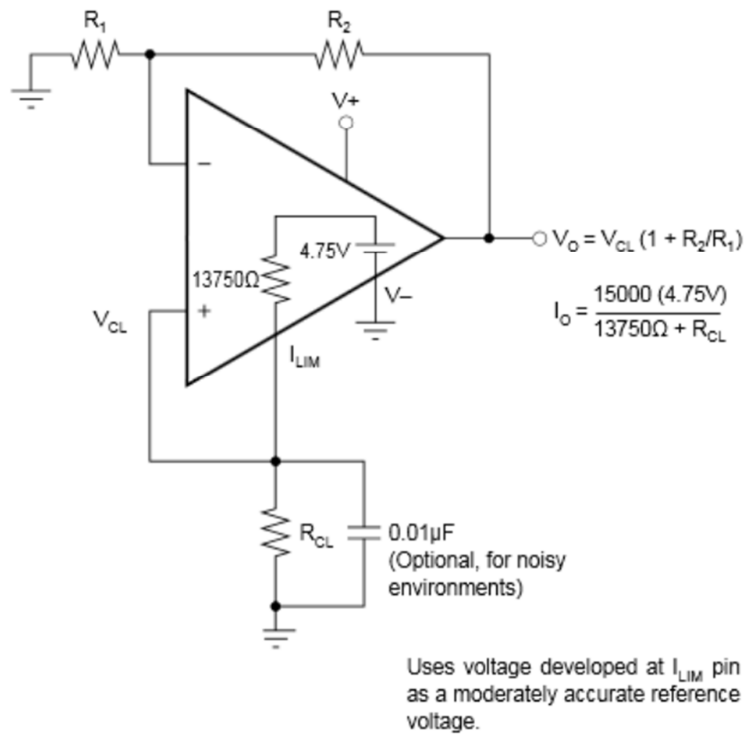


Εικόνα 3.22 : Ρύθμιση μεγίστου ρεύματος στον OPA548

Η εξίσωση για την εύρεση της αντίστασης ρύθμισης ορίου ρεύματος (R_{CL}) δίνεται από τον κατασκευαστή. Για την τάση 3.3 V αποφασίστηκε να επιτραπεί ρεύμα ίσο με το μέγιστο ρεύμα συνεχούς ομαλής λειτουργίας δηλαδή τα 3 A, θεωρώντας ότι δε θα μας δημιουργήσουν προβλήματα ο μικροελεγκτής ESP32 και η TFT οθόνη που χρειάζονται μικρά σχετικά ρεύματα για να λειτουργήσουν (πίνακας 3.1). Αντικαθιστώντας στην παραπάνω εξίσωση προκύπτει :

$$R_{CL} = \frac{15000 \cdot (4.75 \text{ V})}{3 \text{ A}} - 13.75 \text{ k}\Omega = 23.75 \text{ k}\Omega - 13.75 \text{ k}\Omega = 10 \text{ k}\Omega \quad (3-6)$$

Η τάση στη έξοδο κάθε τελεστικού ενισχυτή μπορεί να ρυθμιστεί με ένα διαιρέτη τάσης ανάμεσα στην έξοδο, την αναστρέφουσα είσοδο και τη γη (στη δική μας σχεδίαση $V_- = 0$).



Εικόνα 3.23 : Προτεινόμενη σύνδεση στη μη αναστρέφουσα είσοδο

Προτείνεται η χρήση της τάσης που εμφανίζεται στον ακροδέκτη I_{LIM} σαν μια τάση αναφοράς ακριβείας για σύνδεση στη μη αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού (εικόνα 3.23). Η τάση αυτή στην περίπτωση μας είναι :

$$V_{CL} = \frac{R_{CL}}{13.75 + R_{CL}} \cdot 4.75 \text{ V} = \frac{10 \text{ k}\Omega}{13.75 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega} \cdot 4.75 \text{ V} = 2\text{V} \quad (3-7)$$

Η έξοδος θα είναι :

$$V_O = V_{CL} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (3-8)$$

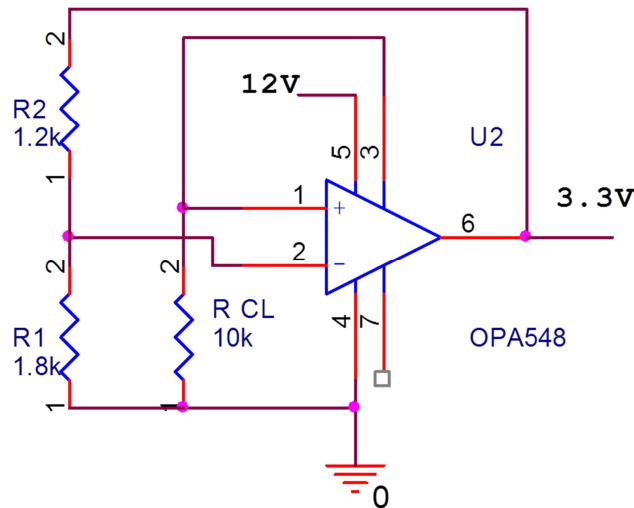
όπου R_1 και R_2 οι αντιστάσεις του διαιρέτη τάσης και το $1 + \frac{R_2}{R_1}$ το κέρδος του ενισχυτή. Ο λόγος των αντιστάσεων θα είναι :

$$V_O = V_{CL} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \Rightarrow \frac{V_O}{V_{CL}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow \frac{V_O}{V_{CL}} - 1 = \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow \frac{R_2}{R_1} = \frac{3.3 \text{ V}}{2 \text{ V}} - 1 = 0.65 \quad (3-9)$$

Λαμβάνοντας υπόψη μας τις συνηθισμένες τιμές των αντιστάσεων που κυκλοφορούν στο εμπόριο βλέπουμε ότι οι τιμές 1.8 και 1.2 kΩ έχουν λόγο $2/3=0.667$, μια καλή προσέγγιση χωρίς να είναι οι μοναδικές. Με αυτές τις τιμές η έξοδος είναι :

$$V_O = V_{CL} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) = 2\text{V} \left(1 + \frac{1.8 \text{ k}\Omega}{1.2 \text{ k}\Omega} \right) = 3.33 \text{ V} \quad (3-10)$$

Σημειώνεται ότι ο ακροδέκτης 7 (Enable/Status) μπορεί να αφηθεί χωρίς σύνδεση ή να συνδεθεί σε τάση πάνω από 2.4 V για φυσιολογική λειτουργία. Αποφασίστηκε να αφηθεί χωρίς σύνδεση. Το τμήμα του κυκλώματος παραγωγής τάσης 3.3 V φαίνεται στην εικόνα 3.24.

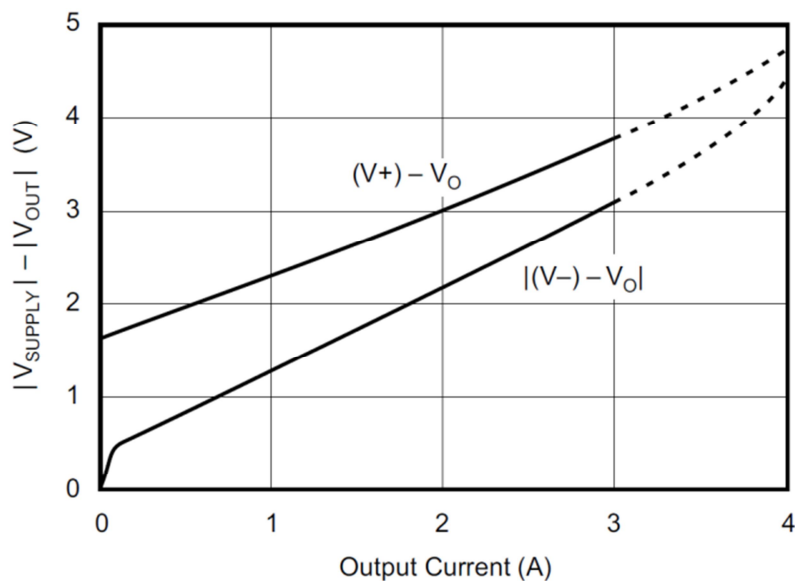


Εικόνα 3.24 : Κύκλωμα παραγωγής τάσης 3.3 V

3.6.2 Συνδεσμολογία για την παραγωγή 0 έως 10 V

Για τη μεταβαλλόμενη/ρυθμιζόμενη από τον χρήστη τάση από 0 έως 10 V αποφασίστηκε και πάλι να επιτραπεί ρεύμα ίσο με το μέγιστο ρεύμα συνεχούς ομαλής λειτουργίας δηλαδή τα 3A. Η R_{CL} θα είναι και πάλι (εξίσωση 3.6) $10\text{ k}\Omega$.

Για την αξιόπιστη λειτουργία του τελεστικού, η τάση εξόδου του δεν μπορεί να είναι πολύ κοντά στην τάση τροφοδοσίας. Με βάση τα γραφήματα που δίνονται από τον κατασκευαστή [10] (εικόνα 3.25) και με δεδομένο το πολύ μικρό απαιτούμενο ρεύμα εξόδου (100 mA), βλέπουμε ότι η έξοδος με τροφοδοσία 12 V δεν μπορεί να υπερβεί τα $12.0\text{ V} - 1.7\text{ V} = 10.3\text{ V}$ περίπου. Έτσι θέτουμε ως πάνω όριο της παραγόμενης τάσης τα 10 V.



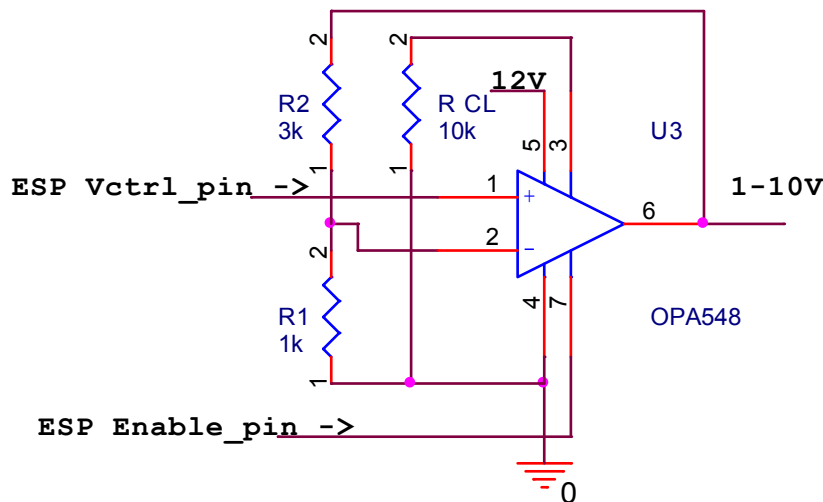
Εικόνα 3.25 : Όρια τάσεων εξόδου σε σχέση με την τάση τροφοδοσίας

Σαν κάτω όριο φαίνεται ότι και για μικρά ρεύματα η απόσταση ασφαλείας είναι περίπου 0.5V από τη γη, το V- στην παρούσα σχεδίαση. Έτσι ως κάτω όριο της παραγόμενης τάσης τίθεται το 1V. Η τάση 0 μπορεί παρ' όλα αυτά να παραχθεί απενεργοποιώντας το ολοκληρωμένο (Να τονίσουμε εδώ ότι η τάση εξόδου με τον τελεστικό απενεργοποιημένο είναι στην πραγματικότητα περίπου 0.35V). Με τα δεδομένα αυτά τίθενται τα όρια που αναφέρθηκαν αρχικά, δηλαδή 0 έως 10V. Η τάση αποφασίστηκε να μεταβάλλεται σε βήματα του ενός Volt, εφόσον το κύκλωμα σχεδιάστηκε για απομακρυσμένη εκπαιδευτική χρήση και κρίθηκε ότι οι ενδιάμεσες τάσεις δε θα προσέφεραν σημαντικά οφέλη στον εκπαιδευόμενο δίνοντάς του τη δυνατότητα να επιλέγει μη ακέραιες τιμές.

Για τον έλεγχο της τάσης εξόδου του τελεστικού χρησιμοποιήθηκε, όπως έχει ήδη ειπωθεί, μια από τις δύο αναλογικές εξόδους του μικροελεγκτή. Οι τάσεις εξόδου του ESP32 είναι από 0 έως 3.3V. Οι τιμές τάσεων εισόδου οι οποίες επιλέχθηκαν είναι 0.25V (για έξοδο 1V) έως 2.5V (για έξοδο 10V). Το κέρδος (Gain) του ενισχυτή θα πρέπει τώρα να είναι 4 (10/2.5).

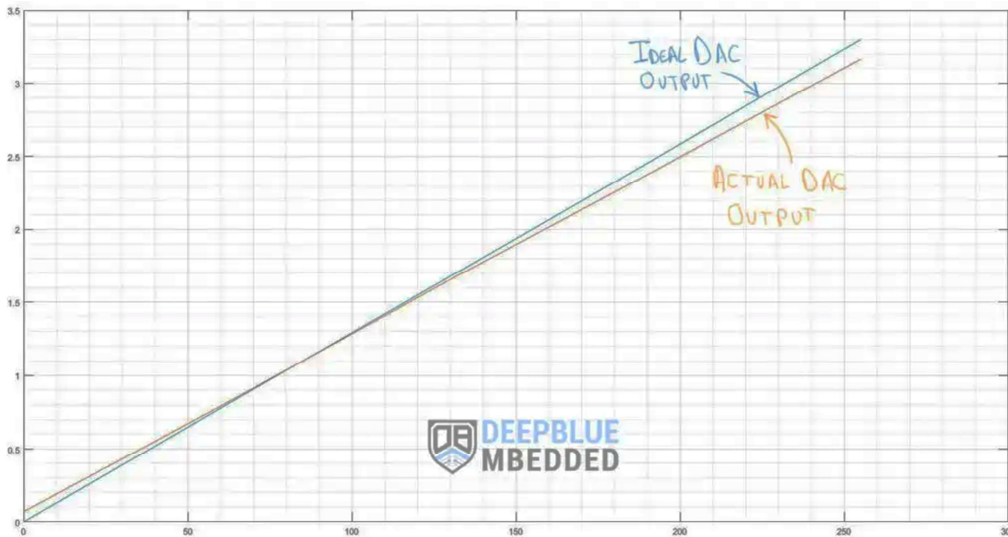
$$G = 1 + \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow \frac{R_2}{R_1} = G - 1 = 4 - 1 \Rightarrow \frac{R_2}{R_1} = 3 \quad (3-11)$$

Για να επιτευχθεί η αναλογία χωρίς μεγάλα σφάλματα, από ένα σύνολο καλής ποιότητας αντιστάσεων του 1kΩ (ανοχή ≤1%), μετά από αρκετές μετρήσεις ώστε να βρίσκονται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στην επιθυμητή τιμή των 1000 Ω, επιλέχθηκαν τέσσερις από αυτές. Οι τρεις συνδέθηκαν σε σειρά, για να αποτελέσουν την R₂ και η μία τοποθετήθηκε στη θέση της R₁. Το τελικό κύκλωμα παραγωγής ρυθμιζόμενης τάσης φαίνεται στην εικόνα 3.26.



Εικόνα 3.26 : Κύκλωμα παραγωγής ρυθμιζόμενης τάσης

Δυστυχώς, η αναλογική έξοδος αν και προσφέρει μια σχετικά αποδεκτή γραμμικότητα, δεν είναι τόσο αξιόπιστη ως προς την τιμή εξόδου αυτή καθ' αυτή. Αυτό οφείλεται στην αξιοπιστία του ενσωματωμένου στο μικροελεγκτή Ψηφιοαναλογικού μετατροπέα (Digital-to-Analog Converter) [11], όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.27.



Εικόνα 3.27 : Συμπεριφορά της αναλογικής εξόδου του ESP32

Έτσι, ενώ η απαιτούμενη είσοδος θα έπρεπε να δίνεται από τον τύπο (με δεδομένο ότι Gain=4) :

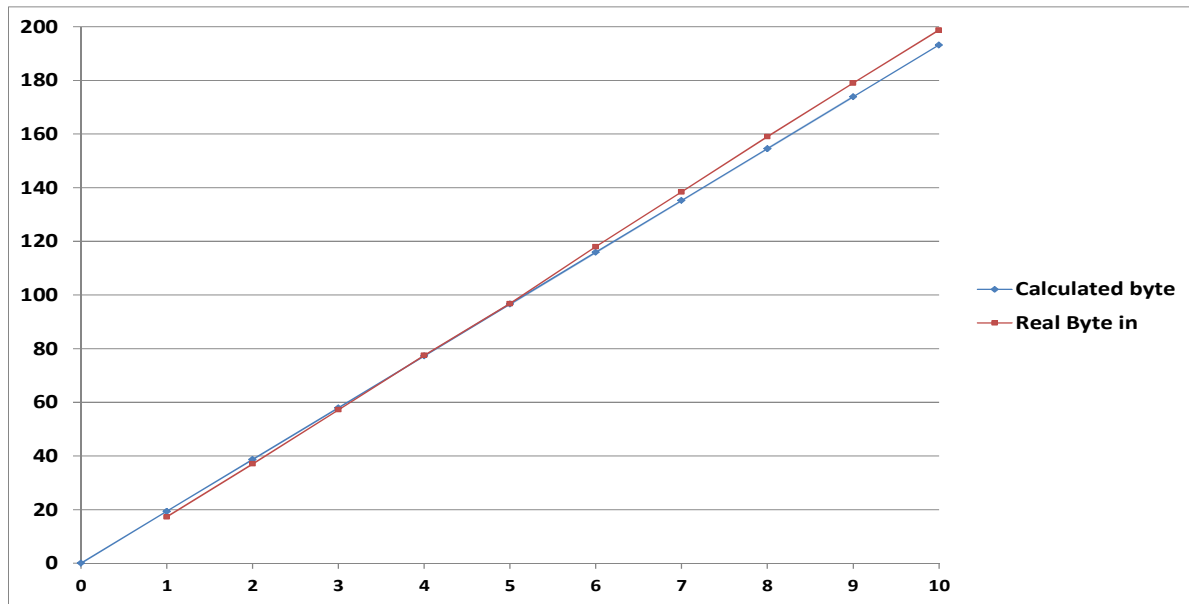
$$V_{in} = \left[\frac{255}{3.3} \cdot \frac{V_{out}}{4} \right] \quad (3-12)$$

στην πραγματικότητα είναι λίγο διαφορετική. Μετά από μετρήσεις με πραγματικό βολτόμετρο 2½ ψηφίων (όχι με την ένδειξη του ενσωματωμένου στην κατασκευή αναλογικού οργάνου), οι τιμές που έπρεπε να δοθούν για μέγιστη ακρίβεια φαίνονται στον πίνακα 3.8 στη στήλη Real Byte in.

Πίνακας 3.8 : Απαιτούμενη είσοδος στον DAC για τις επιθυμητές τάσεις εξόδου

Vout (V)	Calculated byte	Cb (Calculated byte) : 255 * Vout / 4 / 3,3	Vci : Vout with calculated input	Adapted Cb : Cb * Vout / Vci	Real Byte in
0	0	0,0	0,12	0	
1	19	19,3	1,12	17,25	17
2	39	38,6	2,12	36,45	37
3	58	58,0	3,04	57,19	57
4	77	77,3	3,99	77,47	77
5	97	96,6	4,99	96,78	97
6	116	115,9	5,92	117,48	118
7	135	135,2	6,84	138,39	138
8	155	154,5	7,81	158,31	159
9	174	173,9	8,77	178,42	179
10	193	193,2	9,72	198,75	199

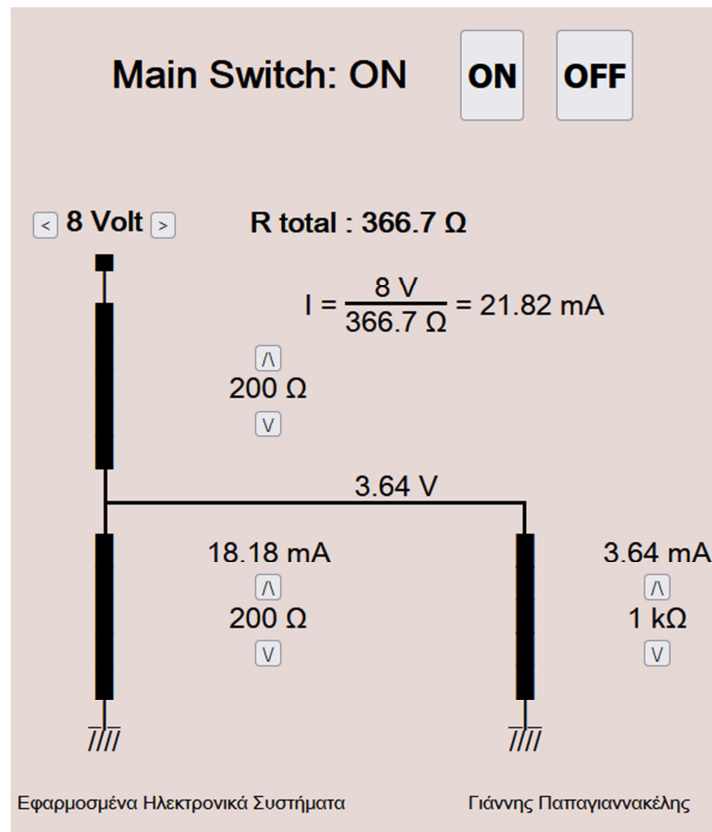
Η γραφική απεικόνιση των παραπάνω τιμών (εικόνα 3.28) επιβεβαιώνει τις αποκλίσεις στην εικόνα 3.27, στο deepbluembedded.com



Εικόνα 3.28 : Απαιτούμενες τιμές εισόδου στον DAC σε σχέση με τις υπολογισθείσες

Κεφάλαιο 4ο: Ιστοσελίδα - έλεγχος μικροελεγκτή

Ο έλεγχος του κυκλώματος γίνεται με τη βοήθεια μιας ιστοσελίδας, πάνω στην οποία απεικονίζονται τα τρέχοντα στοιχεία του κυκλώματος (αντιστάσεις, εφαρμοζόμενη τάση) και δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να τα μεταβάλλει χρησιμοποιώντας εικονικά πλήκτρα (buttons). Κατόπιν τα αποτελέσματα, δηλαδή οι νέες τιμές των ρευμάτων, απεικονίζονται απευθείας και στη σελίδα, πέρα από την ενσωματωμένη οθόνη του κυκλώματος.



