



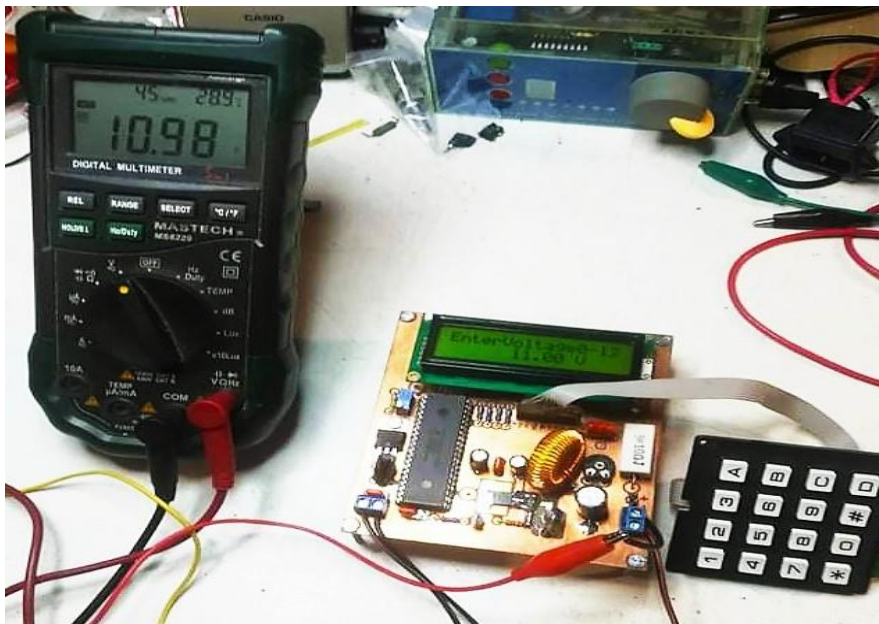
ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΑΠΟ ΣΥΝΕΧΗ ΤΑΣΗ ΣΕ ΣΥΝΕΧΗ ΜΕ
ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΟΣ ΑΠΟ
ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ»



Της φοιτήτριας

Βλάχου Ειρήνης

Αρ. Μητρώου: 515306

Επιβλέπων

Γιακουμής Άγγελος

Λέκτορας

Ημερομηνία: 14/09/2021

Τίτλος Δ.Ε. Μετατροπέας από συνεχή τάση (DC – DC) με μεταβλητή τάση εξόδου ελεγχόμενος από
μικροελεγκτή
Κωδικός Δ.Ε. 20126
Ονοματεπώνυμο φοιτητή/των Βλάχου Ειρήνη
Ονοματεπώνυμο εισηγητή Γιακουμής Άγγελος
Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 31-03-2020
Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 14-09-2021

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 της φοιτήτριας Βλάχου Ειρήνης που την εκπόνησε/αν. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με 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.

Πρόλογος

Τα ηλεκτρονικά, και κυρίως τα ηλεκτρονικά ισχύος, αναφέρονται σε μία πληθώρα ηλεκτρονικών διατάξεων. Βρίσκουν εφαρμογή σε ποικίλες εφαρμογές. Από την μικρότερη και απλούστερη, μέχρι την μεγαλύτερη και πολυπλοκότερη.

Για όλες τις εφαρμογές ηλεκτρονικών είναι αναγκαία η ύπαρξη τροφοδοσίας, δηλαδή τάσης στην είσοδό τους, έτσι ώστε να την χρησιμοποιήσει το εκάστοτε κύκλωμα όπως έχει σχεδιαστεί. Η παροχή τάσης πραγματοποιείται με τη χρήση ειδικών διατάξεων που ονομάζονται τροφοδοτικά. Τα τροφοδοτικά αποτελούν δομικό στοιχείο κάθε ηλεκτρονικού κυκλώματος, και μπορούν να σχεδιαστούν με διαφορετικούς τρόπους, χρησιμοποιώντας ποικίλα ηλεκτρονικά στοιχεία.

Δεδομένης της σημαντικότητας των τροφοδοτικών διατάξεων, η πτυχιακή αυτή εργασία μελετά και αναλύει τις τροφοδοτικές διατάξεις, επικεντρώνοντας την προσοχή της στα διακοπτικά τροφοδοτικά. Αποτελούν κατηγορία τροφοδοτικών με ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Στόχος της είναι η μελέτη των διακοπτικών τροφοδοτικών, καθώς και η κατασκευή ενός, και πιο συγκεκριμένα ενός μετατροπέα από συνεχή τάση σε συνεχή με μεταβλητή τάση εξόδου ελεγχόμενο από μικροελεγκτή.

Περίληψη

Σκοπός αυτής της πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη, κατασκευή και παρουσίαση μίας διάταξης ενός DC – DC μετατροπέα μεταβλητής τάσης εξόδου, ελεγχόμενου από μικροελεγκτή, μέσω του οποίου θα εισάγεται μία τιμή επιθυμητής τάσης σε ένα συγκεκριμένο εύρος, χρησιμοποιώντας γνώσεις από ποικίλα μαθήματα που διδάχθηκαν.

Χρησιμοποιώντας γνώσεις από διδαχθέντα μαθήματα, όπως Μικροελεγκτές I και II, Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου και Ηλεκτρονικά Ισχύος, η παρούσα εργασία βασίζεται στον μικροελεγκτή PIC18F4550, η χρήση του οποίου έχει ως σκοπό τον καθορισμό της επιθυμητής τάσης εξόδου. Από τις γνώσεις που αποκτήθηκαν στα Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου, χρησιμοποιείται ένας PID ελεγκτής, ο οποίος διαμορφώνεται στον κώδικα που συντάχθηκε στον μικροελεγκτή, και είναι απαραίτητος, ώστε να διατηρείται σταθερή η τάση εξόδου με την χρήση ανάδρασης. Από τις γνώσεις που αποκτήθηκαν στα Ηλεκτρονικά Ισχύος, σχεδιάστηκε κύκλωμα μετατροπέα Buck (υποβιβασμού τάσης), με σκοπό στην έξοδο να λαμβάνουμε συνεχή τάση εξόδου χαμηλότερη από τη συνεχή τάση εισόδου του κυκλώματος του μετατροπέα.

Έχει, επίσης, τοποθετηθεί ένα πληκτρολόγιο 4×4, προκειμένου να γίνεται εισαγωγή της επιθυμητής τάσης εξόδου, ενώ χρησιμοποιείται και μία οθόνη LCD για την εμφάνιση της τάσης που εισάγεται από το πληκτρολόγιο.

Στο θεωρητικό υπόβαθρο αναλύεται διεξοδικά η θεωρία που διέπει το σύνολο της πτυχιακής εργασίας, καθώς γίνεται αναφορά στην θεωρία των τροφοδοτικών, καθώς και εκτενής αναφορά στους μετατροπείς DC – DC. Κατόπιν, δίνονται πληροφορίες για τον μικροελεγκτή που επιλέχθηκε, καθώς και για τον PID ελεγκτή. Τέλος, το θεωρητικό μέρος κλείνει με τους υπολογισμούς των στοιχείων που θα τοποθετηθούν στον μετατροπέα υποβιβασμού τάσης.

Abstract

The purpose of this thesis is to study, construct and present a device of a DC – DC variable output voltage converter, controlled by a microcontroller, through which a desired voltage value will be introduced in a certain range, using all the knowledge from various courses that were taught.

As said, using knowledge from courses taught, such as Microcontrollers I and II, Automatic Control Systems and Power Electronics, the present work is based on the PIC18F4550 microcontroller, the use of which is to determine the desired output voltage. From the knowledge acquired in Automatic Control Systems, a PID controller is used, which is formulated in the code drawn up in the microcontroller, and he is necessary to maintain a constant output voltage using feedback. Also, from the knowledge acquired in Power Electronics, a Buck (voltage drop) converter circuit was designed, in order to obtain a constant output voltage lower than the constant input voltage of the converter circuit.