Εικόνα 4.1 : Η ιστοσελίδα ελέγχου του κυκλώματος

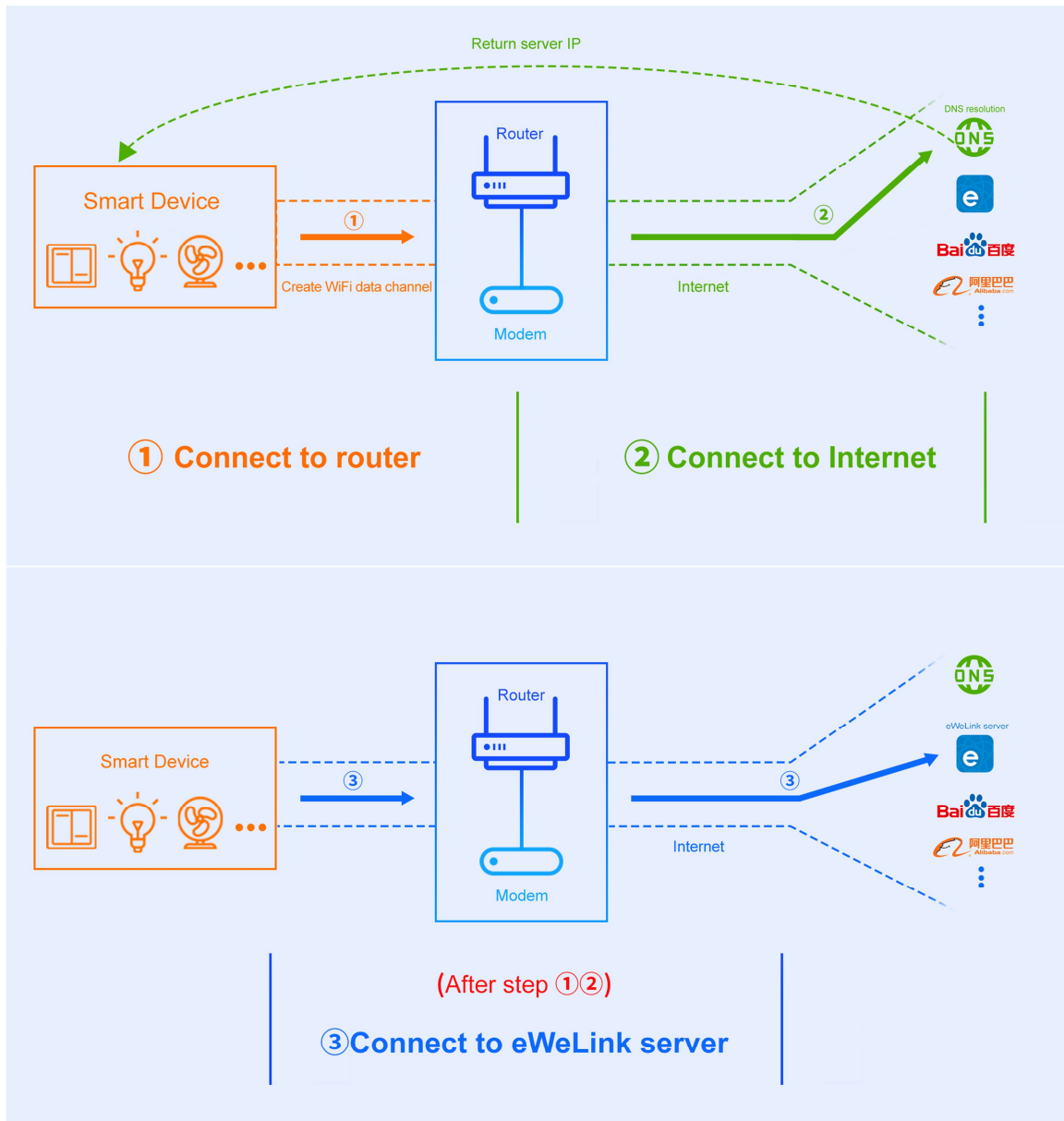
Η σελίδα είναι απλή, χωρίς γραφικά και έχει δημιουργηθεί σχεδόν αποκλειστικά με πίνακες σε HTML (συγχωνεύσεις κελιών, επιλογή περιγραμμάτων τους) και χαρακτήρες ASCII.

Επιπλέον έλεγχο του συστήματος θα μπορούσαμε να έχουμε με μερικά πλήκτρα τα οποία θα ενσωματώνονταν στο κύκλωμα και θα μπορούσαν να επηρεάσουν τις τιμές αντιστάσεων και εφαρμοζόμενης τάσης. Εφόσον το κύκλωμα θα πρέπει να ελέγχεται πλήρως από μακριά, η ύπαρξη της δυνατότητας αυτής απορρίφθηκε, παρότι η πολυπλοκότητα του τελικού κυκλώματος δεν θα αύξανε σημαντικά. Έτσι οι αρχικές τιμές τάσης και αντιστάσεων δίνονται κατά την έναρξη του προγράμματος και μπορούν να αλλάξουν μόνο μετά από ενημέρωση αρχικών τιμών, επαναμεταγλώττιση και μεταφόρτωση του προγράμματος στο μικροελεγκτή. Θα μπορούσε ακόμη να αποθηκευτεί στη μνήμη flash του μικροελεγκτή, μήκους 512 bytes, η τρέχουσα κατάσταση ώστε μετά από επανεκκίνηση ο μικροελεγκτής να επανέρχεται στην κατάσταση στην οποία βρισκόταν πριν απ' αυτήν. Θα χρειαζόμασταν τη βιβλιοθήκη EEPROM library και μερικές εντολές ενημέρωσης κατάστασης / εγγραφής στη μνήμη αυτή μετά από κάθε αλλαγή παραμέτρου και κάποιες εντολές ανάγνωσης της παραπάνω μνήμης κατά την εκκί-

νηση. Η δυνατότητα αυτή επίσης απορρίφθηκε έτσι ώστε ο μικροελεγκτής να ξεκινά κάθε φορά τη λειτουργία του με τις ίδιες αρχικές τιμές που έχουν καθοριστεί στο πρόγραμμα.

Η ιστοσελίδα μέσω της οποίας ο χρήστης ελέγχει τις μεταβλητές του κυκλώματος θα πρέπει να βρίσκεται σε μια συσκευή (server) η οποία θα είναι σε λειτουργία κατά τη λειτουργία του κυκλώματος. Μια λύση θα ήταν να χρησιμοποιούσαμε κάποιον server φιλοξενίας ιστοσελίδων από τους πολλούς οι οποίοι υπάρχουν, δωρεάν ή επί πληρωμή. Όμως, όπως θα δούμε παρακάτω, μια από τις απαιτήσεις επικοινωνίας του συστήματος είναι η άμεση και ανεμπόδιστη πρόσβαση του server σε όλες τις συσκευές (clients) συνδεδεμένες σ' αυτόν. Παρότι το αντίστροφο (πρόσβαση clients σε εξωτερικό server) είναι απλό και αυτονόητο σε όλα τα οικιακά δίκτυα, η πρόσβαση του server στους clients δεν είναι απλή. Αυτό γίνεται για λόγους ασφαλείας έτσι ώστε κάποιος έξω από το τοπικό (οικιακό) μας δίκτυο να μην έχει πρόσβαση στις συσκευές μας. Για να λυθεί το πρόβλημα θα πρέπει να ρυθμιστεί ο οικιακός μας router έτσι ώστε να επιτρέπει την πρόσβαση από εξωτερικά δίκτυα. Αυτό μπορεί να γίνει είτε με την τεχνική port forwarding είτε με την DMZ (Demilitarized Zone - αποστρατιωτικοποιημένη ζώνη) είτε με όποια άλλη τεχνική έχει υλοποιήσει για αυτό το σκοπό η εταιρία κατασκευής λογισμικού του router. Οι παραπάνω τεχνικές, σε γενικές γραμμές, κατευθύνουν εξωτερικά αιτήματα απευθυνόμενα σε συγκεκριμένες πόρτες, σε κάποια εσωτερική διεύθυνση IP που έχει οριστεί για αυτό. Η υλοποίηση συνήθως δεν είναι εύκολη, εφόσον οι εταιρίες - πάροχοι απαιτούν να δοθεί άδεια από τους ίδιους μετά από επικοινωνία μαζί τους, δηλαδή να ανοίξουν αυτοί τις πόρτες του δικού μας router, είτε διάφορα άλλα θέματα τα οποία προκύπτουν όπως ένα επιπλέον επίπεδο NAT μετά το router μας που υλοποιείται για μεγαλύτερη οικονομία IP διευθύνσεων από τον πάροχο. Όλα αυτά σε συνδυασμό με τη μεταβαλλόμενη/δυναμική εξωτερική διεύθυνση IP του οικιακού router μας, καθιστούν το εγχείρημα δύσκολο.

Η λύση την οποία υιοθετούν οι περισσότερες εταιρείες κατασκευής προϊόντων αυτοματισμού/παρακολούθησης σπιτιού, είναι η αποστολή δεδομένων από τα προϊόντα αυτά σε κάποιον εταιρικό server (πολλές φορές αυτός βρίσκεται στην Κίνα). Έτσι ο κάτοχος του προϊόντος δε συνδέεται απ' ευθείας με τη συσκευή του σπιτιού του, ακόμη κι αν ο ίδιος βρίσκεται μέσα στο σπίτι του, δηλαδή στο ίδιο τοπικό δίκτυο, αλλά με τον εταιρικό sever. Π.χ. στην εταιρεία οικιακού αυτοματισμού SON-OFF η διαδικασία εξηγείται σε βήματα, για να βοηθήσει το χρήστη σε περίπτωση προβλημάτων σύνδεσης και περιλαμβάνει ακόμη και τη διαδικασία εύρεσης της διεύθυνσης IP του server (eWeLink server) ο οποίος φιλοξενεί την εφαρμογή που εξυπηρετεί τις συσκευές (εικόνα 4.2) [12].



Εικόνα 4.2 : Διαδικασία σύνδεσης στο server που εξυπηρετεί τις συσκευές SONOFF

Στις περιπτώσεις καμερών IP, ο αντίστοιχος server θα πρέπει να βρίσκεται σχετικά κοντά στη συσκευή, δηλαδή όχι σε πολύ μεγάλη γεωγραφική απόσταση, εφόσον τα αποστελλόμενα δεδομένα είναι μεγάλου όγκου (streaming). Ειδικά για αυτές υπάρχει δυνατότητα αποστολής δεδομένων σε συσκευή του τοπικού δικτύου, συνήθως υπολογιστή, μέσω του πρωτοκόλλου rtsp (Real Time Streaming Protocol), με υποτυπώδη ασφάλεια [13]. Η δυνατότητα αυτή αξιοποιήθηκε και στην παρούσα εργασία για την απεικόνιση της IP κάμερας που παρακολουθεί το κύκλωμα. Τονίζεται στο σημείο αυτό, ότι τα προγράμματα ελέγχου και παρακολούθησης συσκευών αυτοματισμού ή καμερών κατασκευάζονται σχεδόν αποκλειστικά για κινητές συσκευές (Android / iOS) και δεν υπάρχει πρόβλεψη για PC. Χαρακτηριστικά, η εταιρεία tapo, κορυφαίος κατασκευαστής IP καμερών προτείνει, σε οικιακές/μη εταιρικές υλοποιήσεις τη χρήση προσομοιωτή Android, δηλαδή εικονικής μηχανής, για τον έλεγχο της κάμερας από υπολογιστή. Αυτό οφείλεται προφανώς στην αλματώδη διάδοση της χρήσης κινητών συσκευών για όλες σχεδόν τις δουλειές και το μειωμένο ενδιαφέρον ελέγχου προϊόντων αυτοματισμού από υπολογιστές.

Με βάση τα παραπάνω και με δεδομένα τα θέματα ασφαλείας που προκύπτουν από τη σύνδεση του κυκλώματος της εργασίας με εξωτερικούς servers, θέματα τα οποία αποτελούν αντικείμενο ασφαλείας πληροφοριακών συστημάτων, κάτι που ξεφεύγει από το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, αποφασίστηκε η ιστοσελίδα να φιλοξενείται στο τοπικό δίκτυο.

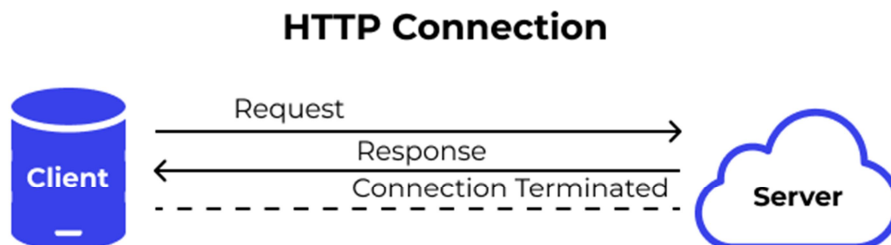
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η ιστοσελίδα θα πρέπει να βρίσκεται σε μια συσκευή η οποία θα είναι σε λειτουργία κατά το χρόνο λειτουργίας του κυκλώματος. Οι μόνες συσκευές σίγουρα σε λειτουργία σε οποιοδήποτε χρόνο μας ενδιαφέρει είναι ο router και ο ίδιος ο μικροελεγκτής. Εφ' όσον οι οικιακοί router δεν προσφέρονται για φιλοξενία ιστοσελίδων η λύση που αποφασίστηκε είναι η σελίδα να φιλοξενείται στο μικροελεγκτή. Γι' αυτό το λόγο κατασκευάστηκε με απλό τρόπο, ώστε να είναι σχετικά μικρή σε όγκο. (~ 9.5 KBytes)

4.1 Πρωτόκολλο επικοινωνίας - χρόνοι απόκρισης

Η σημαντικότερη απαίτηση από πλευράς λογισμικού είναι η αμεσότητα στους χρόνους επικοινωνίας. Όπως έχει ήδη ειπωθεί, στην κλασική περιήγηση σε ιστοσελίδες, η επαναφόρτωση / ανανέωση της σελίδας που βρίσκεται στο server γίνεται πάντα, για λόγους ασφαλείας, με αίτημα του πελάτη. Επομένως, όσο γρήγορα ή συχνά και αν ανανεώνονται τα περιεχόμενα της σελίδας, αυτό δεν είναι ορατό στον πελάτη αν ο ίδιος ο πελάτης δεν αποστέλλει ένα αίτημα ανανέωσης. Κάτι τέτοιο δημιουργεί πρόβλημα σε εφαρμογές στις οποίες χρειάζεται άμεση ενημέρωση του πελάτη (π.χ. εφαρμογές chat). Ένας τρόπος να λυθεί το πρόβλημα αυτό είναι η τεχνική polling, δηλαδή, η ανά τακτά - μικρά- χρονικά διαστήματα ερώτηση από μέρος του υπολογιστή - πελάτη αν έχει αλλάξει κάτι στη σελίδα, κάτι το οποίο συνεπάγεται αυξημένο φόρτο εργασίας τόσο στον πελάτη όσο και στο δίκτυο. Επιπλέον όσο μικρός κι αν είναι ο χρόνος μεταξύ των ερωτήσεων, η επικοινωνία δεν είναι άμεση. Οι βασικές διαφορές του πρωτοκόλλου HTTP το οποίο χρησιμοποιείται συνήθως και της τεχνικής που θα χρησιμοποιήσουμε εξηγείται παρακάτω.

4.1.1 Πρωτόκολλο HTTP

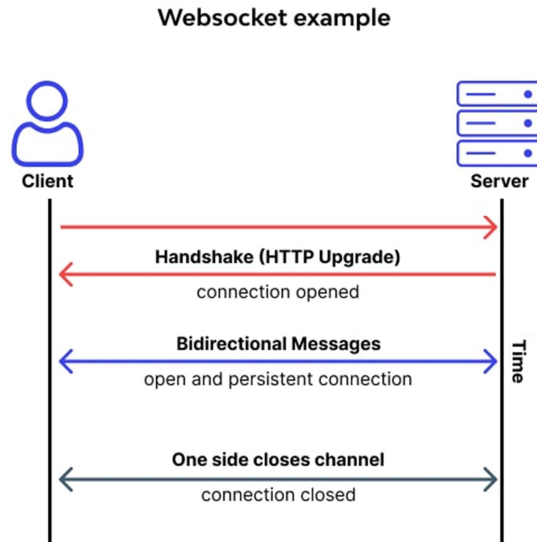
Το HTTP (HyperText Transfer Protocol) είναι ένα πρωτόκολλο αιτήματος-απόκρισης. Οι πελάτες (συνήθως τα προγράμματα περιήγησης ιστού), στέλνουν αιτήματα HTTP στον διακομιστή και ο διακομιστής απαντά με τα ζητούμενα δεδομένα. Είναι ένα πρωτόκολλο χωρίς σταθερή κατάσταση (stateless), κάτι που σημαίνει ότι κάθε αίτημα είναι ανεξάρτητο από προηγούμενα αιτήματα και δεν διατηρείται μόνιμη σύνδεση. Επομένως για διαδοχικά αιτήματα είναι απαραίτητη η αρχικοποίηση και αποκατάσταση σύνδεσης μεταξύ των υπολογιστών η οποία τερματίζεται αυτόματα, αμέσως μετά την απόκριση (εικόνα 4.3) [14].



Εικόνα 4.3 : Λειτουργία του πρωτοκόλλου HTTP

4.1.2 WebSockets

Η τεχνική WebSockets, παρέχει πλήρη διασύνδεση, επιτρέποντας σε πραγματικό χρόνο, αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ του πελάτη και του διακομιστή. Δημιουργείται μια μόνιμη σύνδεση που παραμένει, επιτρέποντας την αποστολή και λήψη δεδομένων και προς τις δύο κατευθύνσεις. Η σύνδεση τερματίζεται μετά από αίτημα οποιουδήποτε από τα δύο συναλλασσόμενα μέρη (εικόνα 4.4) [15].



Εικόνα 4.4 : Λειτουργία της τεχνικής Websockets

Να σημειωθεί εδώ ότι η τεχνική Websockets βασίζεται πάνω στο πρωτόκολλο HTTP. Το τμήμα του κώδικα της εφαρμογής το οποίο αφορά το πρωτόκολλο επικοινωνίας, είναι αρκετά απλό με χρήση των έτοιμων βιβλιοθηκών και παρατίθεται παρακάτω.

```

. . . . .
#include <WiFi.h> // Include WiFi Library for ESP32
#include <WebServer.h> // Include WebSwever Library for ESP32
#include <ArduinoJson.h> // Include ArduinoJson Library
#include <WebSocketsServer.h> // Include WebSocket Library

WebServer server(80); // create instance for web server on port "80"
WebSocketsServer webSocket = WebSocketsServer(81);
    //create instance for webSocket server on port"81"

String web; // holds Web page Content
String jsonString; // Temporary storage for the JSON String
. . . . .
web = " <!DOCTYPE html> <html> . . . . </html> " // web <- Web page Content
server.on("/", []() { server.send(200, "text/html", web); });
    // Initialize a web server on the default IP address and send the webpage as a response.
server.begin(); // init the server
webSocket.begin(); // init the Websocketserver
webSocket.onEvent(webSocketEvent);
    // init the webSocketEvent function when a websocket event occurs
update_webpage();
. . . . .
void webSocketEvent( . . . . )
{
. . .
    // check client response (character) and call the function needed
. . .
}

```

```

void update_webpage ()
{
    StaticJsonDocument<350> doc; // create an object 350 bytes long
    JsonObject object = doc.to<JsonObject>();
    . . .
    object["VOLT"] = Volt; // prepare the string with needed values
    . . .
    serializeJson(doc, jsonString);
    // serialize the object and save the result to the string variable.
    websocket.broadcastTXT(jsonString); // send the JSON object through the websocket
    jsonString = ""; // clear the String.
}

```

4.2 Λειτουργία του προγράμματος

Η βασική λειτουργία του προγράμματος, με τις χρησιμοποιούμενες συμβάσεις περιγράφεται σε γενικές γραμμές παρακάτω.