A 4x4 keyboard has been installed for the user to input the desired output voltage, while an LCD screen is, also, used to display the user's voltage input from the keyboard.

In the theoretical background, the theory that governs the whole thesis is analyzed in detail, as reference is made to the theory of power supplies, as well as an extensive reference to DC – DC converters. Information is then given about the selected microcontroller, as well as the PID controller. Finally, the theoretical part closes with the calculations of the elements that will be placed in the Buck converter.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	3
Περίληψη.....	4
Abstract	5
Κατάλογος Σχημάτων	8
Εισαγωγή.....	10
Κεφάλαιο 1 ^ο : Τροφοδοτικά – Είδη, Χαρακτηριστικά και Διαφορές	11
1.1 Γραμμικά Τροφοδοτικά – Δομή και Αρχή Λειτουργίας	11
1.2 Διακοπτικά Τροφοδοτικά – Αρχή Λειτουργίας και Τοπολογίες.....	14
1.3 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Γραμμικών και Διακοπτικών Τροφοδοτικών	16
1.4 Χαρακτηριστικά Γραμμικών και Διακοπτικών Τροφοδοτικών	17
1.4.1 Χαρακτηριστικά Γραμμικών Τροφοδοτικών	17
1.4.2 Χαρακτηριστικά Διακοπτικών Τροφοδοτικών.....	19
Κεφάλαιο 2 ^ο : Διακοπτικοί Μετατροπείς Συνεχούς Ρεύματος – Τεχνική PWM	22
2.1 Μετατροπείς Συνεχούς Ρεύματος Χωρίς Γαλβανική Απομόνωση	22
2.2 Αρχή Λειτουργίας των Μετατροπέων Συνεχούς Ρεύματος	23
2.3 Μετατροπέας Υποβιβασμού της Τάσης.....	24
2.3.1 Συνεχής Αγωγή του Ρεύματος.....	25
2.3.2 Ασυνεχής Αγωγή του Ρεύματος.....	28
2.3.3 Κυμάτωση της Τάσης Εξόδου.....	29
2.4 Μετατροπέας Ανύψωσης της Τάσης.....	30
2.4.1 Συνεχής Αγωγή του Ρεύματος.....	31
2.4.2 Ασυνεχής Αγωγή του Ρεύματος.....	33
2.4.3 Κυμάτωση της Τάσης Εξόδου.....	34
2.4.4 Πρακτικός Μετατροπέας Ανύψωσης της Τάσης.....	34
2.5 Τεχνική Διαμόρφωσης του Εύρους Παλμών – PWM.....	35
2.6 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα της Τεχνικής PWM.....	37
Κεφάλαιο 3 ^ο : Μικροελεγκτές – PID Ελεγκτές.....	38
3.1 Μικροελεγκτές	38
3.1.1 Ορισμός και Πεδία Εφαρμογών	38
3.1.2 Ιστορική Αναδρομή.....	39
3.1.3 Κριτήρια Επιλογής Μικροελεγκτή.....	40
3.2 PID Ελεγκτές.....	41

3.2.1 Χρησιμότητα PID Ελεγκτών	41
3.2.2 Αρχές Λειτουργίας	42
3.2.2.1 Διάδραση	42
3.2.2.2 Αναλογικός Όρος	43
3.2.2.3 Ολοκληρωτικός Όρος.....	43
3.2.2.4 Διαφορικός Όρος.....	45
3.2.2.4 Εξίσωση του PID Ελεγκτή	46
Κεφάλαιο 4 ^ο : Μελέτη – Σχεδίαση Παλμοτροφοδοτικού Ελεγχόμενου από Μικροελεγκτή	49
4.1 Αρχή Λειτουργίας Παλμοτροφοδοτικού	49
4.2 Επιλογή Κατάλληλων Ηλεκτρονικών Στοιχείων	50
4.3 Επιλογή Μικροελεγκτή και PID ελεγκτή.....	52
4.4 Προσομοίωση Παλμοτροφοδοτικού στο Λογισμικό Proteus 8.12.....	55
4.5 Κώδικας Μικροελεγκτή	61
4.6 Σχεδίαση PCB Πλακέτας Παλμοτροφοδοτικού με το Λογισμικό EasyEDA.....	62
4.7 Υλοποίηση Παλμοτροφοδοτικού και Μετρήσεις.....	64
Κεφάλαιο 5 ^ο : Συμπεράσματα και Βελτιώσεις.....	72
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	73
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΚΩΔΙΚΑΣ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ	74

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Γενική δομή γραμμικών τροφοδοτικών [1].....	11
Σχήμα 1.2 (α) Γραμμικό τροφοδοτικό με χρήση μετασχηματιστή με μεσαία λήψη, (β) Γραμμικό τροφοδοτικό με χρήση μετασχηματιστή χωρίς μεσαία λήψη [2].....	12
Σχήμα 1.3: Λειτουργικό διάγραμμα διακοπτικών τροφοδοτικών [1].....	13
Σχήμα 1.4: Διάγραμμα επιλογής τοπολογίας διακοπτικού τροφοδοτικού [2].....	16
Σχήμα 2.1: Στοιχειώδης μετατροπέας συνεχούς ρεύματος ενός διακόπτη [1].....	23
Σχήμα 2.2: Κυματομορφή της τάσης εξόδου του στοιχειώδη μετατροπέα συνεχούς ρεύματος [1]....	23
Σχήμα 2.3: Έλεγχος διακοπτικού μετατροπέα σε κλειστό βρόχο, με την τεχνική PWM [1].....	24
Σχήμα 2.4: Δομή κυκλώματος μετατροπέα υποβιβασμού της τάσης [1].....	25
Σχήμα 2.5: Κυματομορφές τάσης και ρεύματος του μετατροπέα υποβιβασμού της τάσης σε συνεχή αγωγή του ρεύματος [1].....	26
Σχήμα 2.6: Κυματομορφές τάσης και ρεύματος του μετατροπέα υποβιβασμού της τάσης στο όριο της λειτουργίας με συνεχή αγωγή του ρεύματος [1].....	27
Σχήμα 2.7: Κυματομορφές τάσης και ρεύματος μετατροπέα υποβιβασμού της τάσης με ασυνεχή αγωγή του ρεύματος [1].....	28
Σχήμα 2.8: Κυμάτωση της τάσης εξόδου σε συνεχή αγωγή ρεύματος στον μετατροπέα [1].....	29
Σχήμα 2.9: Δομή του κυκλώματος μετατροπέα ανύψωσης της τάσης [1].....	30
Σχήμα 2.10: Κυματομορφές τάσης και ρεύματος μετατροπέα ανύψωσης τάσης σε συνεχή αγωγή ρεύματος [1].....	31
Σχήμα 2.11: Κυματομορφές τάσης και ρεύματος μετατροπέα ανύψωσης τάσης στο όριο της λειτουργίας με συνεχή αγωγή του ρεύματος [1].....	32
Σχήμα 2.12: Κυματομορφές τάσης και ρεύματος μετατροπέα ανύψωσης τάσης σε ασυνεχή αγωγή του ρεύματος [1].....	33
Σχήμα 2.13: Κυμάτωση της τάσης εξόδου όταν ο μετατροπέας ανύψωσης της τάσης λειτουργεί σε συνεχή αγωγή ρεύματος [1].....	34
Σχήμα 2.14: Επίδραση παρασιτικών στοιχείων στην τάση εξόδου του μετατροπέα ανύψωσης τάσης [1].....	35
Σχήμα 2.15: PWM παλμοσειρές διαφόρων τιμών κύκλου εργασίας [3].....	36
Σχήμα 2.16: Απλοποιημένο λειτουργικό διάγραμμα ενός διακοπτικού τροφοδοτικού ελεγχόμενο με την τεχνική PWM και με ηλεκτρική απομόνωση.....	36
Σχήμα 3.1: Τσιπ μικροελεγκτών [8].....	38
Σχήμα 3.2: Παράδειγμα αρχιτεκτονικής ενός μικροελεγκτή [9].....	40
Σχήμα 3.3: Μπλοκ – διάγραμμα διεργασίας με αρνητική ανάδραση [7].....	43
Σχήμα 3.4: Επίδραση αναλογικού όρου σε διεργασία [7].....	44
Σχήμα 3.5: Εφαρμογή ολοκληρωτικού όρου στην προηγούμενη απόκριση, διατηρώντας το αναλογικό κέρδος σταθερό [7].....	45
Σχήμα 3.6: Εφαρμογή διαφορικού όρου στην προηγούμενη απόκριση, διατηρώντας τα υπόλοιπα κέρδη σταθερά [7].....	46
Σχήμα 4.1: Μπλοκ – διάγραμμα του αναπτυχθέντος παλμοτροφοδοτικού.....	49
Σχήμα 4.2: Κυματομορφή τάσης επαγωγέα v_L	50
Σχήμα 4.3: Βαθμίδα μετατροπέα Buck.....	52
Σχήμα 4.4: Μπλοκ – διάγραμμα ενός συστήματος αυτομάτου ελέγχου κλειστού βρόχου.....	53
Σχήμα 4.5: Ολοκληρωμένη κυκλωματική διάταξη του παλμοτροφοδοτικού.....	56
Σχήμα 4.6: Το κύκλωμα του παλμοτροφοδοτικού στο περιβάλλον του Proteus 8.12.....	57