Πίνακας 4.1 : Βασικός Αλγόριθμος του προγράμματος

Βήμα	Λειτουργία	Υποπρόγραμμα που υλοποιεί την λειτουργία
1.	Αρχικοποιήσεις : Σειριακή διασύνδεση (για έλεγχο), Οθόνη TFT, έξοδοι του μικροελεγκτή. Μηδενισμός / αποσύνδεση εξόδων	setup
2.	Έλεγχος των τριών ρελέ που ελέγχουν κάθε αντίσταση.	relays_test
3.	Σύνδεση στο τοπικό δίκτυο.	find_Networks, Connect to WiFi
4.	Αρχικοποίηση / φόρτωση ιστοσελίδας. Εμφάνιση IP μικροελεγκτή.	init_webpage
5.	Εφαρμογή τάσεων για έλεγχο ενσωματωμένου βολτομέτρου.	test_Voltage
6.	Εφαρμογή τιμών αντιστάσεων για έλεγχο απεικόνισης στην οθόνη και στους ενδείκτες LED.	test_resistor 1,2,3
7.	Ανανέωση σελίδας και εξόδων κάθε 5 δευτερόλεπτα	loop
8.	Εξυπηρέτηση αιτήματος (πάτημα πλήκτρου) από το χρήστη	websocketEvent, process_event

Η βασικότερη συνάρτηση η οποία καλείται από όλα τα γεγονότα (αντίδραση χρήστη και χρονόμετρο 5 δευτερολέπτων) είναι η `process_event`. Πριν παρουσιαστεί η λειτουργία της, θα παρουσιαστεί η συνάρτηση υπολογισμού της συνολικής αντίστασης του κυκλώματος (R_{total}), η συνάρτηση `update_current` η οποία υπολογίζει τα ρεύματα στους 3 κλάδους των αντιστάσεων (συνολικό, στον αριστερό και στο δεξιά κάτω κλάδο) και την τάση στο κέντρο του αστέρα των τριών αντιστάσεων, όπως και η συνάρτηση `current_ok` η οποία επιστρέφει σαν λογικό αποτέλεσμα αληθές, εάν το συνολικό ρεύμα είναι μέσα στα επιτρεπτά όρια. Οι παραπάνω συναρτήσεις χρησιμοποιούνται από την `process_event`. Υπενθυμίζεται ότι η πάνω αντίσταση αντιστοιχεί στη μεταβλητή R_p , η κάτω αριστερά στην R_{ka} και η κάτω δεξιά στην R_{kd} . Οι μεταβλητές αυτές όπως και η εφαρμοζόμενη τάση, όλα τα ρεύματα και η τάση στο κέντρο του αστέρα, είναι γενικές (global) μεταβλητές του προγράμματος και μεταβάλλονται άμεσα από τις συναρτήσεις που τις επηρεάζουν. Δεν περνούν, επομένως, σαν παράμετροι σε κάποια συνάρτηση.

4.2.1 Συνάρτηση υπολογισμού της συνολικής αντίστασης του κυκλώματος (R_{total})

Συνάρτηση R_{total}

Σχόλια

$if R_p = \infty \text{ then } R_{total} \leftarrow \infty$	Πάνω αντίσταση άπειρη \Rightarrow Συνολική : άπειρη
$else$	
$if R_{ka} = 0 \text{ or } R_{kd} = 0 \text{ then } R_{total} \leftarrow R_p$	Κάποια από τις δύο κάτω = 0 \Rightarrow Συνολική : η πάνω
$else$	
$if R_{ka} = \infty \text{ and } R_{kd} = \infty \text{ then } R_{total} \leftarrow \infty$	Και οι δύο κάτω άπειρες \Rightarrow Συνολική : άπειρη
$else$	
$if R_{ka} = \infty \text{ then } R_{total} \leftarrow R_p + R_{kd}$	Κάτω Αριστερή άπειρη \Rightarrow Συνολική : Πάνω + Κάτω Δεξιά
$else$	
$if R_{kd} = \infty \text{ then } R_{total} \leftarrow R_p + R_{ka}$	Κάτω Δεξιά άπειρη \Rightarrow Συνολική : Πάνω + Κάτω Αριστερή
$else$	
$R_{total} \leftarrow R_p + \frac{R_{ka} \cdot R_{kd}}{R_{ka} + R_{kd}}$	

Τονίζεται ότι σε κάθε βήμα του παραπάνω αλγορίθμου, δηλαδή όπου υπάρχει else στην αριστερή στήλη, ο αλγόριθμος τερματίζεται με την εντολή return και δεν εκτελούνται οι επόμενες εντολές

4.2.2 Συνάρτηση υπολογισμού ρευμάτων και ενδιάμεσης τάσης (update_current)

Η update_current είναι η συνάρτηση υπολογισμού ρευμάτων συνολικά, στον αριστερό και στο δεξί κάτω κλάδο (I, I_a, I_d αντίστοιχα) και ενδιάμεσης τάσης (V_{mid}). V είναι η συνολικά εφαρμοζόμενη τάση. Η εκτέλεσή της προϋποθέτει ότι έχει υπολογιστεί η συνολική αντίσταση του κυκλώματος

$if R_{total} = \infty \text{ then}$	$I \leftarrow 0, I_a \leftarrow 0, I_d \leftarrow 0, V_{mid} \leftarrow 0$	Άπειρη αντίσταση \Rightarrow Μηδενικά ρεύματα
	$if R_p < \infty \text{ then } V_{mid} \leftarrow V$	Αν R_p υπάρχει, $V_{mid} : V$ εφαρμοζόμενη
$else$		
$if R_{total} = 0 \text{ then}$	$I \leftarrow \infty, I_a \leftarrow \infty, I_d \leftarrow \infty, V_{mid} \leftarrow 0$	Μηδενική αντίσταση \Rightarrow Άπειρα ρεύματα
	$if R_{ka} > 0 \text{ then } I_a \leftarrow 0$	Αν μια από τις κάτω αντιστάσεις υπάρχει, το ρεύμα στον κλάδο της είναι μηδέν
	$if R_{kd} > 0 \text{ then } I_d \leftarrow 0$	
$else$		Υπολογισμός συνολικού ρεύματος και ενδιάμεσης τάσης
$I \leftarrow V / R_{total}$		Αν οι δύο κάτω αντιστάσεις είναι μηδέν, το ρεύμα μοιράζεται
$V_{mid} \leftarrow V - I \cdot R_p$		
$if R_{ka}=0 \text{ and } R_{kd}=0 \text{ then}$	$I_a \leftarrow I / 2, I_d \leftarrow I / 2$	
$else$		
$if R_{ka} = 0 \text{ then}$	$I_a \leftarrow I, I_d \leftarrow 0$	Αν κάποια από τις δύο κάτω αντιστάσεις είναι μηδέν, το ρεύμα περνάει μόνο από την άλλη
$else$		
$if R_{kd} = 0 \text{ then}$	$I_a \leftarrow 0, I_d \leftarrow I$	
$else$		
$if R_{ka} = \infty \text{ then}$	$I_a \leftarrow 0 \text{ else } I_a \leftarrow V_{mid} / R_{ka}$	Υπολογισμός ρεύματος σε κάθε μία από τις δύο κάτω αντιστάσεις
$if R_{kd} = \infty \text{ then}$	$I_d \leftarrow 0 \text{ else } I_d \leftarrow V_{mid} / R_{kd}$	

Στον παραπάνω αλγόριθμο θεωρήσαμε ότι :

- Σε άπειρη αντίσταση, το δυναμικό του ενδιάμεσου σημείου είναι μηδέν εάν όλες οι αντιστάσεις είναι άπειρες (δεν υπάρχουν). Στην πραγματικότητα το ενδιάμεσο σημείο είναι ηλεκτρικά απομονωμένο.

- Σε μηδενική αντίσταση κάτω κλάδου, δηλαδή και οι δύο κάτω αντιστάσεις να είναι μηδέν ενώ η επάνω υπάρχει, το ρεύμα ισομοιράζεται στους δύο κάτω κλάδους.

Τονίζεται ότι και εδώ, όπως και στην προηγούμενη συνάρτηση, όπου υπάρχει else στην αριστερή στήλη, ο αλγόριθμος τερματίζεται με την εντολή return και δεν εκτελούνται οι επόμενες εντολές

Η συνάρτηση current_ok μας επιστρέφει αληθές εάν το συνολικό ρεύμα είναι μέσα στα επιτρεπτά όρια. Είναι πολύ απλή :

```
if I = ∞ or I > 100 mA return false else return true
```

Ο έλεγχος γίνεται ξεχωριστά, παρότι όπως φαίνεται, η περίπτωση απείρου ρεύματος καλύπτεται από τον έλεγχο $I > 100 \text{ mA}$. Αυτό απαιτείται, επειδή η σύμβαση που χρησιμοποιήθηκε στο πρόγραμμα είναι ότι το άπειρο ρεύμα αναπαρίσταται από έναν αρνητικό αριθμό (συγκεκριμένα το -1)

4.2.3 Η βασική συνάρτηση (process_event)

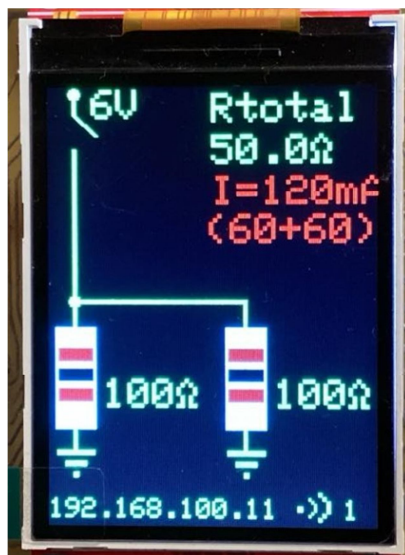
Η βασική συνάρτηση του προγράμματος είναι η process_event. Υπενθυμίζεται ότι με τη συνάρτηση websocketEvent η οποία αναφέρθηκε παραπάνω, αντλούνται από το πρόγραμμα τα δεδομένα του χρήστη (πατήματα πλήκτρων για αυξομείωση αντιστάσεων και τάσης) με την μορφή ενός χαρακτήρα και καλούνται οι αντίστοιχες συναρτήσεις εξυπηρέτησής τους. Οι συναρτήσεις αυτές αλλάζουν μόνο τις μεταβλητές που αντιστοιχούν στα μεγέθη τα οποία ο χρήστης ζήτησε να αλλάξουν και δεν επηρεάζουν άμεσα τις αντίστοιχες εξόδους του μικροελεγκτή οι οποίες ελέγχουν τα πραγματικά μεγέθη. Η αλλαγή γίνεται μετά τους αντίστοιχους ελέγχους από τη συνάρτηση process_event που παρουσιάζεται εδώ.

Συνάρτηση process_event

update_current	Εύρεση τιμών ρευμάτων βάσει των τιμών αντιστάσεων και τάσης
if not current_ok() then Main_switch_on ← false	Σε μη επιτρεπτό ρεύμα ενημέρωσε τη μεταβλητή που αντιστοιχεί στην κατάσταση του κεντρικού διακόπτη
if Main_switch_on = false then Turn_switch_OFF	Εάν η αντίστοιχη μεταβλητή απαιτεί να κλείσει (OFF) ο κεντρικός διακόπτης, αποσύνδεσε το κύκλωμα από την εφαρμοζόμενη τάση
Draw_Circuit	Ενημέρωσε την οθόνη TFT με τα νέα στοιχεία αντιστάσεων, ρευμάτων, τάσης και κατάστασης κεντρικού διακόπτη
update_webpage	Ενημέρωσε την ιστοσελίδα με τα νέα στοιχεία. Ενημέρωσε τους συνδεδεμένους clients, για την αυτόματη επαναφόρτωση της σελίδας στη συσκευή τους
Set_Resistor_Values	Άλλαξε τις τιμές των πραγματικών αντιστάσεων, σύμφωνα με τις τιμές των μεταβλητών Rp, Rka και Rkd.
if Main_switch_on = true then wait 500 ms	Εάν ο κεντρικός διακόπτης είναι ON, περίμενε 0.5 second για να αποκατασταθούν οι τιμές των αντιστάσεων, δηλαδή να φορτίσουν / εκφορτίσουν οι αντίστοιχοι πυκνωτές. Εάν είναι OFF, δηλαδή το κύκλωμα δεν διαρρέεται από ρεύμα, δεν χρειάζεται να περιμένεις.
apply_Voltage	Προσάρμοσε τη ζητούμενη τάση στο κύκλωμα εφαρμόζοντας στον τηλεστικό OPA548 την απαιτούμενη τάση ελέγχου

Μια από τις ελεγχόμενες από τον χρήστη μεταβλητές, είναι και η μεταβλητή Main_switch_on. Ο κεντρικός διακόπτης του κυκλώματος είναι το ρελέ το οποίο ελέγχει την πάνω αντίσταση και απεικονίζεται με το πράσινο LED στο κύκλωμα. Στην αντίστοιχη συνάρτηση που μεταβάλλει την τιμή της αντίστασης αυτής (Set_Resistor_Value(1)) έχει ληφθεί μέριμνα ώστε το ρελέ να μην ενεργοποιείται αν η μεταβλητή Main_switch_on έχει την τιμή False, ενώ η τιμή της αντίστασης αλλάζει κανονικά. Φυ-

σικά η τιμή της μεταβλητής αυτής, όπως φαίνεται στον παραπάνω αλγόριθμο, ελέγχεται αμέσως μετά τον υπολογισμό των ρευμάτων και αν χρειάζεται, ο διακόπτης απενεργοποιείται πριν προχωρήσουμε στα επόμενα βήματα.



Εικόνα 4.5 : Διακόπτης OFF λόγω μη επιτρεπτού ρεύματος

Ένα ακόμη σημείο που θα πρέπει να τονιστεί είναι ότι αν ο διακόπτης τεθεί στην κατάσταση OFF λόγω μη επιτρεπτού ρεύματος, αυτός δεν επανέρχεται αυτόματα σε κατάσταση ON, όταν, προσαρμόζοντας τις αντιστάσεις ή την τάση, το ρεύμα επανέλθει σε αποδεκτά επίπεδα. Θα πρέπει ο χρήστης να τον επαναφέρει σε κατάσταση ON πατώντας το αντίστοιχο πλήκτρο στην ιστοσελίδα. Φυσικά, αν προσπαθήσει κάποιος να τον ενεργοποιήσει ενώ το ρεύμα παραμένει σε μη επιτρεπτή τιμή, ο διακόπτης δεν ενεργοποιείται.

Η ενημέρωση της ιστοσελίδας γίνεται μέσω της μεταβλητής `jsonString`, τύπου `String` η οποία περιέχει τις παραμέτρους για ενημέρωση. Η εκχώρηση των τιμών γίνεται, όπως έχει ήδη αναφερθεί, μέσω εντολών όπως `object["VMID"] = String(V_mid,2) + " V"` (η `V_mid` είναι μεταβλητή τύπου `float`). Η αρχική ιστοσελίδα περιέχει μεταβλητές στη μορφή `` ή ``, εάν αυτές εμφανίζονται πάνω από μια φορές. Οι μεταβλητές αντικαθίστανται και οι συνδεδεμένοι χρήστες ενημερώνονται άμεσα μέσω της εντολής `websocket.broadcastTXT(jsonString)`.

Συνολικά οι μεταβλητές του προγράμματος και οι έξοδοι οι οποίες επηρεάζονται από αυτές μετά από τον απαραίτητο έλεγχο, φαίνονται στον πίνακα 4.2. Τύπος εξόδου `Digital` σημαίνει έξοδος 0 ή 3.3 V, τύπος `PWM` αντιστοιχεί σε εξομαλυμένη PWM έξοδο, δηλαδή σχεδόν αναλογική και `Analog` αντιστοιχεί σε καθαρά αναλογική έξοδο με χρήση ενός από τους 2 DACs.

Πίνακας 4.2 : Μεταβλητές του προγράμματος - ελεγχόμενες εξόδους

Μεταβλητή	Τύπος μεταβλητής	Ρόλος	Έξοδος	Τύπος εξόδου	pin
Main_switch_on	boolean	True: Διακόπτης ON	MainLED_pin	Digital	27
Rp	int	Τιμή πάνω αντίστασης			
Rka	int	Τιμή αντίστασης κάτω αριστερά	LEDka_pin	Digital	12
			PWM2_pin	PWM	33
Rkd	int	Τιμή αντίστασης κάτω δεξιά	LEDkd_pin	Digital	13
			PWM3_pin	PWM	32
Volt	int	Εφαρμοζόμενη τάση	Vctrl_pin	Analog	25
			Enable_pin	Digital	2

Όπως φαίνεται, οι τιμές των αντιστάσεων επηρεάζουν δύο εξόδους, μια ψηφιακή που ελέγχει το αντίστοιχο ρελέ και μια PWM η οποία ελέγχει την τιμή της αντίστασης. Ειδικά για την πάνω αντίσταση, το αντίστοιχο ρελέ αποτελεί και το γενικό διακόπτη της διάταξης και ελέγχεται - κατά προτεραιότητα - και από την τιμή της μεταβλητής Main_switch_on. Το τμήμα κώδικα που ελέγχει το κάθε ρελέ περιέχεται στη function Set_Resistor_Value.

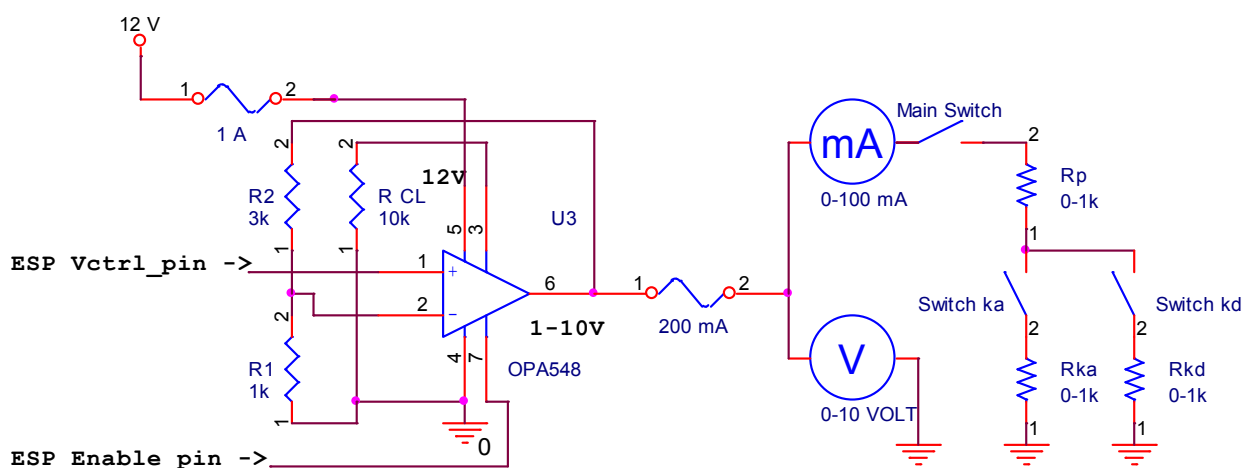
```
void Set_Resistor_Value(int resistor_nr)
{
    . . . . .
    ledcWrite(channel, Res_out_val [ (R/100) ] ); // PWM Output
    if ( ( resistor_nr == 1 ) && ( Main_switch_on == false ) ) { return; }
    /// if main switch is OFF do NOT turn it ON, else
    digitalWrite( pin, ( (R/100) == 11 ? LOW : HIGH) ); // update relay
}
```

Ο πλήρης κώδικας της εφαρμογής αποτελείται από τέσσερα αρχεία, τα circuit_ohm.ino, html_page.ino και τα αρχεία ρυθμίσεων definitions.h και my_net.h. Το circuit_ohm.ino περιέχει τον κύριο κώδικα της εφαρμογής. Το html_page.ino, μεταγλωττίζεται μετά το κύριο αρχείο και περιέχει μόνο τη συνάρτηση που δίνει σαν τιμή στη μεταβλητή web (τύπου String) το περιεχόμενο της ιστοσελίδας. Το αρχείο definitions.h ενσωματώνεται στον κύριο κώδικα με μια εντολή #include και περιέχει τις αντιστοιχίσεις τιμών σε χρωματικό κώδικα αντιστάσεων, τιμές εισόδου για τον τελεστικό για την παραγωγή των αντίστοιχων τάσεων όπως αυτές παρατίθενται στον πίνακα 3.8, όπως και την αντιστοίχιση εξόδων στους απαιτούμενους ακροδέκτες του μικροελεγκτή, για τον έλεγχο της οθόνης και των υπολοίπων στοιχείων του κυκλώματος. Τέλος, το αρχείο my_net.h περιέχει τα διαπιστευτήρια σύνδεσης στον οικιακό router στον οποίο αναπτύχθηκε και δοκιμάστηκε το κύκλωμα. Τα παραπάνω αρχεία παρατίθενται στο παράρτημα Α.