Σχήμα 4.7: Προσομοίωση της βαθμίδας του μετατροπέα Buck με τη βοήθεια γεννήτριας.....	57
Σχήμα 4.8: Ρύθμιση πλάτους στα 5V και κύκλου εργασίας της παλμοσειράς στο 10%.....	58
Σχήμα 4.9: Τάση εξόδου 1.4V για κύκλο εργασίας 10%.....	58
Σχήμα 4.10: Ρύθμιση πλάτους στα 5V και κύκλου εργασίας της παλμοσειράς στο 50%.....	59
Σχήμα 4.11: Τάση εξόδου 4.85V για κύκλο εργασίας 50%.....	59
Σχήμα 4.12: Ρύθμιση πλάτους στα 5V και κύκλου εργασίας της παλμοσειράς στο 80%.....	60
Σχήμα 4.13: Τάση εξόδου 9.5V για κύκλο εργασίας 80%.....	60
Σχήμα 4.14: Διάγραμμα ροής κώδικα μικροελεγκτή.....	62
Σχήμα 4.15: Άνω όψη της PCB πλακέτας.....	63
Σχήμα 4.16: Κάτω όψη της PCB πλακέτας.....	63
Σχήμα 4.17: Άνω όψη της τελικής PCB πλακέτας.....	63
Σχήμα 4.18: Κάτω όψη της τελικής PCB πλακέτας.....	63
Σχήμα 4.19: Τελική διάταξη παλμοτροφοδοτικού.....	64
Σχήμα 4.20 Κολλήσεις κάτω όψης πλακέτας.....	64
Σχήμα 4.21 Τροφοδοσία της πλακέτας του παλμοτροφοδοτικού.....	65
Σχήμα 4.22: Επιθυμητή τάση εξόδου: 1V, Μετρούμενη τάση εξόδου: 1V (αριστερά), Επιθυμητή τάση εξόδου: 7V, Μετρούμενη τάση εξόδου: 6.99V (δεξιά).....	66
Σχήμα 4.23: Επιθυμητή τάση εξόδου: 11V, Μετρούμενη τάση εξόδου: 10.98V.....	67
Σχήμα 4.24: Επιθυμητή τάση εξόδου: 1V, Παραγόμενη Παλμοσειρά PWM, Μετρούμενη τάση εξόδου: 999mV.....	67
Σχήμα 4.25: Επιθυμητή τάση εξόδου: 1.5V, Παραγόμενη Παλμοσειρά PWM, Μετρούμενη τάση εξόδου: 1.51V.....	68
Σχήμα 4.26: Επιθυμητή τάση εξόδου: 3V, Παραγόμενη Παλμοσειρά PWM, Μετρούμενη τάση εξόδου: 3.1V.....	68
Σχήμα 4.27: Επιθυμητή τάση εξόδου: 5V, Παραγόμενη Παλμοσειρά PWM, Μετρούμενη τάση εξόδου: 5.19V.....	69
Σχήμα 4.28: Επιθυμητή τάση εξόδου: 8V, Παραγόμενη Παλμοσειρά PWM, Μετρούμενη τάση εξόδου: 7.95V.....	69
Σχήμα 4.29: Επιθυμητή τάση εξόδου: 11V, Παραγόμενη Παλμοσειρά PWM, Μετρούμενη τάση εξόδου: 11V.....	70
Σχήμα 4.30: Επιθυμητή τάση εξόδου: 11.5V, Παραγόμενη Παλμοσειρά PWM, Μετρούμενη τάση εξόδου: 11.5V.....	70

Εισαγωγή

Η παρούσα πτυχιακή εργασία είναι μία ερευνητική μελέτη, περιλαμβάνοντας έννοιες του πεδίου της ηλεκτρονικής. Ως θέμα της έχει την μελέτη και κατασκευή ενός παλμοτροφοδοτικού, ή αλλιώς ενός μετατροπέα συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση, ελεγχόμενου από μικροελεγκτή, και αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια, καθένα από τα οποία ασχολείται και με ένα διαφορετικό κομμάτι της.

Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται μία γενική αναφορά στις τροφοδοτικές διατάξεις, στα είδη που υπάρχουν, στην αρχή λειτουργία που διέπει κάθε είδος, καθώς και στα χαρακτηριστικά του κάθε είδους. Επίσης, γίνεται και μία σύγκριση μεταξύ των ειδών των τροφοδοτικών διατάξεων ως προς τα χαρακτηριστικά τους γνωρίσματα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, μελετώνται οι μετατροπείς συνεχούς ρεύματος, και ειδικότερα οι διακοπτικοί, καθώς γίνεται χρήση τους για την κατασκευή της εργασίας. Αναφέρονται τα διάφορα είδη τους, οι αρχές λειτουργίας τους και τα χαρακτηριστικά τους μεγέθη.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στους μικροελεγκτές και τους PID ελεγκτές, που αποτελούν πολύ σημαντικά κομμάτια της εργασίας.

Και τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο, γίνεται πλήρης μελέτη της προσομοίωσης και κατασκευής του παλμοτροφοδοτικού, με φωτογραφίες και αποτελέσματα μετρήσεων που διενεργήθηκαν προκειμένου να επιβεβαιωθεί η ορθή λειτουργία του.

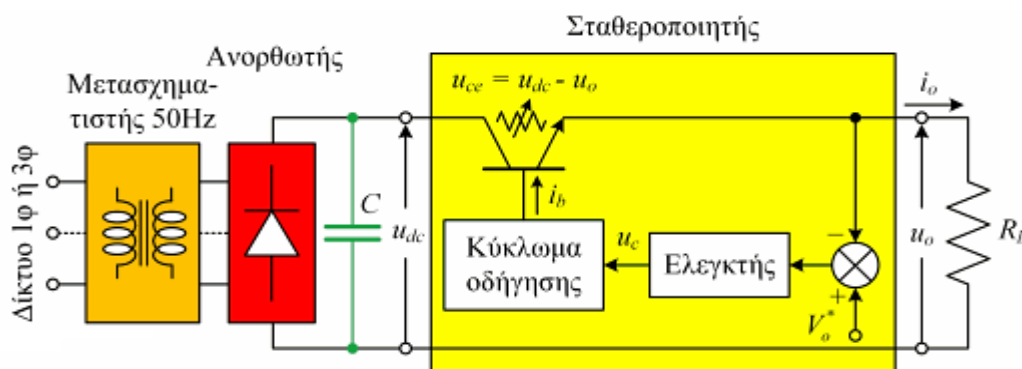
Κεφάλαιο 1^ο: Τροφοδοτικά – Είδη, Χαρακτηριστικά και Διαφορές

Μετατροπείς συνεχούς ρεύματος, συνεχούς τάσης σε συνεχή ή DC – DC Converters, είναι διατάξεις ισχύος που μετατρέπουν τη μορφή μίας συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση, με ρυθμιζόμενο σταθερό πλάτος, ακόμη και πολικότητα. Τα δύο μεγαλύτερα υποσύνολα αυτών των μετατροπέων αποτελούν τα γραμμικά (Linear Power Supplies) και τα διακοπτικά (Switch Mode Power Supplies) τροφοδοτικά ή παλμοτροφοδοτικά, η θεωρία των οποίων θα περιγραφεί συνοπτικά στο πρώτο κεφάλαιο [1].