Κεφάλαιο 5ο: Ασφάλεια του συστήματος

Σε επίπεδο λογισμικού, το σύστημα, αμέσως μετά την αρχικοποίηση των εξόδων (function `init_outputs`), τις απενεργοποιεί (function `reset_outputs : disable OPA548, turn off relays`). Επίσης, όπως έχει αναφερθεί, η απενεργοποίηση του κεντρικού διακόπτη γίνεται αυτόματα για μη επιτρεπτές τιμές ρεύματος, ενώ η ενεργοποίησή του, γίνεται μόνο αφού έχει δώσει την αντίστοιχη εντολή ο χρήστης και μετά από έλεγχο της τιμής του ρεύματος το οποίο θα προκύψει. Σε περίπτωση που ο διακόπτης είναι ήδη σε κατάσταση ON, οι νέες τιμές εφαρμόζονται μετά από μια καθυστέρηση 0.5 δευτερολέπτων για να αποκατασταθούν οι τιμές των αντιστάσεων μετά από την ομαλοποίηση του PWM σήματος.

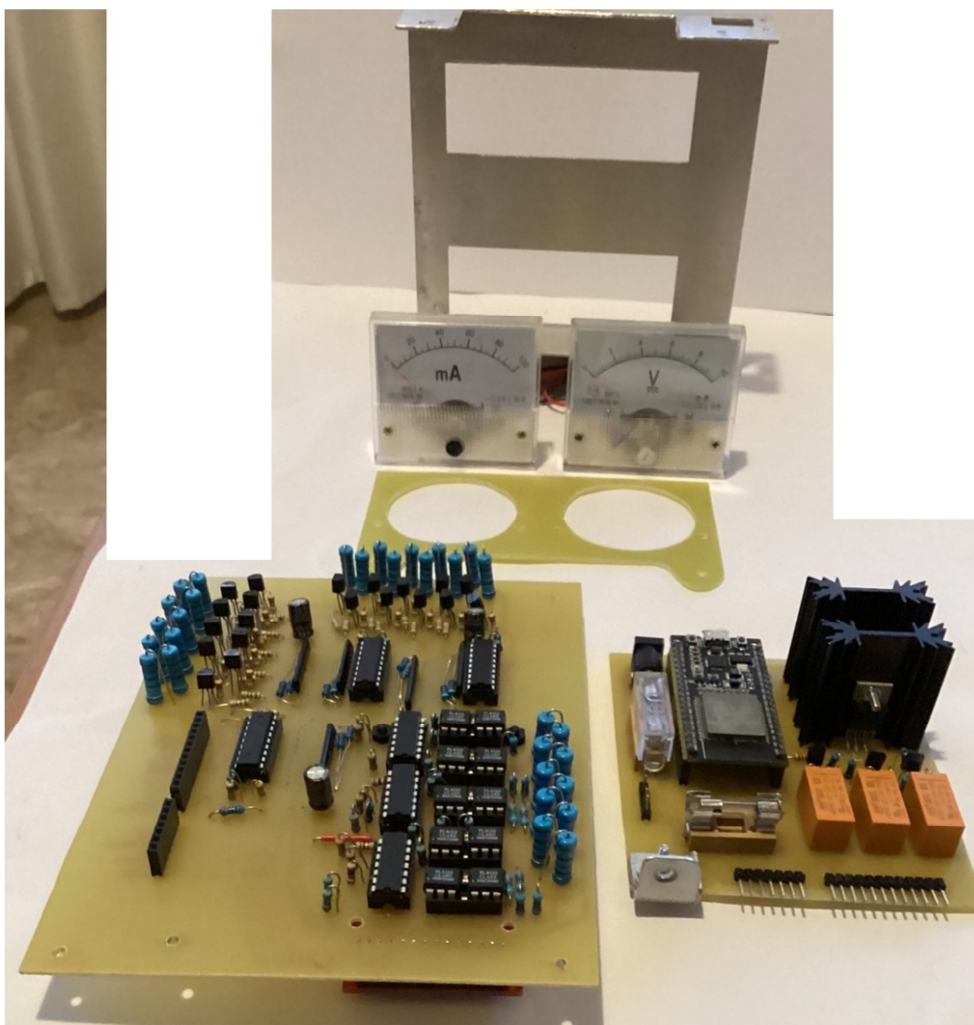
Σε επίπεδο σχεδίασης, κάθε διακόπτης MOSFET έχει τον ακροδέκτη του Gate συνδεδεμένο με τη γη μέσω μιας αντίστασης τουλάχιστον 20 φορές μεγαλύτερη από την αντίσταση εισόδου του. Αυτό διασφαλίζει ότι το διακοπτικό κύκλωμα θα είναι σε κατάσταση OFF, όταν οι εισοδοί βρεθούν σε απροσδιόριστη κατάσταση. Επιπλέον, έχουν παρεμβληθεί 2 γυάλινες ασφάλειες τήξης, μία 1A αμέσως μετά την κεντρική τροφοδοσία και μια 200mA αμέσως μετά την έξοδο του τελεστικού παραγωγής της εφαρμοζόμενης τάσης και πριν τα όργανα ένδειξης (βολτόμετρο - αμπερόμετρο), οπότε η ένδειξη του βολτομέτρου αφού εφαρμόσουμε κάποια τάση, είναι αρκετή για να μας πληροφορήσει για την κατάσταση της ασφάλειας αυτής (εικόνα 5.1).



Εικόνα 5.1 : Ασφάλειες και όργανα ένδειξης

Κεφάλαιο 6ο: Η κατασκευή

Η τελική κατασκευή αποτελείται από δύο τυπωμένες πλακέτες μονής όψης, δύο αναλογικά όργανα (βολτόμετρο 10V και αμπερόμετρο 100mA). Ως βάση στήριξης χρησιμοποιήθηκε ένα παλιό πλαίσιο drive υπολογιστή από αλουμίνιο και για τη στήριξη των οργάνων μια αποχαλκωμένη πλακέτα που κόπηκε κατάλληλα. Στην εικόνα 6.1 φαίνονται οι όψεις εξαρτημάτων των δύο πλακετών και τα υπόλοιπα εξαρτήματα



Εικόνα 6.1 : Τα τμήματα της κατασκευής

Η κατασκευή των πλακετών αυτών όπως και της δοκιμαστικής, έγινε με τη χρήση οικιακού εξοπλισμού. Συγκεκριμένα, η σχεδίαση έγινε με το πρόγραμμα Corel Draw (τα σχέδια στο παράρτημα Γ) και η εκτύπωση διαφανειών σε εκτυπωτή μελάνης. Χρησιμοποιήθηκαν πλακέτες με φωτοευαίσθητη επιφάνεια. Ο φωτισμός έγινε με λάμπα UV, η εμφάνιση με γνωστό εμπορικό προϊόν απόφραξης με μεγάλη περιεκτικότητα σε υδροξείδιο του Νατρίου και η αποχάλκωση με αραιό μίγμα Υδροχλωρικού οξέος (πάλι από γνωστό προϊόν οικιακού καθαρισμού) και Perhydrol (υπεροξείδιο του υδρογόνου, από φαρμακείο). Έγινε επικασιτέρωση της επιφάνειας των πλακετών και κολλήθηκαν τα εξαρτήματα. Η σύνδεση / επικοινωνία των πλακετών επιτυγχάνεται με δύο συνδέσμους τυπωμένου κυκλώματος αρ-

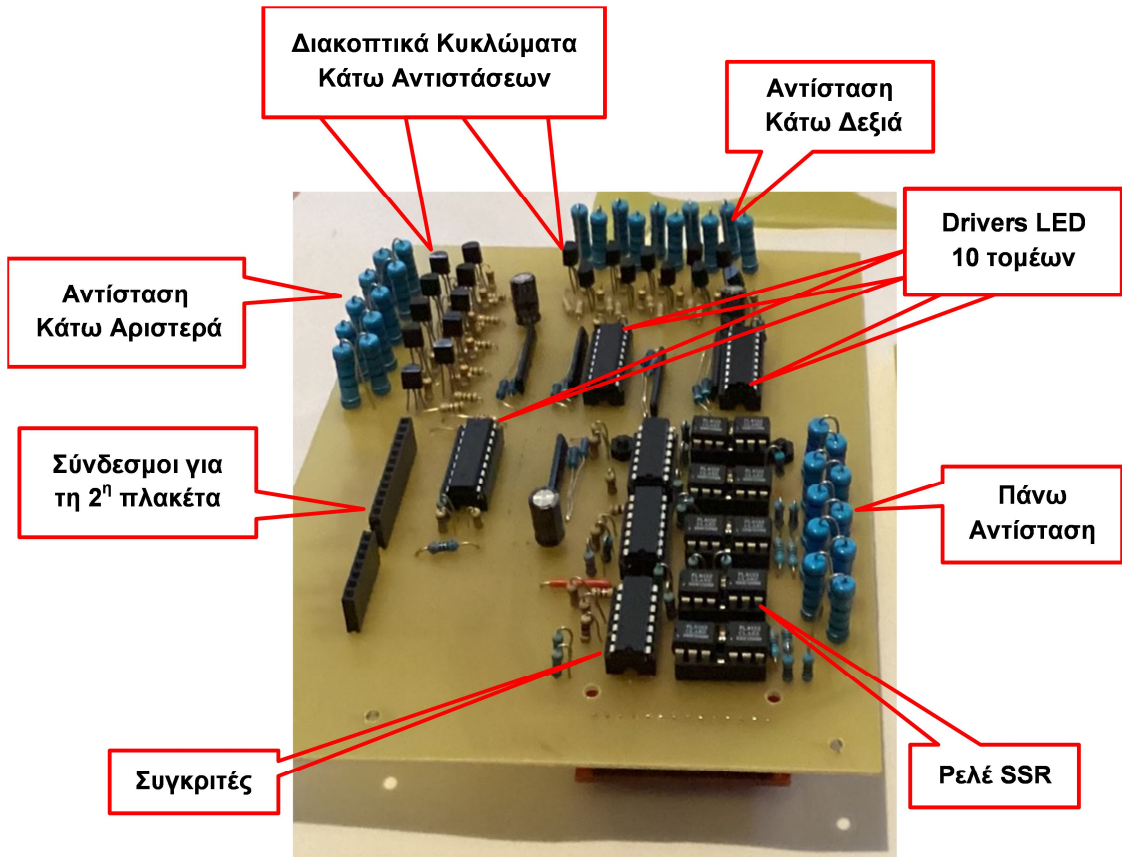
σενικό / θηλυκό. Ο αρσενικός σύνδεσμος επιλέχθηκε να είναι γωνίας 90°, για την κάθετη τοποθέτηση των πλακετών. Το ένα τμήμα του συνδέσμου είναι 7 αγωγών και είναι υπεύθυνο για την αποστολή δεδομένων στην οθόνη TFT. Το 2° τμήμα, 12 αγωγών, συνδέει τις δύο πλακέτες με τα υπόλοιπα δεδομένα / στάθμες τάσεων που απαιτούνται. Η πληροφορία η οποία μεταφέρεται από κάθε σύνδεση, καθώς και οι αντίστοιχοι ακροδέκτες του μικροελεγκτή, εφόσον αυτοί παράγουν το συγκεκριμένο σήμα, φαίνονται στον πίνακα 6.1. Τονίζεται ότι για την επικοινωνία μικροελεγκτή / οθόνης μέσω πρωτοκόλλου SPI απαιτείται μονόδρομη σύνδεση, εφόσον η οθόνη δεν επικοινωνεί με τον ESP32, οπότε υπάρχει μόνο σήμα Master Out Slave In και όχι Master In Slave Out. Ακόμη, οι πάνω άκρες των κάτω αντιστάσεων όπως και η κάτω άκρη της πάνω αντίστασης (Vmid point) πρέπει να ελέγχονται από τα ρελέ τα οποία βρίσκονται στη δεύτερη πλακέτα, οπότε η σύνδεσή τους με αυτήν είναι επιβεβλημένη.

Πίνακας 6.1 : Συνδέσεις των δύο πλακετών.

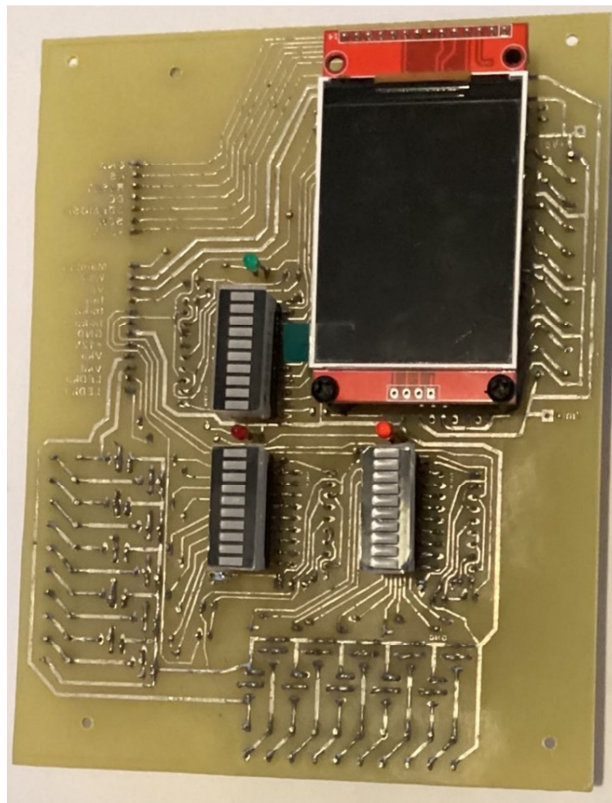
Τμήμα ελέγχου οθόνης			
	ESP32 Pin	Σήμα	Λειτουργία
1.		GND	Γείωση
2.	14	CS	Chip Select
3.	17	RESET	Reset Screen
4.	15	DC	Data/Command
5.	23	SDI (MOSI)	Master Out Slave In
6.	18	SCK	Ρολόι
7.		+ 3.3 V	Τροφοδοσία οθόνης από OPA548
Τμήμα Κυκλώματος			
	ESP32 Pin	Σήμα	Λειτουργία
1.		MainLED	LED Κεντρικού διακόπτη - πάνω αντίστασης
2.		Vmid	Ενδιάμεση τάση (κάτω μέρος πάνω αντίστασης)
3.		Vp	Εφαρμοζόμενη τάση (πάνω μέρος πάνω αντίστασης)
4.	26	In-p	PWM σήμα πάνω αντίστασης
5.	33	In-kd	PWM σήμα κάτω δεξιάς αντίστασης
6.	32	In-ka	PWM σήμα κάτω αριστερής αντίστασης
7.		GND	Γείωση
8.		+ 12 V	Τροφοδοσία συστήματος
9.		Vka	Τάση στην κάτω αριστερή αντίσταση
10.		Vkd	Τάση στην κάτω δεξιά αντίσταση
11.		LEDka	LED-διακόπτης κάτω αριστερής αντίστασης
12.		LEDkd	LED-διακόπτης κάτω δεξιάς αντίστασης

6.1 Η μπροστινή πλακέτα (front panel)

Στην κύρια πλακέτα του συστήματος τα υλικά κολλήθηκαν από την κανονική πλευρά, δηλαδή όχι από την πλευρά των αγωγών του τυπωμένου κυκλώματος. Η εξαίρεση έγινε για τους ενδείκτες LED 10 τομέων και τα 3 LED 3mm ένδειξης της κατάστασης των διακοπών-ρελέ. Στις εικόνες 6.2 και 6.3 φαίνονται οι δύο όψεις της πλακέτας.



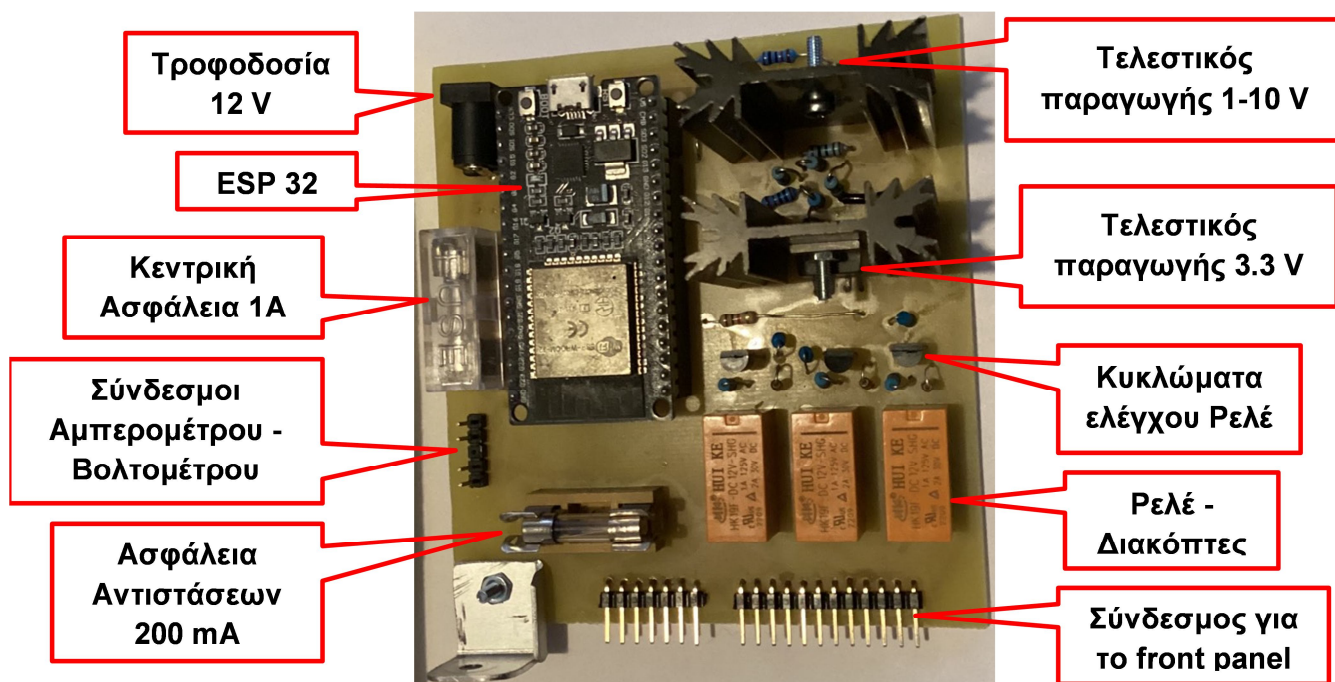
Εικόνα 6.2 : Front Panel - όψη εξαρτημάτων



Εικόνα 6.3 : Front Panel - εμπρόσθια όψη

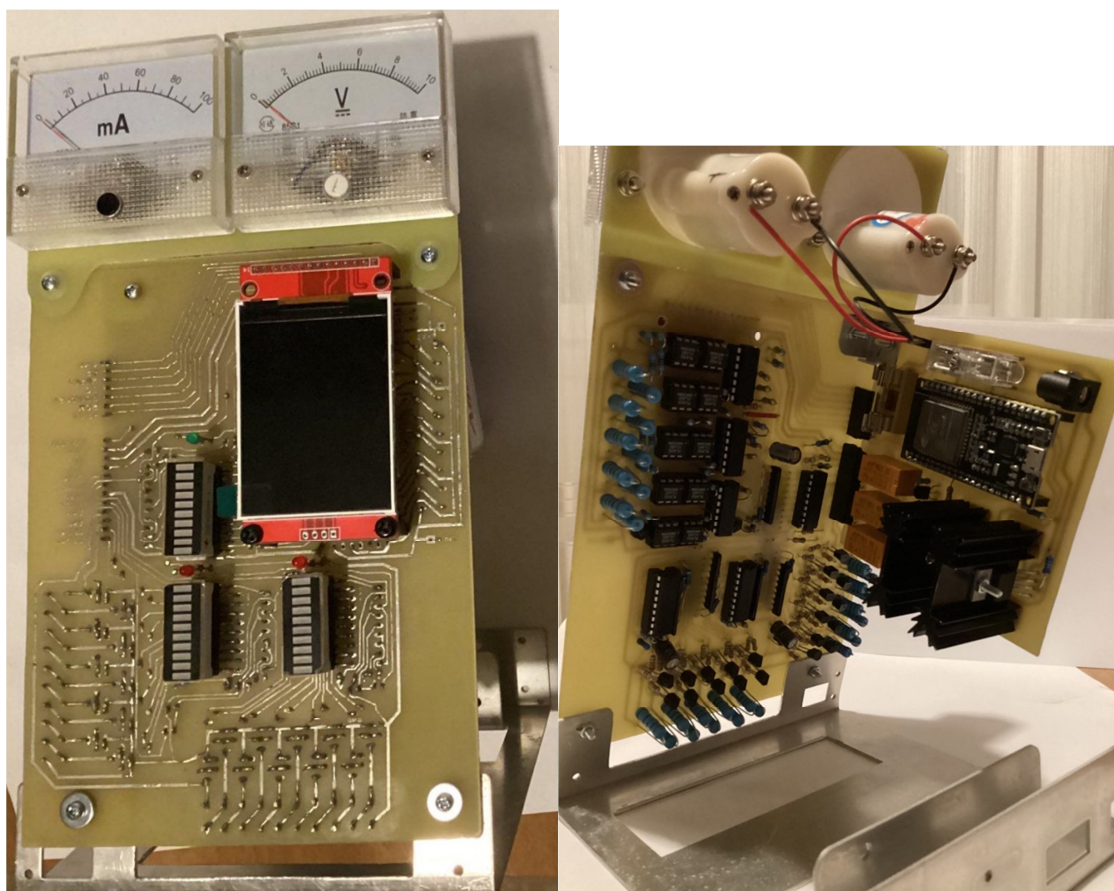
6.2 Η πίσω πλακέτα (ESP board)

Η πλακέτα η οποία περιέχει τον μικροελεγκτή και τα εξαρτήματα ελέγχου φαίνεται στην εικόνα 6.4. Διακρίνονται ο ESP32, οι δύο τελεστικοί ενισχυτές παραγωγής τάσης (3.3 V και μεταβαλλόμενη) με τις ψήκτρες τους, τα ρελέ-διακόπτες με τα διακοπτικά κυκλώματα με τα MOSFET που τα ελέγχουν και οι δύο ασφάλειες τήξης. Ο σύνδεσμος των 7 + 12 ακίδων υπό γωνία, έχει τοποθετηθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να μην είναι πολύ κοντά στα εξαρτήματα της κεντρικής πλακέτας. Η σταθερότητα στη σύνδεση των δύο πλακετών επιτυγχάνεται με μικρή γωνία αλουμινίου στο πάνω μέρος της πλακέτας, η οποία, με τη βοήθεια και του βάρους της πλακέτας, δεν αφήνει τα εξαρτήματα να αποσυνδεθούν.



Εικόνα 6.4 : ESP board - όψη εξαρτημάτων

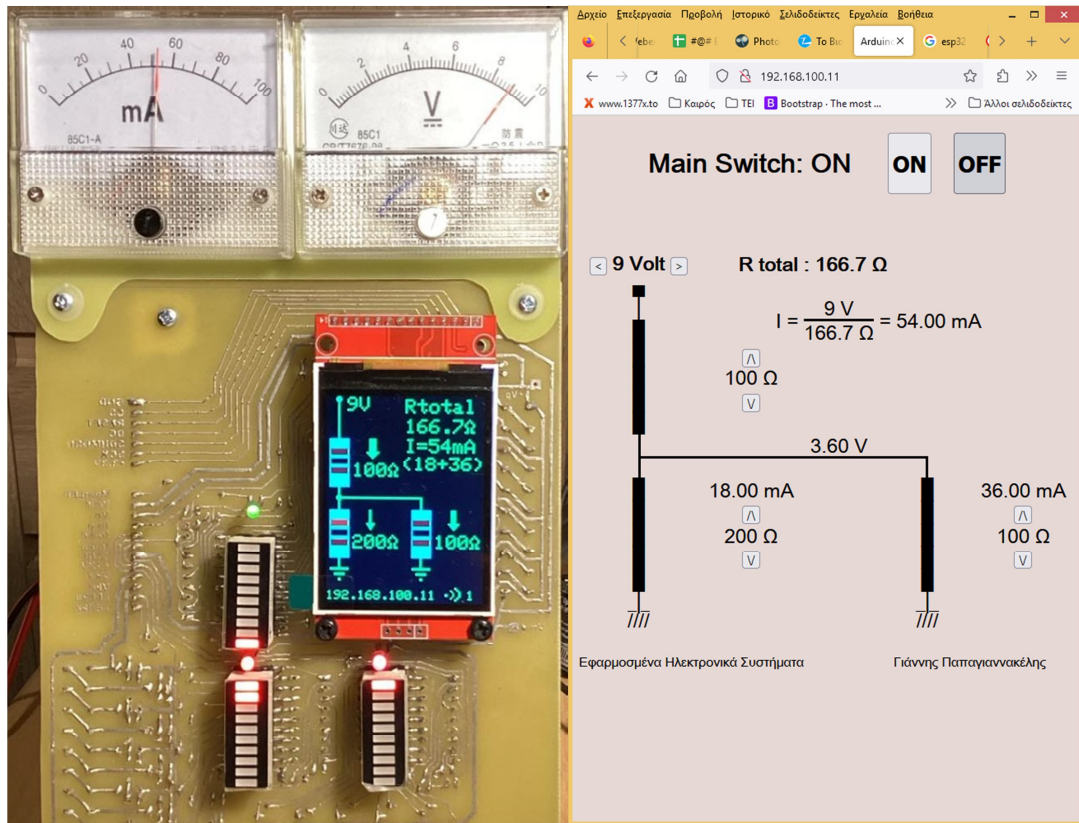
Η τελική κατασκευή συναρμολογημένη φαίνεται στην εικόνα 6.5



Εικόνα 6.5 : Η κατασκευή, εμπρός και πίσω όψη

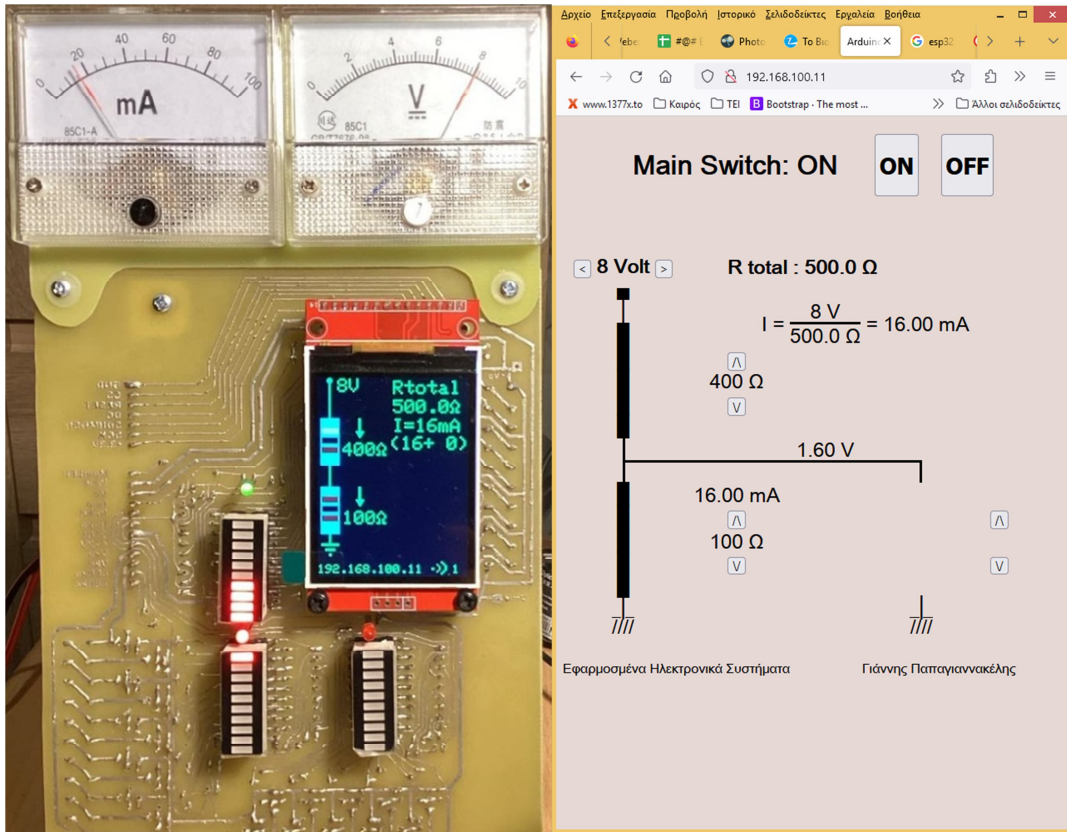
Κεφάλαιο 7ο: Δοκιμές - Στιγμιότυπα

Έγιναν αρκετές δοκιμές στο σύστημα και διαπιστώθηκε η αξιόπιστη λειτουργία του όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες

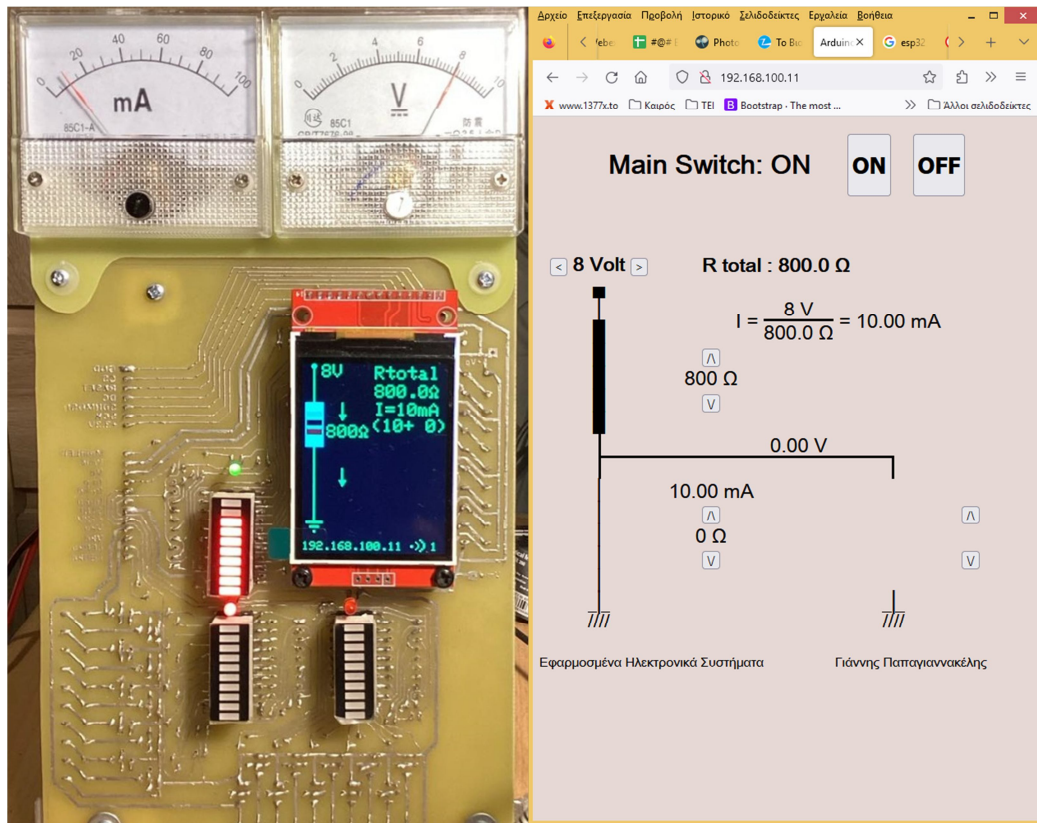


Εικόνα 7.1 : Στιγμιότυπο 1: 9 Volt, 54 mA

Απομακρυσμένο Εργαστήριο Απλών Εφαρμογών Ηλεκτροτεχνίας



Εικόνα 7.2 : Στιγμιότυπο 2 : 8 Volt, 16 mA



Εικόνα 7.3 : Στιγμιότυπο 3 : 8 Volt, 10 mA

Κεφάλαιο 8ο: Συμπεράσματα - Προτάσεις

8.1 Συμπεράσματα

Η τελική κατασκευή συμπεριφέρθηκε όπως είχε προβλεφθεί. Με μικρές τιμές αντιστάσεων υπήρξαν κάποιες μικρές αποκλίσεις -προς τα κάτω- στα ρεύματα λόγω της παρασιτικής αντίστασης 5 Ω στους MOSFET διακόπτες. Έγινε δυνατή η ικανότητα άμεσου ελέγχου ενός κυκλώματος μέσω ιστοσελίδας και λόγω κάποιων απότομων υπερτάσεων κατά την εκκίνηση, διαπιστώθηκε η αναγκαιότητα αρχικοποίησης των εξόδων του κυκλώματος αμέσως μετά την έναρξη του προγράμματος. Τα περισσότερα προβλήματα αντιμετωπίστηκαν στην πάνω αντίσταση, με την αρχική χρήση διακοπτών MOSFET όπως και στις κάτω και εμφανίστηκαν θέματα αξιοπιστίας, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Γι' αυτό χρησιμοποιήθηκαν τελικά τα ρελέ στερεάς κατάστασης τα οποία προσέφεραν μια αξιόπιστη λύση.

8.2 Βελτιώσεις - Προτάσεις

Μια βελτίωση που θα μπορούσε να γίνει είναι ο έλεγχος της θερμοκρασίας στις δύο ψήκτρες. Ο μικροελεγκτής βρίσκεται ήδη τοποθετημένος ακριβώς από πάνω τους, οπότε θα αρκούσε ο έλεγχος της θερμοκρασίας του ίδιου του μικροελεγκτή με τον ενσωματωμένο σ' αυτόν αισθητήρα. Αυτό θα είχε νόημα σε μη αεριζόμενο χώρο, με ομαλή ροή θερμού αέρα προς τα επάνω. Με προσεκτική σχεδίαση βέβαια, κάτι τέτοιο θα ήταν περιττό.

Μία αναβάθμιση ακόμη, με λίγες μετατροπές του κυκλώματος, θα μπορούσε να περιλαμβάνει κάποια πλήκτρα ή ποτενσιόμετρα για τον απευθείας έλεγχο του μικροελεγκτή χωρίς τη μεσολάβηση ιστοσελίδας ή υπολογιστικής συσκευής. Αυτό, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, απορρίφθηκε σαν ιδέα εφόσον το αντικείμενο της εργασίας είναι ο έλεγχος με ιστοσελίδα. Ένας διακόπτης επιλογής ελέγχου θα ήταν αρκετός για να επιτρέψει ή να απαγορεύσει τον έλεγχο με υπολογιστική συσκευή.

Τέλος, η σημαντικότερη βελτίωση θα μπορούσε να είναι ο πραγματικός έλεγχος της διάταξης μέσω διαδικτύου, κάτι το οποίο θα πρέπει να λάβει υπόψη του σοβαρά θέματα ασφάλειας πρόσβασης και να υλοποιηθεί μέσω τεχνικών όπως π.χ. χρήση εικονικού ιδιωτικού δικτύου (VPN) ή άλλης τεχνικής όπως αυτές που έχουμε ήδη αναφέρει (π.χ. port forward) και προσφέρει πιστοποιημένη πρόσβαση. Με την υπάρχουσα υλοποίηση, η απομακρυσμένη πρόσβαση μπορεί να επιτευχθεί μέσω προγραμμάτων απομακρυσμένου ελέγχου υπολογιστικών συσκευών, όπως π.χ. Teamviewer ή AnyDesk. Τα προγράμματα αυτά προσφέρουν αξιόπιστη σύνδεση και λειτουργούν σε πολλαπλές πλατφόρμες (Windows, Android, Linux, IOS ...) οπότε η απομακρυσμένη πρόσβαση είναι πολύ εύκολη.

Βιβλιογραφία - Αναφορές

- [1] Α. Γιακουμής, *Σημειώσεις Μεταπτυχιακού Μαθήματος Σχεδιασμός Ενσωματωμένων Συστημάτων*. Σίνδος: ΔΙΠΑΕ, 2021
- [2] Μ. Σπάσος και Κ. Αμοιρίδης, *Σύγχρονες Εφαρμογές Αναλογικών Ηλεκτρονικών*. Θεσσαλονίκη: Αιβάζης, 2015
- [3] https://www.espressif.com/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. Accessed : 11/4/2023.
- [4] <https://mischianti.org/esp32-devkitc-v4-high-resolution-pinout-and-specs>. Accessed : 11/4/2023.
- [5] Renesas, “Digitally Controlled Potentiometer”, XDCPT™ datasheet, Jan 2019.
- [6] Analog Devices, “Digital Potentiometers MT-091 TUTORIAL” datasheet, Jan 2009.
- [7] Texas Instruments, “LM3914 Dot/Bar Display Driver” datasheet, Mar 2013.
- [8] IXYS Integrated Circuits “PLA132 Normally Open Relay” datasheet, Apr 2021.
- [9] Texas Instruments, “LMx39-N, . . . Low-Power Low-Offset Voltage Quad Comparators” datasheet, Dec 2014.
- [10] Texas Instruments, “OPA548 High-Voltage, High-Current Operational Amplifier” datasheet, Dec 2019.
- [11] <https://deepbluembedded.com/esp32-dac-audio-arduino-examples>. Accessed : 11/10/2023.
- [12] <https://help.ewelink.cc/hc/en-us/articles/360042189411-How-does-a-WiFi-device-access-to-the-eWeLink-server-> Accessed : 10/1/2024.
- [13] <https://superuser.com/questions/1786604/how-can-cameras-with-rtsp-like-tapo-cameras-be-accessible-from-the-outside>. Accessed : 10/1/2024.
- [14] <https://www.wallarm.com/what/a-simple-explanation-of-what-a-websocket-is>. Accessed : 10/1/2024.
- [15] <https://www.wallarm.com/what/websocket-vs-http-how-are-these-2-different>. Accessed : 10/1/2024.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Κώδικας της εφαρμογής

circuit_ohm.ino : Κύριος κώδικας

```

#include <Adafruit_GFX.h> // Core graphics library
#include <Adafruit_ST7789.h> // Hardware-specific library for ST7789
#include <SPI.h>
#include <String.h>
#include "WiFi.h"

//// Arduino pins, Resistor colours, PWM parameters
#include "definitions.h" // in same dir as ino file

#include "my_net.h" // in same dir as ino file

#include <WebServer.h> // Include WebSwever Library for ESP32
#include <ArduinoJson.h> // Include ArduinoJson Library
#include "DHT.h" // Include DHT Library
#include <WebSocketsServer.h> // Include WebSocket Library
#include "String.h"

WebServer server(80); // create instance for web server on port "80"
WebSocketsServer webSocket = WebSocketsServer(81);
//create instance for webSocket server on port"81"

int interval = 5000; // virtual delay
volatile unsigned long previousMillis = 0; // Tracks the time since last event fired
volatile unsigned long currentMillis ;
volatile boolean Main_switch_on ;

String web; // holds Web page Content
String mc_IP;
byte connected_clients;
String jsonString; // Temporary storage for the JSON String
//String pin_status = ""; // Holds the status of the pin

float t; // holds the temperature value
float hum;// holds the Humidity value

volatile int Volt; /// 0 - 10 Volt
float V_mid ; // Mid point voltage
volatile float current, curr_a, curr_d; /// -1.0 means infinite current
volatile int Rp, Rka, Rkd; //Antistaseis Panw, Katw Aristera, Katw Dexia (Ohm)
// Resistor Values 0,100,200 ... 1, 1.1 kOhm.
// 1.1 kOhm means Infinite (open circuit)

int w = 30, h = 75; //90; // Resistor width / height
uint16_t xp,yp,xka,yka,xkd,ykd; // Resistors positions

void setup(void)
{ init_outputs(); reset_outputs();
  Serial.begin(115200); Serial.println(); Serial.println(); Serial.println();
  Serial.println(F(" ===== "));
  Serial.println(F("ST77xx TFT Test"));
  Serial.print(F(" Initializing ST77xx TFT ... "));
  tft.init(240, 320); Serial.println(F(" Initialized. ")); Serial.println();
  tft.invertDisplay(false); tft.fillRect(ST77XX_BLACK); // clear screen
  tft.setTextColor(ST77XX_GREEN); tft.setTextSize(3);
  Serial.println();
  reset_outputs();
  relays_test(500); reset_outputs();
  find_Networks(90); Connect_to_WiFi();
  init_webpage();
  delay(3000); // time to show IP
  set_resistors_positions();
  tft.fillRect(ST77XX_BLACK);
  Rkd = 700 ;
}

```

```

if ( Rkd != 800 )
{
    test_Voltage(800);
    test_resistor(1,800); test_resistor(2,500); test_resistor(3,500);
    Serial.println();
}
reset_outputs();
Rp = Rka = Rkd = 500; Volt = 1; connected_clients = 0; Main_switch_on = false;
}

void init_webpage()
{
    load_webpage_code (); // web <- Web page Content
    // Initialize a web server on the default IP address. and send the webpage as a response.
    server.on("/", []() { server.send(200, "text/html", web); });
    server.begin(); // init the server
    WebSocket.begin(); // init the Websocketserver
    WebSocket.onEvent(WebSocketEvent); // init the WebSocketEvent function when a websocket
event occurs
    Serial.println("Webpage loaded");
    update_webpage();
}

void loop()
{ server.handleClient(); // webservice method that handles all Client
WebSocket.loop(); // websocket server method that handles all Client
currentMillis = millis(); // call millis and Get snapshot of time
if ((unsigned long)(currentMillis - previousMillis) >= interval)
    { previousMillis = currentMillis; process_event(); }
}

void init_outputs()
{ // init_PWM_channels
pinMode(PWM1_pin,OUTPUT); pinMode(PWM2_pin,OUTPUT); pinMode(PWM3_pin,OUTPUT);
ledcAttachPin(PWM1_pin, PWM1_Ch); ledcSetup(PWM1_Ch, PWM1_Freq, PWM1_Res);
Serial.print(" PWM1 ok");
ledcAttachPin(PWM2_pin, PWM2_Ch); ledcSetup(PWM2_Ch, PWM2_Freq, PWM2_Res);
Serial.print(" PWM2 ok");
ledcAttachPin(PWM3_pin, PWM3_Ch); ledcSetup(PWM3_Ch, PWM3_Freq, PWM3_Res);
Serial.println(" PWM3 ok");
pinMode(MainLED_pin,OUTPUT); pinMode(LEDka_pin,OUTPUT); pinMode(LEDkd_pin,OUTPUT);
pinMode(Enable_pin,OUTPUT);
}

void reset_outputs()
{
digitalWrite(MainLED_pin,LOW); digitalWrite(LEDka_pin,LOW);
digitalWrite(LEDkd_pin,LOW); // All relays off
disable_OPA548();
ledcWrite(PWM1_Ch, 0); ledcWrite(PWM2_Ch, 0); ledcWrite(PWM3_Ch, 0);
// All resistors <- Zero
}

void disable_OPA548() { digitalWrite(Enable_pin,LOW); dacWrite(Vctrl_pin, 0); Volt = 0; }

void Turn_switch_ON() { digitalWrite(MainLED_pin,HIGH); }

void Turn_switch_OFF() { digitalWrite(MainLED_pin,LOW); }

int apply_Voltage() //float Voltage)
{ // Gain OPA548 : 4
// Vout 1 V <-> Vin 0.25 V (byte : 255*0.25/3.3 = 19)
// Vout 10 V <-> Vin 2.5 V (byte : 255*2.5/3.3 = 193)
if ( Volt == 0 ) { disable_OPA548(); return 0; }
digitalWrite(Enable_pin,HIGH);
dacWrite( Vctrl_pin, Vout_byte_val[Volt] );
}

void update_current()
{ float R_tot = R_total();
if ( R_tot >= 3000 ) // open circuit
{ curr_a = curr_d = current = V_mid = 0.0 ;
if ( Rp < 1100 ) { V_mid = ( (float)(Volt) ) ; } // Rp < inf
return;
}
}