1.1 Γραμμικά Τροφοδοτικά – Δομή και Αρχή Λειτουργίας

Η γενική δομή των γραμμικών τροφοδοτικών απεικονίζεται στο Σχήμα 1.1. Η ηλεκτρική απομόνωση της τάσης εξόδου από την τάση δικτύου εξασφαλίζεται με έναν μετασχηματιστή, που λειτουργεί στη συχνότητα δικτύου (50Hz) και ο λόγος μετασχηματισμού $\frac{N_1}{N_2}$ επιλέγεται ανάλογα με την επιθυμητή τάση εξόδου u_o . Η τάση του δευτερεύοντος τυλίγματος του μετασχηματιστή μετατρέπεται σε συνεχή u_{dc} , καθώς πρώτα ανορθώνεται μέσω δύο διόδων και έπειτα εξομαλύνεται από τον, υψηλής χωρητικότητας, πυκνωτή C [1].

Η, πλέον, συνεχής τάση u_{dc} ρυθμίζεται στην επιθυμητή τιμή εξόδου u_o από τον σταθεροποιητή. Πρόκειται για ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου σε κλειστό βρόχο, αποτελούμενο από ένα διπολικό τρανζίστορ ισχύος που λειτουργεί στην ενεργό (γραμμική) περιοχή, το κύκλωμα οδήγησης της βάσης του και τον ελεγκτή. Η τιμή της τάσης εξόδου u_o συγκρίνεται με μία τάση αναφοράς V_o^* . Το σήμα σφάλματος u_e , που προκύπτει μέσω του ελεγκτή και του κυκλώματος οδήγησης της βάσης του τρανζίστορ, ελέγχει και το ρεύμα της βάσης του τρανζίστορ, το οποίο και έχει ουσιαστικά τον ρόλο μεταβλητής αντίστασης [1].



Σχήμα 1.1: Γενική δομή γραμμικών τροφοδοτικών [1]

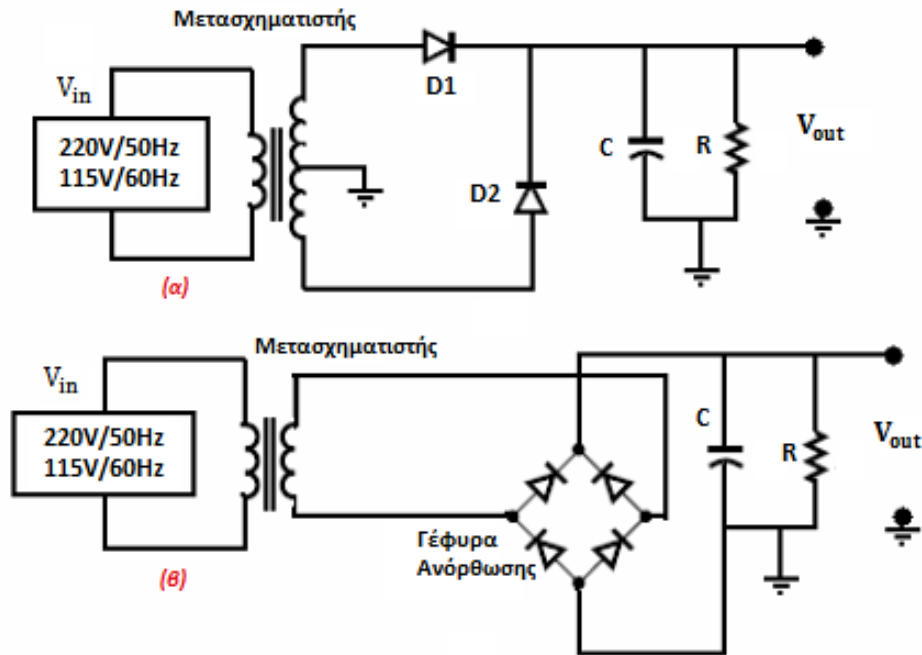
Τα χαρακτηριστικά των γραμμικών τροφοδοτικών είναι τα εξής:

- απλή κατασκευή,
- χαμηλή κυμάτωση τάσης εξόδου,
- πολύ καλή σταθεροποίηση τροφοδοσίας και φορτίου,

- ταχεία απόκριση σε μεταβολές του φορτιού και της γραμμής τροφοδοσίας, και
- χαμηλή ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (EMI).

Ωστόσο, έχουν πολύ χαμηλό συντελεστή απόδοσης και αδυναμία να χειριστούν μεγάλα φορτία [2].

Στο Σχήμα 1.2 παρακάτω, παρατηρούμε δύο πολύ κοινά διαγράμματα γραμμικών τροφοδοτικών.



Σχήμα 1.2 (α) Γραμμικό τροφοδοτικό με χρήση μετασχηματιστή με μεσαία λήψη, (β) Γραμμικό τροφοδοτικό με χρήση μετασχηματιστή χωρίς μεσαία λήψη [2]

Σε κάθε ένα από αυτά, η πλήρως ανορθωμένη κυματομορφή της τάσης οδηγείται στον πυκνωτή εξομάλυνσης C. Στην συνδεσμολογία με τις δύο διόδους και τον μετασχηματιστή με την μεσαία λήψη, στο Σχήμα 1.2 (α), μπορούμε να έχουμε περισσότερη απόδοση στην ισχύ εξόδου, καθώς σε κάθε ημιπερίοδο λειτουργεί μόνο μία διάδος. Άρα:

$$V_o = V_S - V_{fwd} \quad (1.1)$$

Πρακτικά, με την συγκεκριμένη διάταξη μπορούμε να δημιουργήσουμε τάση εξόδου από 5 έως 12 Volts [2].

Το κύκλωμα ανόρθωσης, στο Σχήμα 1.2 (β), αποτελείται από έναν μετασχηματιστή χωρίς μεσαία λήψη, μετά τον οποίο ακολουθεί η γέφυρα ανόρθωσης. Το ρεύμα, ανάλογα την ημιπερίοδο, διαρρέει εναλλάξ δύο από τις τέσσερις διόδους. Μειονέκτημά της είναι η υψηλή πτώση τάσης πάνω στις διόδους, η οποία θεωρητικά είναι $2 * V_{fwd}$ [2]. Οπότε η έξοδος είναι:

$$V_o = V_S - (2 * V_{fwd}) \quad (1.2)$$

Και στις δύο συνδεσμολογίες, καλύτερη επιλογή διόδων κρίνεται η χρήση διόδων Schottky και όχι ultra – fast διόδων, καθώς αυτές μειώνουν τον συντελεστή απόδοσης. Ωστόσο, στην συνδεσμολογία (α), κάθε διάδος θα πρέπει να αντέχει την διπλάσια ανάστροφη τάση από ότι στην συνδεσμολογία (β), για την ίδια τάση εισόδου. Τέλος, για βελτίωση της τάσης εξόδου τοποθετείται συνήθως σταθεροποιητής τάσης σε μορφή ολοκληρωμένου (78XX, 79XX, LM317, κ.ά.). Η λειτουργία του σταθεροποιητή μπορεί να χαρακτηριστεί ως μεταβλητή αντίσταση μεταξύ εισόδου και εξόδου, που παρέχει την τάση εξόδου V_o . Η ισχύς που καταναλώνεται από την όλη διάταξη είναι [2]:

$$P = (V_{in} - V_{out}) * I_{out} \quad (1.3)$$

Άλλοι χρήσιμοι τύποι για την απόδοση του τροφοδοτικού είναι οι παρακάτω [2]:

$$\text{Σταθεροποίηση γραμμής} = \frac{V_{HL} - V_{LL}}{V_{LL}} * 100\% \quad (1.4)$$

Ο τύπος σταθεροποίησης γραμμής δηλώνει πόσο μεταβάλλεται η τάση φορτίου όταν μεταβάλλεται η τάση γραμμής. Όπου V_{HL} είναι η τάση φορτίου με υψηλή τάση γραμμής και V_{LL} η τάση φορτίου με χαμηλή τάση γραμμής.

$$\text{Σταθεροποίηση φορτίου} = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} * 100\% \quad (1.5)$$

Ο τύπος σταθεροποίησης φορτίου δηλώνει πόσο μεταβάλλεται η τάση φορτίου όταν μεταβάλλεται το ρεύμα φορτίου. Όπου V_{NL} είναι η τάση φορτίου χωρίς ρεύμα φορτίου και V_{FL} η τάση φορτίου με πλήρες ρεύμα φορτίου.

Αντίσταση εξόδου:

$$R_{TH} = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{I_{FL}} \quad (1.6)$$

Μέση τιμή τάσης εξόδου:

$$V_{o(AV)} = \frac{V_{peak}}{\sqrt{2}} = V_S \quad (1.7)$$

Ενεργός τιμή τάσης εξόδου:

$$V_{o(RMS)} = 2 * \frac{V_S * \sqrt{2}}{\pi} = 0.9 * V_S \quad (1.8)$$

Μέγιστη ανάστροφη τάση εξόδου σε συνδεσμολογία με χρήση δύο διόδων και μετασχηματιστή με μεσαία λήψη:

$$V_{RRM} = 2 * \sqrt{2} * V_S \quad (1.9)$$

Μέγιστη ανάστροφη τάση εξόδου σε συνδεσμολογία με χρήση δύο διόδων και μετασχηματιστή χωρίς μεσαία λήψη:

$$V_{RRM} = \sqrt{2} * V_S \quad (1.10)$$

Συντελεστής μορφής κύματος:

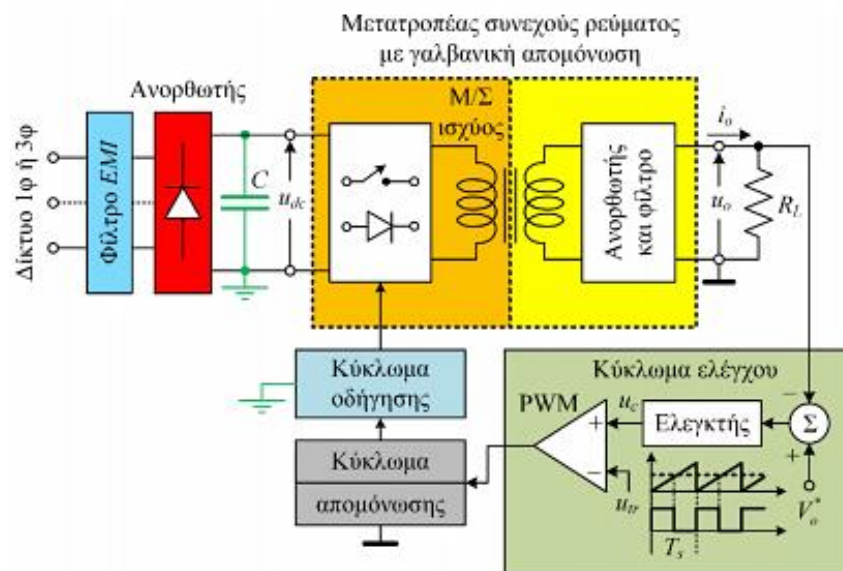
$$Ff = \frac{V_{o(RMS)}}{V_{o(AV)}} = 1.11 \quad (1.11)$$

Συντελεστής κυμάτωσης:

$$r = \sqrt{Ff^2 - 1} = 0.48 \quad (1.12)$$

1.2 Διακοπτικά Τροφοδοτικά – Αρχή Λειτουργίας και Τοπολογίες

Η κύρια μονάδα των διακοπτικών τροφοδοτικών, ή αλλιώς παλμοτροφοδοτικών, είναι ο μετατροπέας συνεχούς ρεύματος, με ή χωρίς γαλβανική απομόνωση. Το λειτουργικό διάγραμμα των διακοπτικών τροφοδοτικών με απομόνωση εικονίζεται στο Σχήμα 1.3. Η συνεχής τάση u_{dc} στην είσοδο του μετατροπέα προέρχεται από απευθείας ανόρθωση και εξομάλυνση της τάσης του δικτύου, η οποία μπορεί να είναι είτε μονοφασική είτε τριφασική. Επίσης, στην είσοδο του μετατροπέα υπάρχει ένα φίλτρο ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής EMI, το οποίο αποτρέπει την εισαγωγή ρευμάτων υψηλής συχνότητας στην διάταξη [1].



Σχήμα 1.3: Λειτουργικό διάγραμμα διακοπτικών τροφοδοτικών [1]

Η μετατροπή αυτής της συνεχούς τάσης εισόδου, στην επιθυμητή σταθεροποιημένη τάση εξόδου, u_o , επιτελείται σε δύο στάδια [1]:

1. Αρχικά, η συνεχής τάση u_{dc} μετατρέπεται σε μεταβαλλόμενη τάση υψηλής συχνότητας με τη χρήση ημιαγωγών διακοπών. Με αυτή τη μεταβαλλόμενη τάση, οδηγείται το κύριο στοιχείο αποθήκευσης μαγνητικής ενέργειας, δηλαδή είτε το πρωτεύον τύλιγμα ενός μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας, είτε ένα απλό πηνίο. Η μεταβαλλόμενη τάση στο δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή, ανορθώνεται από διόδους υψηλής ταχύτητας, και φιλτράρεται, για τη λήψη της τάσης εξόδου u_o .
2. Η ρύθμιση και η σταθεροποίησή της επιτελείται από το κύκλωμα ελέγχου.

Η τάση u_o συγκρίνεται με μία τάση αναφοράς V_o^* και η διαφορά τους παράγει ένα σήμα σφάλματος u_e . Αυτό επεξεργάζεται από το κύκλωμα ελέγχου, το οποίο παράγει το σήμα u_c . Το σήμα αυτό συγκρίνεται με μία περιοδική τριγωνική κυματομορφή u_{tr} , η οποία και ορίζει την συχνότητα λειτουργίας f_s των διακοπών της διάταξης. Το PWM σήμα εξόδου του συγκριτή, προτού χρησιμοποιηθεί για την οδήγηση των διακοπών του μετατροπέα, απομονώνεται [1].

Γενικότερα, ως τοπολογία τροφοδοτικού ορίζεται το σύνολο των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, όπως διακόπτες, ανορθωτές ισχύος, ολοκληρωμένα ελέγχου, καθώς και μαγνητικών υλικών (μετασχηματιστές, πηνία), τα οποία αποτελούν μία διάταξη μετατροπής. Οι βασικότερες τοπολογίες διακοπτικών τροφοδοτικών είναι οι εξής [2]:

➤ Χωρίς απομόνωση:

- Buck,
- Boost,
- Buck – Boost.

➤ Με απομόνωση:

- Flyback,
- Forward,
- Push – Pull,
- Half – Bridge,
- Full – Bridge.