```

```

if ( R_tot < 1 ) // infinite Current
{ curr_a = curr_d = current = -1.0 ; V_mid = 0.0 ;
  if ( Rka > 0 ) { curr_a = 0.0 ; }   if ( Rkd > 0 ) { curr_d = 0.0 ; }
  return;
}
current = 1000.0 * (float)(Volt) / R_tot;
V_mid = ( (float)(Volt)) - ( (float)(Rp) ) * current / 1000.0 ; // Mid point voltage
if ( (Rka==0) && (Rkd==0) ) // both down resistors 0
  { curr_a = curr_d = ( current / 2.0 ) ; return ; }
if ( Rka == 0 ) { curr_a = current; curr_d = 0.0 ; return ; }
if ( Rkd == 0 ) { curr_d = current; curr_a = 0.0 ; return ; }
if ( Rka >= 1100 ) { curr_a = 0.0 ; } else { curr_a = 1000.0 * V_mid / ( (float)(Rka) ); }
if ( Rkd >= 1100 ) { curr_d = 0.0 ; } else { curr_d = 1000.0 * V_mid / ( (float)(Rkd) ); }
}

boolean current_ok() // returns true if current ok else disconnect
{ if ( ( current < 0.0 ) || ( current > 100.1 ) ) { return false ; }
  // infinite or not allowed Current
  return true ;
}

void relays_test(int delay_time)
{ Serial.println(" Testing Relays");
  digitalWrite(MainLED_pin,HIGH); delay(delay_time);
  digitalWrite(LEDka_pin,HIGH); delay(delay_time);
  digitalWrite(LEDkd_pin,HIGH);delay(delay_time);
}

void test_Voltage(int wait_time)
{ digitalWrite(Enable_pin,LOW); dacWrite(Vctrl_pin, 0); // disable OPA548
  Serial.print("\n Testing Voltage .....");
  tft.setTextColor(ST77XX_YELLOW); tft.setTextSize(4); tft.fillRect(ST77XX_BLACK);
  print_2_lcd (32,40,"Voltage"); print_2_lcd (52,90," Test"); tft.setTextSize(5);
  for ( Volt = 0; Volt <= 10 ; Volt++ )
    { tft.fillRect(80, 140, 100, 60, ST77XX_BLACK);
      print_2_lcd (80, 160, String(Volt)+" V");
      apply_Voltage(); delay(wait_time);
    }
  disable_OPA548(); tft.setTextSize(3);
}

void test_resistor(int resistor_nr, int wait_time)
{ // Rp : 1, Rka : 2, Rkd : 3, wait_time : millisecons
  Rp = Rka = Rkd = 1100 ;
  //out_values(); // all resistors disconnected
  Volt = 0 ;
  tft.fillRect(ST77XX_BLACK); // clear screen
  switch ( resistor_nr )
  { case 1 : Serial.print("\n Testing_resistor Rp...");
      for ( Rp = 100 ; Rp < 1200 ; Rp += 100 )
        { Set_Resitor_Value(1); Draw_resistor(xp,yp,Rp,0 ); delay(wait_time); }
      break;
    case 2 : Serial.print("\n Testing_resistor Rka...");
      for ( Rka = 100 ; Rka < 1200 ; Rka += 100 )
        {Set_Resitor_Value(2); Draw_resistor(xka,yka,Rka,0); delay(wait_time); }
      break;
    case 3 : Serial.print("\n Testing_resistor Rkd...");
      for ( Rkd = 100 ; Rkd < 1200 ; Rkd += 100 )
        {Set_Resitor_Value(3); Draw_resistor(xkd,ykd,Rkd,0); delay(wait_time); }
      break;
  } // switch
  Rp = Rka = Rkd = 1100 ; // all resistors disconnected
}

void Set_Resitor_Value(int resistor_nr)
{ // Rp : 1, Rka : 2, Rkd : 3
  byte channel, pin;
  int R;
  switch ( resistor_nr )
  { case 1 : channel = PWM1_Ch ; pin = MainLED_pin ; R = Rp ; break ;
    case 2 : channel = PWM2_Ch ; pin = LEDka_pin ; R = Rka ; break ;
    case 3 : channel = PWM3_Ch ; pin = LEDkd_pin ; R = Rkd ; break ;
  } // switch
  ledcWrite(channel, Res_out_val [ (R/100) ] ); // PWM Output
  if ( ( resistor_nr == 1 ) && ( Main_switch_on == false ) ) { return; }
  // if main switch is OFF do NOT turn it ON, else
  digitalWrite(pin,( (R/100) == 11 ? LOW : HIGH)); // update relay
}

```

```

}

void wait (unsigned long delay_time)
{
    volatile unsigned long start_time ; // Tracks the time
    volatile unsigned long cur_time ;
    Serial.print( " Waiting " + String(delay_time)+" ms ...." );
    cur_time = start_time = millis(); // call millis and Get snapshot of time
    while ((unsigned long)(cur_time - start_time) < delay_time)
        { cur_time = millis(); } // wait
    Serial.println("o.k");
}

void process_event()
{
    update_current();
    if ( !( current_ok() ) ) { Main_switch_on = false; } // allowed current ?
    if ( Main_switch_on == false ) { Turn_switch_OFF(); }

    String msg = ( Main_switch_on ? "ON" : "OFF"); msg = " Switch:" + msg;
    msg += " V : "+String(Volt)+"V"+" V_mid : "+String(V_mid,2)+"V";
    msg += " Itot : " + String(current,2)+" mA";
    msg += " Ia : "+String(curr_a,2)+" Id : "+String(curr_d,2);
    Serial.println(msg);

    Draw_Circuit(); update_webpage();
    Set_Resistor_Value(1); Set_Resistor_Value(2); Set_Resistor_Value(3);
    if ( Main_switch_on ) { wait(500); }
    apply_Voltage();
}

void find_Networks(int dbm)
{
    int strongs = 0 ;
    int i, n ;
    String msg ;
    Serial.print("\n WiFi scan start....");
    print_2_lcd (5,20,"WiFi Scan..");
    n = WiFi.scanNetworks(); // number of networks found
    Serial.print( "Scan done! \n" );
    if (n == 0) { Serial.print("\n No networks found \n"); }
    else
    {
        Serial.print( " " + String(n) + " networks found\n" );
        for ( i = 0; i < n; i++ ) // Print SSID and RSSI for each network found
        {
            msg = " " + String( i + 1 ) + ": ";
            msg += WiFi.SSID(i) + " (" + String(WiFi.RSSI(i)) + " dBm)";
            msg += ( (WiFi.encryptionType(i) == WIFI_AUTH_OPEN) ? "\n": "*" ) ;
            if ( WiFi.RSSI(i) > ( -dbm ) ) { strongs ++ ; }
            Serial.print(msg);
        }
    }
    Serial.print( "\n " + String(strongs) + " Networks with power > -" + String(dbm)+ " dBm \n" );
};

print_2_lcd (10,60,String(n)+" Networks. ");
print_2_lcd (10,100,String(strongs)+" > -" + String(dbm)+ " dBm");
} // find_Networks

void Connect_to_WiFi()
{
    String msg ;
    Serial.print( "\nInitializing Connection to WiFi " + String(ssid) + "\n" );
    print_2_lcd (30,140,String(ssid));
    WiFi.begin(ssid, password); Serial.print("Connecting to WiFi");
    int i = 0;
    while ( WiFi.status() != WL_CONNECTED )
        { Serial.print("."); delay(500); connection(180,280, ( i++ ) % 4 ) ); }
    tft.setTextSize(3);
    msg = "Connected. \nLocal IP : " ; //+ WiFi.localIP() + "\n";
    mc_IP = WiFi.localIP().toString();
    msg += mc_IP + "\n"; Serial.print(msg);
    print_2_lcd (2, 180, String( WiFi.RSSI(0) ) + " dBm. IP:");
    print_2_lcd (2 , 220 , mc_IP );
}

void connection(int x, int y, int level) // level : Number of )
{
    tft.fillRect(x-2, y-8, 40, 32, ST77XX_BLACK); // clear area
    tft.setTextSize(2); print_2_lcd(x-2,y-5,"."); if ( level == 0 ) { return; }
    tft.setTextSize(2); print_2_lcd(x+8,y-1,""); if ( level == 1 ) { return; }
    tft.setTextSize(3); print_2_lcd(x+14,y-5,""); if ( level == 2 ) { return; }
}

```

```

    tft.setTextSize(4); print_2_lcd(x+20,y-8,"");
}

void print_2_lcd (int x, int y, String msg) { tft.setCursor(x, y); tft.print(msg); }

void Draw_resistor(uint16_t x, uint16_t y, int val, float cur)
{ String text;
  tft.fillRect(x, y, 110, h, ST77XX_BLACK); // clear area
  if ( val > 1000 ) { return; }
  tft.fillRect(x - 2 + w/2 , y - 20, 3, 110, ST77XX_GREEN); // vertical line
  if ( ( Main_switch_on ) && ( cur > 0.0 ) ) // current floating ?
  { int cur_w = ((int)(cur/5.0))+1; // current arrow width
    int cur_p = x+w+30; // current arrow x position
    tft.fillRect(cur_p, y, cur_w, 20, ST77XX_GREEN); // current arrow
    tft.fillTriangle(cur_p-4,y+20, cur_p+cur_w+4,y+20, cur_p+(cur_w>>1),y+30,ST77XX_GREEN);
  }
  if ( val == 0 ) { return; }

  tft.fillRect(x, y, w, h, Res_col [10]); // background
  uint16_t col;
  col = val / 100 ; if ( col == 10 ) { col = 1; } // 100 Ohm / 1kOhm
  tft.fillRect(x+2, y+15, w-4, 10, Res_col [ col ] ); // 1st digit
  tft.fillRect(x+2, y+30, w-4, 10, Res_col [ 0 ] ); // 2nd digit
  col = val / 1000 ;
  tft.fillRect(x+2, y+45, w-4, 10, Res_col [ col + 1 ] ); // 3rd digit

  if ( val == 1000 ) { text = "1k"; } else { text = String(val); }
  text += char(0xE9); // char(167); //Omega
  tft.setTextColor(ST77XX_GREEN); tft.setTextSize(3);
  print_2_lcd (x+w+5, y+38, text);
}

void Draw_Ground(uint16_t x, uint16_t y)
{
  tft.fillRect( x - 14 , y , 28 , 4, ST77XX_GREEN);
  tft.fillRect( x - 8 , y+8 , 16 , 4, ST77XX_GREEN);
  tft.fillRect( x - 2 , y+16 , 4 , 4, ST77XX_GREEN);
}

void Draw_infinity_symbol(uint16_t x, uint16_t y, uint16_t col)
{ tft.drawCircle(x,y,8,col); tft.drawCircle(x+15,y,8,col);
  tft.drawCircle(x,y,7,col); tft.drawCircle(x+15,y,7,col);
  tft.drawCircle(x,y,6,col); tft.drawCircle(x+15,y,6,col);
  tft.drawCircle(x,y,5,col); tft.drawCircle(x+15,y,5,col);
}

void set_resistors_positions()
{
  xp = xka = 5;
  yp = 65;
  yka = ykd = 175;
  xkd = 130;
}

void draw_switch_off(uint16_t x, uint16_t y)
{ tft.fillRect(x, y, 3, 15, ST77XX_GREEN); // vertical line
  tft.drawLine(x, y + 15, x + 16, y + 30 , ST77XX_GREEN); // open switch
  tft.drawLine(x + 1, y + 15, x + 17, y + 30 , ST77XX_GREEN);
  tft.drawLine(x + 2, y + 15, x + 18, y + 30 , ST77XX_GREEN);
}

void Draw_Circuit()
{
  String text; float R_tot;
  tft.fillRect(ST77XX_BLACK); // clear screen
  tft.fillCircle( xp - 1 + w/2, 5, 4, ST77XX_GREEN); /// Vcc point
  text = String(Volt); text += "V"; print_2_lcd (32, 2, text); //show Voltage value
  if ( Main_switch_on ) { tft.fillRect(xp - 2 + w/2, 5, 3, 60, ST77XX_GREEN); } // vertical
  line
  else { draw_switch_off( xp - 2 + w/2, 5 ) ; }

  Draw_resistor (xp , yp, Rp, current );
  if ( Rka <= 1000 )
    { Draw_resistor(xka,yka,Rka,curr_a); Draw_Ground(xp+w/2,yka+90); }
  if ( Rkd <= 1000 )
  { tft.fillCircle( xka - 1 + w/2, yka-19, 4, ST77XX_GREEN);
    tft.fillRect( xka - 1 + w/2, yka - 20, xkd - xka, 3, ST77XX_GREEN); // horizontal line
  }
}

```

```

    Draw_resistor (xkd , ykd, Rkd, curr_d ); Draw_Ground( xkd + w/2 , ykd+90 );
}
tft.fillRect(100, 5, 110, 55, ST77XX_BLACK); // clear area for I, R
tft.setTextWrap(false); tft.setTextColor(ST77XX_GREEN); tft.setTextSize(3);
R_tot = R_total(); print_2_lcd (120, 5, "Rtotal");
if ( R_tot > 999 ) { text = String( ( R_tot/1000.0 ) , 2 ) + "k"; }
else { text = String(R_tot,1); }
if ( R_tot == 3000 ) { text = " "; } // open circuit
text += char(0xE9); //Omega
print_2_lcd (120, 35, text);
if ( R_tot == 3000 ) { Draw_infinity_symbol(150,45,ST77XX_GREEN); }

tft.fillRect(120, 65, 80, 22, ST77XX_BLACK); // clear current area
if ( !(current_ok()) ) { tft.setTextColor(ST77XX_RED); }
print_2_lcd (120,65,"I=");
if (current > -0.5 )
    { tft.print(String(current,0) + "mA");
      print_2_lcd (115,93,"("+String(curr_a,0)+"+"+String(curr_d,0)+"")");
    }
else { Draw_infinity_symbol(165,75,ST77XX_RED); } // infinite Current
tft.setTextColor(ST77XX_GREEN);

connection(180,300,2);
tft.setTextSize(2); print_2_lcd ( 0 , 300, mc_IP );
print_2_lcd ( 215 , 300, String(connected_clients) );
tft.setTextSize(3);

} // Draw_Circuit

float R_total()
{ if ( Rp > 1000 ) { return (3000); } // open circuit
  if ( ( Rka == 0 ) || ( Rkd == 0 ) ) { return ( Rp ); } // Rdown = 0 ; } //
  if ( ( Rka > 1000 ) && ( Rkd > 1000 ) ) { return (3000); } // open circuit
  if ( Rka > 1000 ) { return ( Rp + Rkd ); }
  if ( Rkd > 1000 ) { return ( Rp + Rka ); }
  float Rdown = float( Rka*Rkd ) / float (Rka+Rkd); // both down Resistors exist
  return ( Rp + Rdown );
}

// This function gets a call when a WebSocket event occurs
void websocketEvent(byte num, WStype_t type, uint8_t * payload, size_t length)
{
  switch (type)
  { case WStype_DISCONNECTED: // enum that read status this is used for debugging.
    Serial.print("WS Type "); Serial.print(type); Serial.println(": DISCONNECTED");
    connected_clients -- ;
    break;
    case WStype_CONNECTED: // Check if a WebSocket client is connected or not
    Serial.print("WS Type "); Serial.print(type); Serial.println(": CONNECTED");
    connected_clients ++ ;
    break;
    case WStype_TEXT: // check response from client
    Serial.println(); // the payload variable stores the status internally
    // Serial.println(length);Serial.println(String(*payload));
    Serial.print( char ( payload[0] ) );

    switch ( payload[0] )
    { case '1' : turn_switch_ON(); break;
      case '0' : turn_switch_OFF(); break;
      case '2' : inc_Rp(); break;
      case '3' : dec_Rp(); break;
      case '4' : inc_Rka(); break;
      case '5' : dec_Rka(); break;
      case '6' : inc_Rkd(); break;
      case '7' : dec_Rkd(); break;
      case '8' : inc_volt(); break;
      case '9' : dec_volt(); break;
    } // switch ( payload[0] )
    break;
  } // switch (type)
  process_event();
} // websocketEvent

void turn_switch_ON() { Main_switch_on = true ; }

void turn_switch_OFF() { Main_switch_on = false ; }
void inc_Rp() { if ( Rp >= 1100 ) { return ; } Rp += 100 ; }

```

```

void dec_Rp() { if ( Rp <= 0 ) { return ; } Rp -= 100 ; }
void inc_Rka() { if ( Rka >= 1100 ) { return ; } Rka += 100 ; }
void dec_Rka() { if ( Rka <= 0 ) { return ; } Rka -= 100 ; }
void inc_Rkd() { if ( Rkd >= 1100 ) { return ; } Rkd += 100 ; }
void dec_Rkd() { if ( Rkd <= 0 ) { return ; } Rkd -= 100 ; }
void inc_volt() { if ( Volt >= 10 ) { return ; } Volt ++ ; }
void dec_volt() { if ( Volt <= 0 ) { return ; } Volt -- ; }

String Itotal_str()
{ if ( R_total() == 0.0 ) return "inf";
  float I_tot = ( ( R_total() > 2500.0 ) ? 0.0 : ( 1000.0 * Volt / R_total() ) ) ;
  return String( I_tot, 2 ) + " mA" ;
}

String I_R_str(float cur) // String with current Value on each Resistor
{ if ( cur == -1.0 ) { return "inf" ; }
  if ( cur == 0.0 ) { return " " ; }
  return String( cur, 2 ) + " mA" ;
}

String Res_str(int r) // String with Resistor Value
{ if ( r == 1000 ) { return "1 kΩ"; } if ( r == 1100 ) { return " " ; }
  return String(r)+" Ω";
}

String Rtot_str()
{ float rt = R_total();
  if ( rt > 2500.0 ) { return "Open Circuit"; }
  if ( rt < 1000.0 ) { return String(rt,1) + " Ω"; }
  return String( rt/1000.0 ,2 ) + " kΩ";
}

String R_chars() // String to draw Resistors
{ String st,s1,s2,s3;
  s1=s2=s3= "■";
  if ( Rp == 1100 ) { s1=" "; } if ( Rp == 0 ) { s1="|"; }
  if ( Rka == 1100 ) { s2=" "; } if ( Rka == 0 ) { s2="|"; }
  if ( Rkd == 1100 ) { s3=" "; } if ( Rkd == 0 ) { s3="|"; }
  st= s1+s2+s3;
  //Serial.println(" ->"+st+"<-", Length : "+String (st.length())+" >" );
  return st;
}

void update_webpage()
{ StaticJsonDocument<350> doc; // create an object
  JsonObject object = doc.to<JsonObject>();
  object["Switch_Status"] = ( Main_switch_on ? "ON" : "OFF" ) ; object["VOLT"] = Volt;
  object["RP"] = Res_str(Rp); object["RKA"] = Res_str(Rka); object["RKD"] = Res_str(Rkd) ;
  object["R_Chars"] = R_chars(); object["R_Total"] = Rtot_str(); object["I_Total"] = Itotal_str();
  object["VMID"] = String(V_mid,2)+" V"; object["Curr_A"] = I_R_str(curr_a); object["Curr_D"] = I_R_str(curr_d);
  serializeJson(doc, jsonString); // serialize the object and save the result to the string variable.
  // Serial.println( jsonString ); // print the string for debugging.
  websocket.broadcastTXT(jsonString); // send the JSON object through the websocket
  jsonString = ""; // clear the String.
}

```

html_page.ino : Εκχώρηση περιεχόμενου ιστοσελίδας σε μεταβλητή

```

void load_webpage_code ()
{
  Serial.println("\n In external function's code now ...");
  //// Load Web page Content to Variable web as Raw String Literal
  web = R"RawLiteral(
<!DOCTYPE html>
<html>
<head>
<title>Arduino and ESP32 Websocket</title>
<meta name='viewport' content='width=device-width, initial-scale=1.0' />
<meta charset='UTF-8'>
<style>
  body { background-color: #E6D8D5; text-align: center; }
  table, th, td
    { border: 0px solid black; border-collapse: collapse;

```



```

        <td style=" border-top : 3px solid black"></td>
        <td style=" border-left : 3px solid black"></td>
    </tr>
    <tr>
        <td colspan="2"><span class='r_ka_c'></span></td> &nbsp;<td><span id='cur_a'></span></td> <td></td>
        <td colspan="2"><span class='r_kd_c'></span></td> &nbsp;<td><span id='cur_d'></span></td>
        <td></td> <td></td>
    </tr>
    <tr>
        <td colspan="2"><span class='r_ka_c'></span></td>
        <td><input type="button" class="button" value="/" id="inc_ka" /></td>
        <td>&nbsp;</td>
        <td colspan="2"><span class='r_kd_c'></span></td>
        <td><input type="button" class="button" value="/" id="inc_kd" /></td>
        <td>&nbsp;</td>
    </tr>
    <tr>
        <td colspan="2"><span class='r_ka_c'></span></td>
        <td> <span id='r_ka'></span> </td>
        <td>&nbsp;</td>
        <td colspan="2"><span class='r_kd_c'></span></td>
        <td> <span id='r_kd'></span> </td>
        <td>&nbsp;</td>
    </tr>
    <tr>
        <td colspan="2"><span class='r_ka_c'></span></td>
        <td><input type="button" class="button" value="/" id="dec_ka" /></td>
        <td>&nbsp;</td>
        <td colspan="2"><span class='r_kd_c'></span></td>
        <td><input type="button" class="button" value="/" id="dec_kd" /></td>
        <td>&nbsp;</td>
    </tr>
    <tr>
        <td colspan="2"><span class='r_ka_c'></span></td>
        <td>&nbsp;</td> <td></td>
        <td colspan="2"><span class='r_kd_c'></span></td>
        <td></td> <td></td>
    </tr>
    <tr>
        <td colspan="2" span style="text-decoration:underline" >&nbsp;<td>&nbsp;</td>
        <td> </td> <td></td>
        <td colspan="2" span style="text-decoration:underline" >&nbsp;<td>&nbsp;</td>
    </tr>
    <tr >
        <td colspan="2" span style="line-height: 0.7">////</td>
        <td> </td> <td></td>
        <td colspan="2" span style="line-height: 0.7">////</td>
    </tr>
    <tr >
        <td>&nbsp;</td>
    </tr>
    <tr >
        <td colspan="3"> <font size="3">Εφαρμοσμένα Ηλεκτρονικά Συστήματα</font></td>
        <td></td>
        <td colspan="3"> <font size="3">Γιάννης Παπαγιαννακέλης</font></td>
    </tr>
</table>
</body>

<script>
    var Socket;

    document.getElementById('BTN_1').addEventListener('click', button_1_pressed);
    document.getElementById('BTN_2').addEventListener('click', button_2_pressed);

    document.getElementById('inc_p').addEventListener('click', inc_p_pressed);
    document.getElementById('dec_p').addEventListener('click', dec_p_pressed);
    document.getElementById('inc_ka').addEventListener('click', inc_ka_pressed);
    document.getElementById('dec_ka').addEventListener('click', dec_ka_pressed);
    document.getElementById('inc_kd').addEventListener('click', inc_kd_pressed);
    document.getElementById('dec_kd').addEventListener('click', dec_kd_pressed);
    document.getElementById('inc_v').addEventListener('click', inc_v_pressed);
    document.getElementById('dec_v').addEventListener('click', dec_v_pressed);

    function init()

```

```

{ Socket = new WebSocket('ws://' + window.location.hostname + ':81/');
  Socket.onmessage = function(event) { processCommand(event); };
}
function processCommand(event)
{ var obj = JSON.parse(event.data);
  document.getElementById('switch').innerHTML = obj.Switch_Status;

  document.getElementById('r_p').innerHTML = obj.RP;
  document.getElementById('r_ka').innerHTML = obj.RKA;
  document.getElementById('r_kd').innerHTML = obj.RKD;

  document.getElementById('v_mid').innerHTML = obj.VMID;
  document.getElementById('cur_a').innerHTML = obj.Curr_A;
  document.getElementById('cur_d').innerHTML = obj.Curr_D;

  var r=obj.R_Chars;    set_draw_chars(r[0], r[1], r[2]);
    // characters to draw panw, katw_aristera, katw_dexia resistors
  var rt=obj.R_Total;  var it=obj.I_Total; var volts=obj.VOLT
  set_circuit_values(rt,it,volts);

  console.log(obj.Switch_Status);
  console.log(obj.RP); console.log(obj.RKA); console.log(obj.RKD);
  console.log(obj.VOLT); console.log(obj.R_Total); console.log(obj.I_Total);
  console.log(obj.VMID); console.log(obj.Curr_A); console.log(obj.Curr_D);
}

function button_1_pressed() { Socket.send('1'); }
function button_2_pressed() { Socket.send('0'); }
function inc_p_pressed() { Socket.send('2'); }
function dec_p_pressed() { Socket.send('3'); }
function inc_ka_pressed() { Socket.send('4'); }
function dec_ka_pressed() { Socket.send('5'); }
function inc_kd_pressed() { Socket.send('6'); }
function dec_kd_pressed() { Socket.send('7'); }
function inc_v_pressed() { Socket.send('8'); }
function dec_v_pressed() { Socket.send('9'); }

function set_draw_chars(c_p, c_ka, c_kd) // Set Characters to Draw Resistors
{ var elements; var i;
  elements = document.querySelectorAll('.r_p_c');
  for(i=0; i<elements.length; i++) { elements[i].innerHTML = c_p; }
  elements = document.querySelectorAll('.r_ka_c');
  for(i=0; i<elements.length; i++) { elements[i].innerHTML = c_ka; }
  elements = document.querySelectorAll('.r_kd_c');
  for(i=0; i<elements.length; i++) { elements[i].innerHTML = c_kd; }
}
function set_circuit_values(r_total,i_total,voltage) // Set Electrical Values
{ var elements; var i;
  elements = document.querySelectorAll('.r_tot');
  for(i=0; i<elements.length; i++) { elements[i].innerHTML = r_total; }
  elements = document.querySelectorAll('.i_tot');
  for(i=0; i<elements.length; i++) { elements[i].innerHTML = i_total; }
  elements = document.querySelectorAll('.v');
  for(i=0; i<elements.length; i++) { elements[i].innerHTML = voltage; }
}

window.onload = function(event) { init(); }
</script>
</html>

)RawLiteral"; /// End of Web page

Serial.println("Html Page length : " + String( web.length() ) +" bytes " );
}

```

definitions.h : Αντιστοιχίσεις τιμών / εξόδων

```

#define TFT_CS      14
#define TFT_RST     17
#define TFT_DC      15

// #define TFT_MOSI    23
// #define TFT_SCLK    18

Adafruit_ST7789 tft = Adafruit_ST7789(TFT_CS, TFT_DC, TFT_RST);

```

```

uint16_t Res_col [11] = // Resistor Color Code
// TFT color : RRRRGGGGBBBB : Red 5 bit, Green 6 bit, Blue 5 bit
{
    0x0000, // 0 : Black
    0x7800, // 1 : Brown
    0xF800, // 2 : Red
    0xFC00, // 3 : Orange
    0xFFE0, // 4 : Yellow
    0x07E0, // 5 : Green
    0x001F, // 6 : Blue
    0xF81F, // 7 : Magenda
    0x8410, // 8 : Gray
    0xFFFF, // 9 : White
    0x1FFF // background
};

int Res_out_val [12] = { /// Output Values (bytes) for Resistors
    0, // R = 0, short circuit
    25, // R = 100 Ohm
    50,
    75,
    100,
    125, // R = 500 Ohm
    150,
    175,
    200,
    225,
    250, // R = 1 kOhm
    0 }; // R = 1100 Ohm, open circuit

byte Vout_byte_val[11] = /// Output Values (bytes) for Vout control
{
    0, // 0,0
    17, // 19,3
    37, // 38,6
    57, // 58,0
    77, // 77,3
    97, // 96,6
    118, // 115,9
    138, // 135,2
    159, // 154,5
    179, // 173,9
    199 // 193,2
};

//// PWM Definitions
#define PWM1_pin 26 // R panw aristera
#define PWM1_Ch 0
#define PWM1_Res 8
#define PWM1_Freq 1000 // Hz

#define PWM2_pin 33 // R katw aristera
#define PWM2_Ch 1
#define PWM2_Res 8
#define PWM2_Freq 1000 // Hz

#define PWM3_pin 32 // R katw dexia
#define PWM3_Ch 2
#define PWM3_Res 8
#define PWM3_Freq 1000 // Hz

#define Vctrl_pin 25
// Analog_out : dacWrite(pin,val) DAC : pins 25 & 26, 255: 3.3 V
#define Enable_pin 2

#define MainLED_pin 27 // Main Switch
#define LEDka_pin 12
#define LEDkd_pin 13