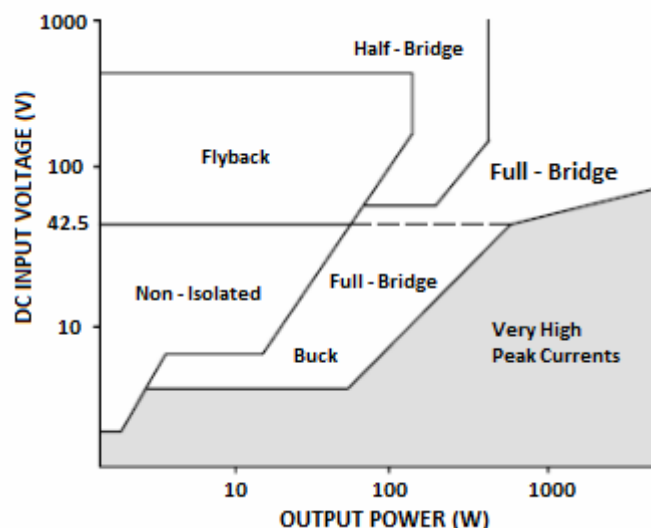
Κάθε τοπολογία έχει ξεχωριστό μέρος εφαρμογών και μπορούμε να επιλέξουμε μία, λαμβάνοντας υπόψιν έξι κύριους παράγοντες [2]:

1. Αν απαιτείται διηλεκτρική απομόνωση μεταξύ εισόδου – εξόδου.
2. Αν απαιτείται να υπάρχουν πολλαπλές έξοδοι.
3. Αν η πιθανή τοπολογία δημιουργεί υπερτάσεις στους ημιαγωγούς.
4. Αν η πιθανή τοπολογία δημιουργεί υπερεντάσεις στους ημιαγωγούς.
5. Τι ποσοστό της τάσης εισόδου μπορεί να δημιουργηθεί στο πρωτεύον του μετασχηματιστή ή στην αυτεπαγωγή.
6. Κόστος κατασκευής.

Ο παράγοντας 1 αναφέρεται σε θέματα ηλεκτρικής ασφάλειας, καθώς τάσεις μεγαλύτερες από 42.5 VDC θεωρούνται, βάσει σχεδιαστών μετατροπέων, ιδιαίτερα επιβλαβείς. Αυτό σημαίνει ότι για μεγαλύτερες τάσεις θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο τοπολογίες με μετασχηματιστή. Η χρήση

αυτού εξασφαλίζει πλήρη διηλεκτρική απομόνωση, καθώς χρησιμοποιείται διαφορετική γείωση από αυτήν της πηγής. Μετασχηματιστές, επίσης, χρησιμοποιούν τα τροφοδοτικά πολλαπλών εξόδων. Τέλος, ο μετατροπέας μπορεί να συνδεθεί κατευθείαν με την AC τροφοδοσία του δικτύου, όπως μία οικιακή συσκευή. Οι παράγοντες 3, 4 και 5 επηρεάζουν την αξιοπιστία του τροφοδοτικού [2].

Στα διακοπτικά τροφοδοτικά, η ροή ισχύος στην έξοδο είναι σταθερή. Όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός και η τάση εισόδου είναι χαμηλή, υπάρχει ένα υψηλό ρεύμα, ώστε η ισχύς να είναι πάλι σταθερή. Η σχέση μεταξύ τάσης και ρεύματος εισόδου είναι αντίστροφη για την διατήρηση της ισχύος εξόδου. Συνηθίζεται κατά την σχεδίαση να επιλέγεται τέτοιος μετασχηματιστής, ή πηνίο, που να μπορεί να δέχεται υψηλή τάση, ώστε το ρεύμα εισόδου να είναι μικρό. Αυτό οφείλεται στην αδυναμία αρκετών ημιαγωγών και άλλων εξαρτημάτων να δεχθούν υπερεντάσεις. Αντίθετα, οι υπερτάσεις μπορούν να εκλεχθούν με ειδικά δικτυώματα και να εξασφαλιστεί η λειτουργία των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων εντός της περιοχής ασφαλούς λειτουργίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η χρήση τοπολογίας Forward και όχι της τοπολογίας Boost σε ισχύς μεγαλύτερες των 150 Watt, λόγω της διπλάσιας τιμής των ρευμάτων [2].



Σχήμα 1.4: Διάγραμμα επιλογής τοπολογίας διακοπτικού τροφοδοτικού [2]

1.3 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Γραμμικών και Διακοπτικών Τροφοδοτικών

Από την δομή των δύο ειδών τροφοδοτικών που είδαμε, προκύπτουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Οι γραμμικές διατάξεις έχουν απλή δομή ως προς την κατασκευή τους και εξαιρετικά χαρακτηριστικά εξόδου, όπως μικρή κυμάτωση της τάσης εξόδου και πολύ καλή δυναμική συμπεριφορά. Τα μειονεκτήματά τους, ωστόσο, είναι ο μεγάλος όγκος, λόγω του μετασχηματιστή απομόνωσης των 50Hz και του απαγωγέα θερμότητας του σταθεροποιητή, και ο μικρός βαθμός απόδοσης, ο οποίος δεν ξεπερνά το 40 – 50%, γεγονός που οφείλεται στις υψηλές απώλειες στο ρυθμιστικό τρανζίστορ του σταθεροποιητή [1].

Τα παραπάνω μειονεκτήματα των γραμμικών τροφοδοτικών αντιμετωπίζονται στα διακοπτικά τροφοδοτικά, με τη χρήση του μετατροπέα συνεχούς ρεύματος με γαλβανική απομόνωση. Έτσι, μειώνεται δραστικά και ο όγκος και το βάρος τους. Επιπροσθέτως, η σταθεροποίηση της τάσης

εξόδου επιτελείται με τη λειτουργία των τρανζίστορ του μετατροπέα ως διακόπτες, με την τεχνική PWM. Γι' αυτό, οι απώλειες ισχύος είναι εξαιρετικά μικρές και συνήθως δεν απαιτείται η χρήση απαγωγέα θερμότητας. Μειονεκτήματα των διακοπτικών τροφοδοτικών είναι η αυξημένη κυμάτωση της τάσης εξόδου και τα προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής (EMI), από τα ταχέως μεταβαλλόμενα ρεύματα που προκαλεί η διακοπτική λειτουργία των τρανζίστορ. Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών, χρησιμοποιείται, όπως είδαμε στο Σχήμα 1.3 παραπάνω, ένα φίλτρο EMI στην είσοδο των διακοπτικών τροφοδοτικών, καταστέλλοντας έτσι τα υψίσυχνα αρμονικά ρεύματα τα οποία προκαλούν παραμόρφωση της τάσης δικτύου [1].

1.4 Χαρακτηριστικά Γραμμικών και Διακοπτικών Τροφοδοτικών

1.4.1 Χαρακτηριστικά Γραμμικών Τροφοδοτικών

➤ Μέγεθος/Βάρος

Λόγω της συνήθους χρήσης μετασχηματιστή που λειτουργεί σε πολύ χαμηλή (50 – 60 Hz), ο όγκος και το βάρος της κατασκευής είναι μεγάλο [2].

➤ Τάση εξόδου

Σε αυτά τα τροφοδοτικά μπορούμε να δημιουργήσουμε οποιαδήποτε τάση εξόδου (μεγαλύτερη ή μικρότερη από αυτήν της τροφοδοσίας). Για τον υπολογισμό της, έχουμε ως βάση τον τύπο μετασχηματισμού των μετασχηματιστών:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{N_{primary}}{N_{secondary}} = \frac{I_{out}}{I_{in}} \quad (1.13)$$

Σε περίπτωση που δεν χρησιμοποιείται μετασχηματιστής, η τάση εξόδου δεν μπορεί να υπερβεί την τάση εισόδου. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί έτσι ώστε να έχουμε σταθεροποιημένη έξοδο για να μην αλλάζει με της διακύμανσης στην αντίσταση φορτιού R_L [2].