```

my_net.h : Διαπιστευτήρια σύνδεσης

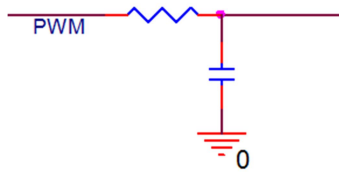
```

const char* ssid = "JM-03D130";
const char* password = "*****";

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Κύκλωμα ομαλοποίησης παλμών PWM

Συμπεριφορά Κυκλώματος



Εικόνα Β - 1 : Φόρτιση / εκφόρτιση πυκνωτή μέσω αντίστασης

Για να εξηγηθεί η συμπεριφορά του κυκλώματος ομαλοποίησης παλμών, θα πρέπει να μελετηθεί η συμπεριφορά κυκλώματος φόρτισης/εκφόρτισης πυκνωτή μέσω αντίστασης, όταν ο πυκνωτής έχει κάποιο φορτίο σε μια δεδομένη χρονική στιγμή. Εάν κάποια στιγμή ο πυκνωτής έχει τάση στα άκρα του V_0 και η είσοδος του κυκλώματος μηδενιστεί (ο παλμός μεταβεί σε κατάσταση LOW), ο πυκνωτής εκφορτίζεται εκθετικά μέσω της αντίστασης στέλνοντας ρεύμα προς την πηγή των παλμών, αριστερά στο παραπάνω σχήμα. Θεωρείται δεδομένο ότι το ρεύμα προς την έξοδο του κυκλώματος, δεξιά στο παραπάνω σχήμα, είναι αμελητέο σε σχέση με τα ρεύματα φόρτισης/εκφόρτισης του πυκνωτή. Η τάση επομένως στα άκρα του πυκνωτή για όσο χρόνο η είσοδος παραμένει LOW θα είναι:

$$V_c = V_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad \text{B - 1}$$

όπου :

V_c : Η τάση στην έξοδο (δεξιά) του κυκλώματος

V_0 : Η τάση στα άκρα του πυκνωτή τη στιγμή που ο παλμός μηδενίστηκε

R, C : Οι τιμές της αντίστασης και του πυκνωτή αντίστοιχα

Για να μελετηθεί η συμπεριφορά του κυκλώματος όταν ο παλμός γίνει HIGH, χρησιμοποιείται υπέρθεση/επαλληλία. Ο πυκνωτής που έχει τάση στα άκρα του V_0 , εκφορτίζεται μέσω της αντίστασης R προς την πηγή των παλμών και ταυτόχρονα φορτίζεται λόγω της εφαρμοζόμενης τάσης V_1 , (τάση εξόδου της πηγής σε κατάσταση HIGH). Τελικό αποτέλεσμα για όσο χρόνο η είσοδος παραμένει HIGH θα είναι:

$$V_c = V_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}} + V_1 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad \text{B - 2}$$

όπου :

V_c : Η τάση στην έξοδο (δεξιά) του κυκλώματος

V_0 : Η τάση στα άκρα του πυκνωτή τη στιγμή που ο παλμός έγινε HIGH

V_1 : Η τάση που εφαρμόζεται στο κύκλωμα όταν ο παλμός είναι στην κατάσταση HIGH

Η παραπάνω σχέση γράφεται :

$$V_c = V_1 - (V_1 - V_0) \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad \text{B - 3}$$

Η συνάρτηση που περιγράφει συνολικά τη συμπεριφορά του κυκλώματος είναι :

$$V_c = \begin{cases} V_1 - (V_1 - V_0) \cdot e^{-\frac{t}{RC}}, & t \uparrow \\ V_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}}, & t \downarrow \end{cases} \quad \text{B - 4}$$

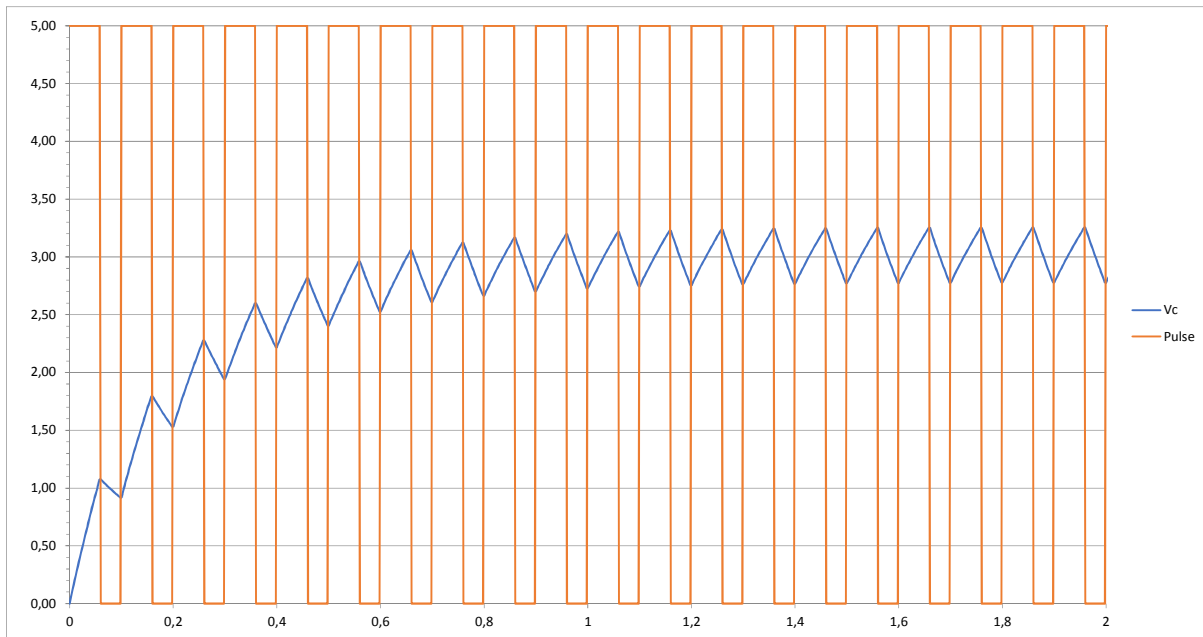
όπου $t \uparrow$, $t \downarrow$, οι χρόνοι κατά τους οποίους η είσοδος είναι HIGH (V_1) και μηδέν αντίστοιχα.

Με δεδομένη την περίοδο T του παλμού και την ποσοστιαία διάρκεια a του πλάτους του ($0 \leq a \leq 1$), μπορούμε να υπολογισθεί η είσοδος, γνωρίζοντας ότι από την αρχή του παλμού και για διάρκεια $a \cdot T$

το κύκλωμα θα έχει είσοδο V_1 , ενώ για το επόμενο διάστημα διάρκειας $(1 - \alpha) \cdot T$, το κύκλωμα θα έχει είσοδο μηδέν. Αρκεί να αφαιρεθούν από την τρέχουσα χρονική στιγμή οι πλήρεις περίοδοι που έχουν προηγηθεί και να συγκριθεί το υπόλοιπο με το χρονικό μέγεθος $\alpha \cdot T$.

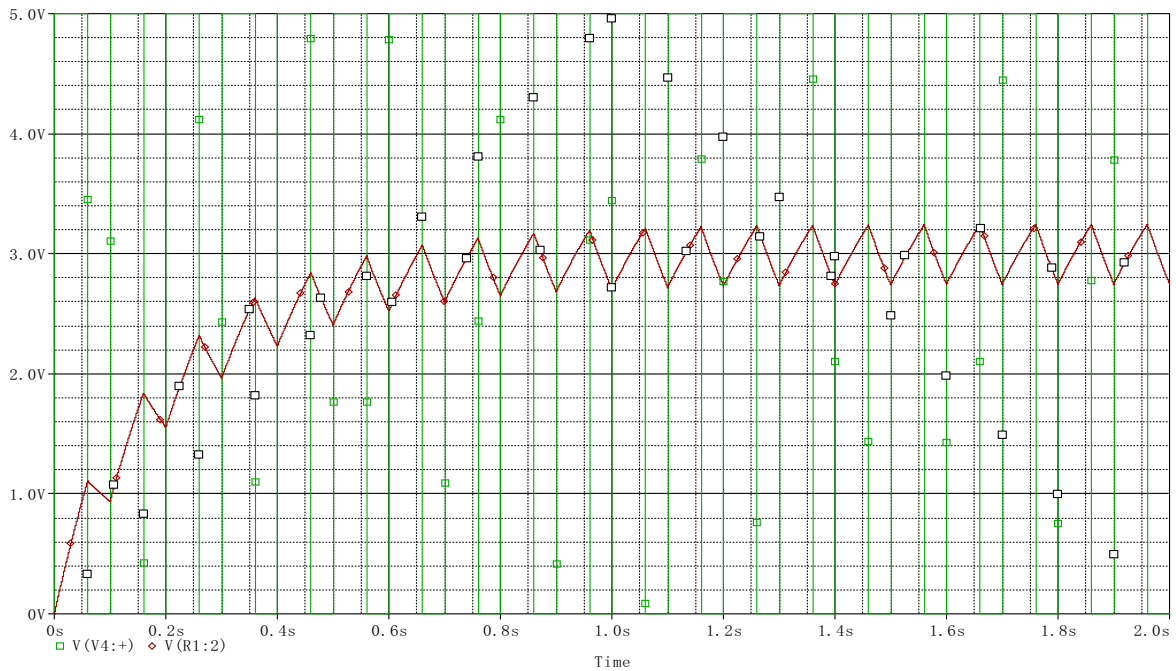
$$if \left(t - \left\lfloor \frac{t}{T} \right\rfloor \cdot T \right) < \alpha \cdot T \text{ then } t \uparrow \text{ else } t \downarrow \quad \text{B - 5}$$

Ο παραπάνω τύπος όπως και οι έξοδοι που προκύπτουν από τη σχέση B-4 για $t \uparrow$ και $t \downarrow$ δόθηκαν σε ένα υπολογιστικό φύλλο, έτσι ώστε να παρασταθεί γραφικά η συμπεριφορά του κυκλώματος. Τη στιγμή της αλλαγής της κατάστασης της εισόδου ($V_1 \leftrightarrow 0$), δόθηκε σαν τάση στα άκρα του πυκνωτή V_0 , η τάση την αμέσως προηγούμενη χρονική στιγμή. Με δεδομένα : βήμα χρονικών υπολογισμών 2 ms, περίοδο $T=100$ ms, $\alpha=60\%$, $V_1=5$ V, τάση τη στιγμή 0 $V_0=0$ V, $R=5.1$ k Ω και $C=47\mu$ F (σταθερά εκφόρτισης $RC=240$ ms), το γράφημα τάσης/χρόνου για τα 2 πρώτα δευτερόλεπτα είναι :



Εικόνα Β - 2 : Γράφημα τάσης/χρόνου: $\alpha=60\%$, $RC=0,24$ s σύμφωνα με την σχέση B-4

Το κύκλωμα με τα ίδια στοιχεία προσομοιώθηκε στο πρόγραμμα PSpice (εικόνα B-3). Τα αποτελέσματα δεν διαφέρουν.



Εικόνα Β - 3 : Γράφημα τάσης/χρόνου με τα προηγούμενα στοιχεία στο πρόγραμμα PSpice

Μετά από πέντε -προσεγγιστικά- σταθερές χρόνου, δηλαδή μετά από 1.2 δευτερόλεπτα στο παραπάνω γράφημα ή μετά από άπειρο -θεωρητικά- χρόνο το κύκλωμα σταθεροποιεί τη μέση τιμή της εξόδου του και η τάση εξόδου κινείται ανάμεσα στις τιμές V_{max} και V_{min} . Η διαφορά των δύο τιμών είναι η κυμάτωση εξόδου V_{ripple} .

$$V_{ripple} = V_{max} - V_{min} \quad \text{B - 6}$$

Για να υπολογιστούν οι δύο τιμές V_{max} και V_{min} , αρκεί να ληφθεί υπόψη ότι η μεταβολή από V_{min} σε V_{max} γίνεται κατά τη διάρκεια που ο παλμός εισόδου είναι σε τάση V_1 για χρόνο ίσο με $\alpha \cdot T$, ενώ η μεταβολή από V_{max} σε V_{min} γίνεται κατά τη διάρκεια που ο παλμός εισόδου είναι σε τάση 0, για διάστημα διάρκειας $(1 - \alpha) \cdot T$. Με χρήση του τύπου B-4 έχουμε το σύστημα εξισώσεων:

$$V_{max} = V_1 - (V_1 - V_{min}) \cdot e^{-\frac{\alpha T}{RC}} \quad \text{B - 7}$$

$$V_{min} = V_{max} \cdot e^{-\frac{(1-\alpha)T}{RC}} \quad \text{B - 8}$$

Αντικαθιστώντας την B-8 στη B-7 :

$$\begin{aligned} V_{max} &= V_1 - \left(V_1 - V_{max} \cdot e^{-\frac{(1-\alpha)T}{RC}} \right) \cdot e^{-\frac{\alpha T}{RC}} = V_1 - V_1 \cdot e^{-\frac{\alpha T}{RC}} + V_{max} \cdot e^{-\frac{(1-\alpha)T}{RC}} \cdot e^{-\frac{\alpha T}{RC}} \\ &= V_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\alpha T}{RC}} \right) + V_{max} \cdot e^{-\frac{T-\alpha T}{RC}} \cdot e^{-\frac{\alpha T}{RC}} = V_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\alpha T}{RC}} \right) + V_{max} \cdot e^{-\frac{T}{RC} + \frac{\alpha T}{RC} - \frac{\alpha T}{RC}} \\ &= V_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\alpha T}{RC}} \right) + V_{max} \cdot e^{-\frac{T}{RC}} \Rightarrow V_{max} \left(1 - e^{-\frac{T}{RC}} \right) = V_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\alpha T}{RC}} \right) \Rightarrow \\ &V_{max} = V_1 \cdot \frac{1 - e^{-\frac{\alpha T}{RC}}}{1 - e^{-\frac{T}{RC}}} \quad \text{B - 9} \end{aligned}$$

Έγινε χρήση του τύπου $e^x \cdot e^y = e^{x+y}$. Η B-8 παίρνοντας υπόψη τη B-9 γίνεται:

$$V_{min} = V_1 \frac{1 - e^{-\frac{\alpha T}{RC}}}{1 - e^{-\frac{T}{RC}}} e^{-\frac{(1-\alpha)T}{RC}} \quad \text{B - 10}$$

Θέτουμε για απλότητα στους τύπους :

$$k = -\frac{1}{RC} \quad \text{B - 11}$$

Οπότε :

$$V_{\max} = V_1 \frac{1-e^{\alpha kT}}{1-e^{-kT}}, \quad V_{\min} = V_1 \frac{1-e^{\alpha kT}}{1-e^{-kT}} e^{(1-\alpha)kT} \quad \text{B - 12}$$

Η κυμάτωση εξόδου είναι :

$$V_{\text{ripple}} = V_{\max} - V_{\min} = V_1 \frac{1-e^{\alpha kT}}{1-e^{-kT}} (1 - e^{(1-\alpha)kT}) \quad \text{B - 13}$$

Για να προκύψει η σχέση B-9 έχει χρησιμοποιηθεί ότι :

$$e^{\alpha kT} e^{(1-\alpha)kT} = e^{kT} \quad \text{B - 14}$$

όπως έχει φανεί αναλυτικά στις πράξεις που έγιναν για να υπολογιστεί η σχέση αυτή.

Επομένως η κυμάτωση εξόδου γράφεται :

$$V_{\text{ripple}} = V_{\max} - V_{\min} = V_1 \frac{(1-e^{\alpha kT})(1-e^{(1-\alpha)kT})}{1-e^{-kT}} = V_1 \frac{1-e^{\alpha kT} - e^{(1-\alpha)kT} + e^{\alpha kT} e^{(1-\alpha)kT}}{1-e^{-kT}} \xrightarrow{\text{B-14}}$$

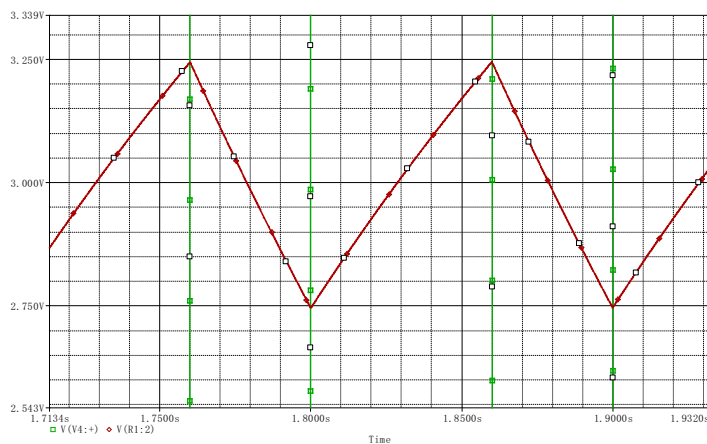
$$V_{\text{ripple}} = V_1 \frac{1-e^{\alpha kT} - e^{(1-\alpha)kT} + e^{kT}}{1-e^{-kT}} \quad \text{B - 15}$$

Η μέση τιμή των δύο ακραίων τιμών της κυμάτωσης είναι

$$\bar{V} = \frac{V_{\max} + V_{\min}}{2} = \frac{1}{2} V_1 \frac{1-e^{\alpha kT}}{1-e^{-kT}} (1 + e^{(1-\alpha)kT}) = \frac{V_1}{2} \frac{(1-e^{\alpha kT})(1+e^{(1-\alpha)kT})}{1-e^{-kT}} =$$

$$V_1 \frac{1-e^{\alpha kT} + e^{(1-\alpha)kT} - e^{\alpha kT} e^{(1-\alpha)kT}}{1-e^{-kT}} \xrightarrow{\text{B-14}} \bar{V} = \frac{V_1}{2} \frac{1-e^{\alpha kT} + e^{(1-\alpha)kT} - e^{kT}}{1-e^{-kT}} \quad \text{B - 16}$$

Για να εμφανιστούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο Pspice σε σχέση με τα υπολογιζόμενα, μεγεθύνεται το γράφημα τάσης/χρόνου (εικόνα B-3) σε χρονική στιγμή αρκετά μακριά από το χρόνο μηδέν, δηλαδή όταν έχει επέλθει ισορροπία στο κύκλωμα.



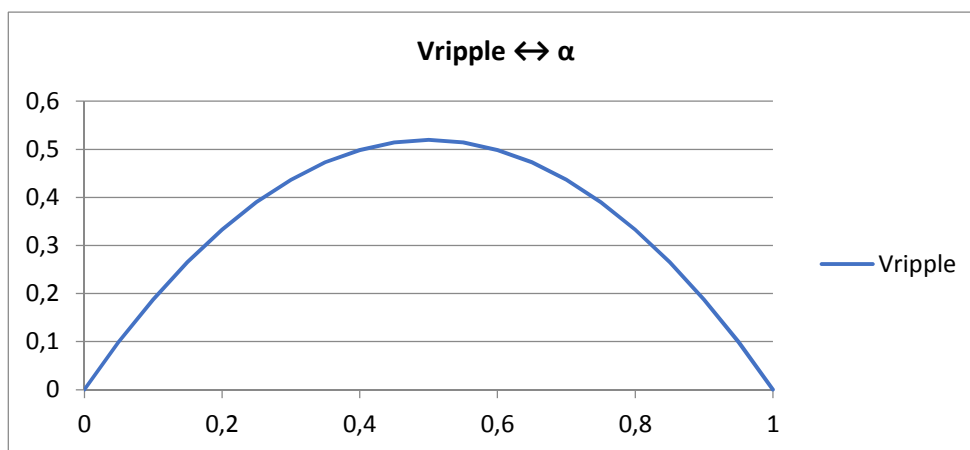
Εικόνα B - 4 : Μεγέθυνση του γραφήματος της προσομοίωσης σε χρόνο κοντά στα 2 second

Οι τιμές που μετρήθηκαν είναι ουσιαστικά οι ίδιες με τις υπολογιζόμενες με χρήση των τύπων B-15 και B-16

	Μέτρηση	Υπολογισμός
V_{\max}	3,2448 V	3,2460 V
V_{\min}	2,7456 V	2,7471 V
V_{ripple}	0,4992 V	0,4989 V
\bar{V}	2,9952 V	2,9965 V

Σημειώνεται ότι οι δύο τελευταίες γραμμές του πίνακα (V_{ripple} και \bar{V}) προέκυψαν αποκλειστικά από υπολογισμούς με δεδομένα τα στοιχεία των δύο πρώτων γραμμών. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση και στους υπολογισμούς υπενθυμίζεται ότι ήταν : $T=100$ ms, $\alpha=60\%$, $V_1=5$ V, $R=5.1$ k Ω και $C=47\mu\text{F}$ (σταθερά εκφόρτισης $RC=240$ ms, $k= - 1/RC$).

Εάν υπολογιστεί η κυμάτωση (B-15) σαν συνάρτηση του α (με τα παραπάνω στοιχεία του κυκλώματος) διαπιστώνουμε ότι το μέγιστο παρουσιάζεται για $\alpha=50\%$.



Εικόνα B - 5 : Κυμάτωση σε σχέση με το α

Αυτό είναι λογικό εφόσον κοντά στις οριακές τιμές 0 και 100% ο πυκνωτής έχει πολύ μικρό χρόνο φόρτισης και εκφόρτισης αντίστοιχα, οπότε η κυμάτωση φθίνει.

Οριακές τιμές

Για τη μαθηματική επιβεβαίωση των παραπάνω σχέσεων, θα υπολογιστούν τα όρια της κυμάτωσης και της μέσης τιμής εξόδου για μεγάλες συχνότητες ($T \rightarrow 0$).

$$\lim_{T \rightarrow 0} V_{\text{ripple}} = \lim_{T \rightarrow 0} V_1 \frac{1 - e^{\alpha k T} - e^{(1-\alpha)kT} + e^{kT}}{1 - e^{kT}} = V_1 \lim_{T \rightarrow 0} \frac{1 - e^{\alpha k T} - e^{(1-\alpha)kT} + e^{kT}}{1 - e^{kT}} = V_1 \frac{1-1-1+1}{1-1} = V_1 \frac{0}{0} \quad (\text{Απροσδιόριστη μορφή}) \quad \text{B - 17}$$

Θα χρησιμοποιηθεί ο κανόνας του L' Hospital:

$$\text{Αν } \lim_{x \rightarrow 0} f = \lim_{x \rightarrow 0} g = 0, \quad \text{τότε } \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f}{g} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\frac{df}{dx}}{\frac{dg}{dx}} \quad \text{B - 18}$$

Οπότε:

$$\lim_{T \rightarrow 0} V_{\text{ripple}} = \lim_{T \rightarrow 0} V_1 \frac{\frac{d}{dT}(1 - e^{\alpha k T} - e^{(1-\alpha)kT} + e^{kT})}{\frac{d}{dT}(1 - e^{kT})} = V_1 \cdot \lim_{T \rightarrow 0} \frac{0 - \alpha k e^{\alpha k T} - (1-\alpha)k e^{(1-\alpha)kT} + k e^{kT}}{0 - k e^{kT}} = V_1 \cdot \frac{0 - \alpha k - (1-\alpha)k + k}{-k} = V_1 \cdot \frac{k(-\alpha - 1 + \alpha + 1)}{-k} = \frac{k \cdot 0}{-k} = 0 \quad \text{B - 19}$$

Τονίζεται ότι παραπάνω έγινε χρήση των κανόνων παραγώγισης:

$$\frac{d(f+g)}{dx} = \frac{df}{dx} + \frac{dg}{dx}, \quad \frac{d}{dx} e^f = \frac{df}{dx} e^f \quad \text{B - 20}$$

Προκύπτει επομένως (B-19) το πολύ λογικό συμπέρασμα ότι η κυμάτωση τείνει να μηδενιστεί όσο αυξάνεται η συχνότητα παραγωγής παλμών PWM.

Μέση τιμή εξόδου:

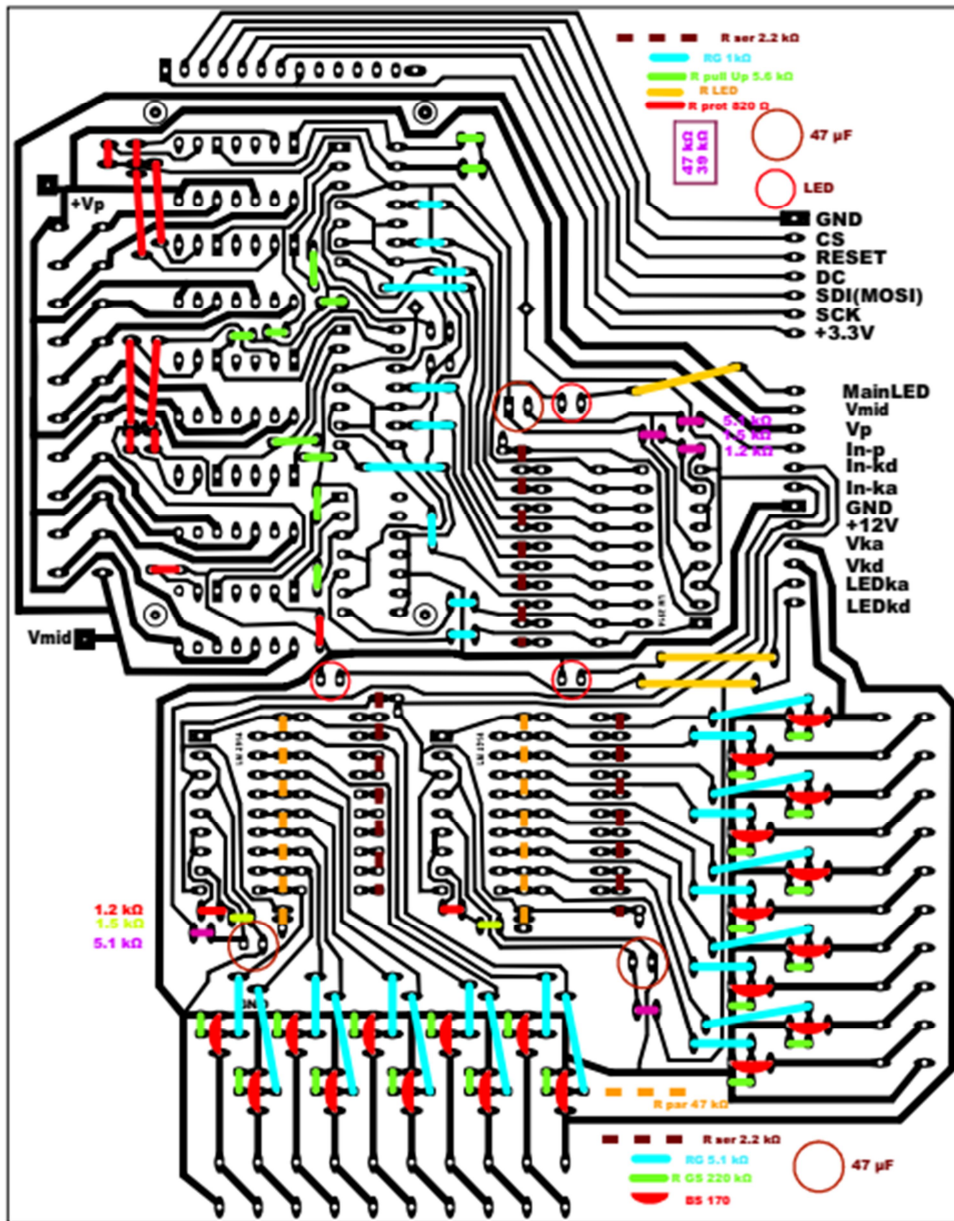
$$\lim_{T \rightarrow 0} \bar{V} = \lim_{T \rightarrow 0} \left(\frac{V_1}{2} \frac{1 - e^{\alpha k T} + e^{(1-\alpha)kT} - e^{kT}}{1 - e^{kT}} \right) = \frac{V_1}{2} \lim_{T \rightarrow 0} \frac{1 - e^{\alpha k T} + e^{(1-\alpha)kT} - e^{kT}}{1 - e^{kT}} = \frac{V_1}{2} \frac{1-1+1-1}{1-1} = \frac{V_1}{2} \frac{0}{0} \quad \text{B - 21}$$

Εφόσον προκύπτει και πάλι απροσδιόριστη μορφή, γίνεται ξανά χρήση του κανόνα του L' Hospital.

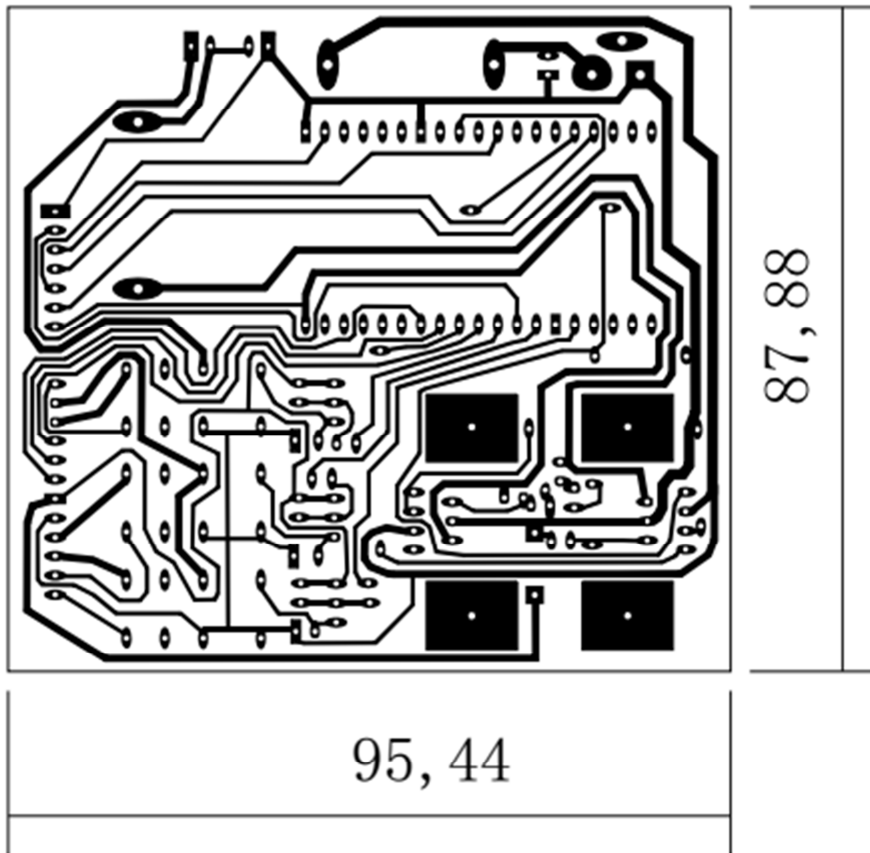
$$\lim_{T \rightarrow 0} \bar{V} = \lim_{T \rightarrow 0} \left(\frac{V_1}{2} \frac{1 - e^{\alpha k T} + e^{(1-\alpha)kT} - e^{kT}}{1 - e^{kT}} \right) = \frac{0}{0} \xrightarrow{\text{B-18}} \lim_{T \rightarrow 0} \bar{V} = \frac{V_1}{2} \lim_{T \rightarrow 0} \frac{\frac{d}{dT}(1 - e^{\alpha k T} + e^{(1-\alpha)kT} - e^{kT})}{\frac{d}{dT}(1 - e^{kT})} = \frac{V_1}{2} \lim_{T \rightarrow 0} \frac{-\alpha k e^{\alpha k T} + (1-\alpha)k e^{(1-\alpha)kT} - k e^{kT}}{-k e^{kT}} = \frac{V_1}{2} \frac{-\alpha k + (1-\alpha)k - k}{-k} = \frac{V_1}{2} \frac{k(-\alpha + 1 - \alpha - 1)}{-k} = \frac{V_1}{2} \frac{-2k\alpha}{-k} = \alpha \cdot V_1 \quad \text{B - 22}$$

Προκύπτει και εδώ το προφανές συμπέρασμα ότι όσο αυξάνεται η συχνότητα παραγωγής παλμών, η έξοδος προσεγγίζει το ποσοστό της εφαρμοζόμενης τάσης $\alpha \cdot V_1$, όπου α το ποσοστό του χρόνου που η εφαρμοζόμενη τάση είναι HIGH. Σημειώνεται ότι εφόσον V_{max} και V_{min} για μεγάλες συχνότητες τείνουν να συμπίπτουν η μία με την άλλη και επομένως και με την τιμή \bar{V} , το ίδιο συμπέρασμα θα προέκυπτε εάν υπολογιζόταν το όριο οποιουδήποτε από τα μεγέθη $V_{\text{max}}, V_{\text{min}}$, όταν $T \rightarrow 0$

Το σχέδιο με τα εξαρτήματα σε διαφορετικά χρώματα.



Το σχέδιο της πίσω πλακέτας (ESP board) σε φυσικό μέγεθος.



Το σχέδιο με τα εξαρτήματα σε διαφορετικά χρώματα.