➤ Απόδοση και κατανάλωση ισχύος

Σύνηθες σε σταθεροποιημένα γραμμικά τροφοδοτικά είναι να μετατρέπεται ένα μέρος της ισχύος σε θερμότητα πάνω στις ψήκτρες, το οποίο οδηγεί στην μείωση του συντελεστή απόδοσης στο ποσό του 30 – 40%. Επίσης, εάν δεν είναι σταθεροποιημένο, εμφανίζονται απώλειες ενέργειας στον μετασχηματιστή, και πιο συγκεκριμένα απώλειες στα τυλίγματα χαλκού και στον σιδηροπυρήνα.

Η απόδοση ορίζεται ως εξής:

$$n\% \text{ ή } a\% = \frac{P_{out}}{P_{in}} * 100\% \quad (1.14)$$

όπου P_{out} είναι η ισχύς που καταναλώνεται στο φορτίο και P_{in} η ισχύς που καταναλώνει το κύκλωμα [2].

➤ **Κατασκευή**

Ένα μη σταθεροποιημένο γραμμικό τροφοδοτικό αποτελείται από μία δίοδο και έναν πυκνωτή, ενώ ένα σταθεροποιημένο περιέχει γέφυρα ανόρθωσης, ολοκληρωμένο σταθεροποίησης ή συνδεσμολογία με διακριτά εξαρτήματα (transistor, αντιστάσεις κ.ά.) για σταθεροποίηση και πυκνωτές φίλτρarisματος [2].

➤ **Παρεμβολές από ηλεκτρομαγνητισμό και ραδιοσυχνότητες EMI/RFI**

Σύνηθες εξάρτημα παραγωγής ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής σε αυτά είναι οι δίοδοι ανόρθωσης. Αυτές όταν λειτουργούν με υψηλή τιμή εναλλασσόμενου ρεύματος προκαλούν ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.

➤ **Ηλεκτρονικός θόρυβος στις γραμμές τροφοδοσίας**

Ο ηλεκτρονικός θόρυβος στη γραμμή τροφοδοσίας προκαλεί αρμονική παραμόρφωση, αλλά πολύ μικρή [2].

➤ **Ηλεκτρονικός θόρυβος στις εξόδους**

Στα μη σταθεροποιημένα τροφοδοτικά, ο ηλεκτρονικός θόρυβος στην έξοδο εμφανίζεται ως μία μικρή AC συνιστώσα, υπερτιθέμενη στην DC συνιστώσα εξόδου στην διπλάσια συχνότητα από αυτήν της τροφοδοσίας (100 – 120Hz) [2].

➤ **Ακουστικός θόρυβος**

Ο ακουστικός θόρυβος συνήθως εμφανίζεται όταν δεν είναι σταθεροποιημένα καλά τα τυλίγματα και ο πυρήνας του μετασχηματιστή [2].

➤ **Συντελεστής ισχύος**

Ο συντελεστής ισχύος είναι χαμηλός για ένα σταθεροποιημένο τροφοδοτικό, λόγω του ότι κατανάλωση ρεύματος από την τροφοδοσία ισχύος γίνεται μόνο κατά τις κορυφές της ημίτονης τάσης [2].

➤ **Διασφάλιση ηλεκτρικής απομόνωσης από τις γραμμές ισχύος**

Γενικότερα, στα τροφοδοτικά που χρησιμοποιείται μετασχηματιστής εξασφαλίζεται η μέγιστη δυνατή απομόνωση μεταξύ γραμμής ισχύος και κατανάλωσης, καθώς χρησιμοποιείται διαφορετική γείωση στο φορτίο. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται στην σωστή σύνδεση των τυλιγμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος στην γραμμή ισχύος και κατανάλωση, διαφορετικά η αντίστροφη σύνδεση τους

μπορεί να τον καταστρέψει, ανάλογα βέβαια με την κατασκευή του μετασχηματιστή. Στην ουσία η καταστροφή του γίνεται εάν καταστραφεί η μόνωση στις περιελίξεις. Στα τροφοδοτικά όπου δεν γίνεται χρήση μετασχηματιστή, η λειτουργία τους δεν εξασφαλίζει μόνωση μεταξύ γραμμής ισχύος και φορτίου, το οποίο είναι αρκετά επικίνδυνο [2].

1.4.2 Χαρακτηριστικά Διακοπτικών Τροφοδοτικών

➤ Μέγεθος/Βάρος

Στα διακοπτικά τροφοδοτικά, γίνεται χρήση μικρότερου μετασχηματιστή, διότι λειτουργεί σε πολύ υψηλή συχνότητα τυπικά (50kHz – 1MHz). Η συνολική ενέργεια που μπορεί να διαχειριστεί ένας μετασχηματιστής με δεδομένο μέγεθος, βάρος και υλικό κατασκευής, αυξάνει αναλογικά με την συχνότητα, βέβαια υπό την προϋπόθεση ότι οι απώλειες υστέρησης μπορούν να διατηρηθούν χαμηλά. Βάσει αυτού, μπορούν να κατασκευαστούν μετασχηματιστές οι οποίοι ενώ είναι μικροί σε μέγεθος μπορούν να διαχειριστούν ψηλά ποσά ενέργειας [2].

➤ Τάση εξόδου

Με τα διακοπτικά τροφοδοτικά, μπορούμε να δημιουργήσουμε οποιαδήποτε τάση εξόδου μεγαλύτερη ή μικρότερη της τροφοδοσίας, καθώς επίσης και να το λειτουργήσουμε με τροφοδοσία μεγάλου εύρους τιμών, χωρίς να αλλάξει η τάση εξόδου [2].

➤ Απόδοση και κατανάλωση ισχύος

Στα διακοπτικά τροφοδοτικά, για την ρύθμιση της εξόδου, χρησιμοποιείται PWM έλεγχος, στον οποίο ανάλογα με το φορτίο καθορίζεται ο χρόνος στον οποίο ο πλήρως ελεγχόμενος διακόπτης θα είναι ανοικτός ή κλειστός. Με αυτόν τον τρόπο, οι απώλειες ισχύος περιορίζονται μόνο στην αντίσταση $R_{d(on)}$ του διακόπτη, την ωμική αντίσταση των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή, τα ωμικά μέρη που παρουσιάζουν οι πυκνωτές και τα πηνία εξόδου/εισόδου, καθώς και η πτώση τάσης στην ανορθωτική διάταξη ισχύος. Τυπικές τιμές απόδοσης είναι 65 – 80%. Καθώς, όμως, αναπτύσσεται η τεχνολογία των υλικών κατασκευής αυτών, μπορεί με σωστή επιλογή να επιτευχθεί βαθμός απόδοσης έως και 95%.

Η απόδοση ορίζεται, και εδώ, ως εξής:

$$n\% \text{ ή } a\% = \frac{P_{out}}{P_{in}} * 100\% \quad (1.15)$$

όπου P_{out} είναι η ισχύς που καταναλώνεται στο φορτίο και P_{in} η ισχύς που καταναλώνει το κύκλωμα [2].

➤ Κατασκευή

Γενικότερα, τα διακοπτικά τροφοδοτικά αποτελούνται από έναν ελεγκτή PWM, έναν ή περισσότερους πλήρως ελεγχόμενους διακόπτες, διόδους PN, Zener, Schottky, μετασχηματιστή

ισχύος, πηνία και πυκνωτές. Πολλαπλές εξόδους μπορούμε να έχουμε με χρήση ενός μετασχηματιστή με πολλαπλές λήψεις. Τέλος, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην κατασκευή του τυπωμένου τους κυκλώματος, διότι οι αυτεπαγωγές και οι χωρητικότητες των αγωγών μπορούν να επηρεάσουν ολόκληρη την κατασκευή [2].

➤ **Παρεμβολές από ηλεκτρομαγνητισμό και ραδιοσυχνότητες EMI/RFI**

Η παρεμβολή EMI/RFI δημιουργείται λόγω της απότομης μεταβολής του ρεύματος μεταξύ υψηλής και χαμηλής τιμής. Γι' αυτό, κατασκευάζονται ειδικά φίλτρα EMI/RFI, τα οποία εξασφαλίζουν αποκοπή συχνοτήτων στην είσοδο προς τις γραμμές ισχύος, και στην έξοδο προς την κατανάλωση. Κατά την κατασκευή, θα πρέπει να αποφεύγεται η χρήση ακρών αγωγών μεταξύ των εξαρτημάτων, ώστε να μην μειωθεί η απόδοση φιλτραρίσματος που παρέχουν οι πυκνωτές εισόδου και εξόδου [2].

➤ **Ηλεκτρονικός θόρυβος στις γραμμές τροφοδοσίας**

Εάν στα διακοπτικά τροφοδοτικά δεν τοποθετηθεί φίλτρο εισόδου, μπορεί να εισέλθει εντός της τροφοδοσίας ηλεκτρικός θόρυβος, λόγω διακοπτικής λειτουργίας, προκαλώντας παρεμβολή σε συσκευές εικόνας/ήχου που συνδέονται στην ίδια φάση. Επίσης, εάν ο συντελεστής ισχύος δεν διορθωθεί, προκαλείται αρμονική παραμόρφωση στην φάση του δικτύου. Γενικότερα, για την αποφυγή του θορύβου, θα πρέπει οπωσδήποτε να υπάρχει σωστή γείωση της συσκευής και φίλτρα EMI/RFI μεταξύ τροφοδοσίας ισχύος και γέφυρας ανόρθωσης, καθώς και ένα κύκλωμα διόρθωσης συντελεστή ισχύος [2].

➤ **Ηλεκτρονικός θόρυβος στις εξόδους**

Τα διακοπτικά τροφοδοτικά είναι πολύ πιο θορυβώδη από τα γραμμικά, λόγω της υψίσυχνης διακοπτικής συχνότητας που εφαρμόζεται στον διακόπτη -ες και τελικά στον μετασχηματιστή. Στην πράξη, για την βελτίωση και εξάλειψη, όσο το δυνατόν, του ηλεκτρονικού θορύβου, χρησιμοποιούνται φίλτρα, αποτελούμενα από πυκνωτές και πηνία, στην έξοδο. Ένας άλλος τρόπος είναι να επιλεγεί τέτοια διακοπτική συχνότητα, έτσι ώστε να βρίσκεται εκτός του εύρους λειτουργίας των παρακαμμένων συσκευών, οπότε και δεν θα τις επηρεάζει [2].

➤ **Ακουστικός θόρυβος**

Τα διακοπτικά τροφοδοτικά εν δημιουργούν ακουστικό θόρυβο, εκτός και αν έχουν ανεμιστήρα ψύξεως ή δυσλειτουργούν. Ωστόσο, έχει παρατηρηθεί ότι κατά την εκκίνηση τους και, ανάλογα το κύκλωμα δημιουργίας της διακοπτικής συχνότητας, η συχνότητα αυτή μπορεί να γίνει για μικρό χρονικό διάστημα ακουστική [2].

➤ **Συντελεστής ισχύος**

Λόγω της δημιουργίας αιχμών ρεύματος κατά τις κορυφές του ανορθωμένου AC ημιτόνου, τα διακοπτικά τροφοδοτικά έχουν μεταβλητό συντελεστή ισχύος. Αυτός μπορεί να φτάσει έως και 0.95, αν χρησιμοποιηθεί κύκλωμα διόρθωσής του [2].

➤ **Διασφάλιση ηλεκτρικής απομόνωσης από την γραμμή τροφοδοσίας ισχύος**

Τα διακοπτικά τροφοδοτικά, λόγω κατασκευής, απαιτούν ιδιαίτερη απομόνωση από το δίκτυο και το φορτίο, ανάλογα βέβαια την τοπολογία. Έτσι, όλα περιέχουν ειδικά φίλτρα. Τα φίλτρα αυτά τοποθετούνται και στην είσοδο και στην έξοδο της συσκευής, και συνήθως, αποτελούνται από πυκνωτές και πηνία. Πιο συγκεκριμένα, στην είσοδο δύο πυκνωτές συνδέονται σε σειρά μεταξύ φάσης και ουδετέρου, και μεταξύ αυτών συνδέεται η γείωση. Αυτή η σύνδεση σε διαιρέτη τάσης των πυκνωτών μειώνει την τάση στην μισή, ενώ η χρήση πηνίων δημιουργεί υψηλή αυτεπαγωγή, διατηρώντας την ισχύ εισόδου υψηλή. Τέλος, στην έξοδο η απομόνωση εξαρτάται άμεσα από την τοπολογία [2].

Κεφάλαιο 2^ο: Διακοπτικοί Μετατροπείς Συνεχούς Ρεύματος – Τεχνική PWM

Με χρήση μετατροπέων συνεχούς ρεύματος υλοποιούνται τα διακοπτικά τροφοδοτικά, τα οποία και αφορούν την παρούσα πτυχιακή εργασία. Γι' αυτό, η ανάλυση των βασικότερων από αυτούς, η οποία γίνεται στο παρόν κεφάλαιο, αποτελεί σημαντικότατο και αναπόσπαστο κομμάτι της.

Στη διεθνή βιβλιογραφία, έχουν παρουσιαστεί ποικίλες τοπολογίες μετατροπέων συνεχούς ρεύματος. Ο διαχωρισμός μεταξύ αυτών των τοπολογιών γίνεται βάσει ενός κριτηρίου: εάν υπάρχει ή όχι γαλβανική απομόνωση της εξόδου από την είσοδο. Οι τοπολογίες μετατροπέων συνεχούς ρεύματος *χωρίς γαλβανική απομόνωση* είναι οι μετατροπείς: υποβιβασμού της τάσης (Step – Down, Buck), ανύψωσης της τάσης (Step – Up, Boost), και υποβιβασμού – ανύψωσης (Buck – Boost ή Cuk) της τάσης εξόδου σε σχέση με την τάση εισόδου. Αντίστοιχα, οι τοπολογίες μετατροπέων συνεχούς ρεύματος *με γαλβανική απομόνωση* είναι οι μετατροπείς: υποβιβασμού – ανύψωσης της τάσης (Flyback), και ο μετατροπέας υποβιβασμού (Forward ή Push – Pull) της τάσης εξόδου σε σχέση με την τάση εισόδου. Από όλους τους μετατροπείς που αναφέρθηκαν, μόνο οι Buck και Boost μετατροπείς αποτελούν τις κυριότερες τοπολογίες, τις οποίες και θα αναλύσουμε στο κεφάλαιο αυτό [1].

Όλα τα κυκλώματα μετατροπέων συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούν έναν τουλάχιστον ημιαγωγό διακόπτη, ο οποίος βρίσκεται πάντα είτε σε κατάσταση αγωγής είτε σε κατάσταση αποκοπής. Για τον έλεγχό τους, χρησιμοποιούνται κυρίως δύο τεχνικές:

1. η τεχνική Διαμόρφωσης του Εύρους Παλμού (Δ.Ε.Π., Pulse Width Modulation – PWM), και
2. η τεχνική Διαμόρφωσης της Συχνότητας των Παλμών (Δ.Σ.Π., Pulse Frequency Modulation – PFM).

Η τεχνική Διαμόρφωσης του Εύρους Παλμών συνίσταται στο να διατηρούμε σταθερή τη συχνότητα έναυσης και σβέσης των ημιαγωγών στοιχείων, δηλαδή τη συχνότητα λειτουργίας του μετατροπέα, και να μεταβάλλουμε το χρόνο αγωγής, και επομένως και τον χρόνο αποκοπής, των ημιαγωγών στοιχείων. Έτσι, με διακοπή του ρεύματος ισχύος, εξαιτίας της λειτουργίας του ημιαγωγού διακόπτη, λαμβάνουμε ως αποτέλεσμα ένα παλμικό ρεύμα και μία παλμική τάση, η οποία στη συνέχεια εξομαλύνεται, ώστε να πάρουμε την επιθυμητή τιμή τάσης στην έξοδο του μετατροπέα.

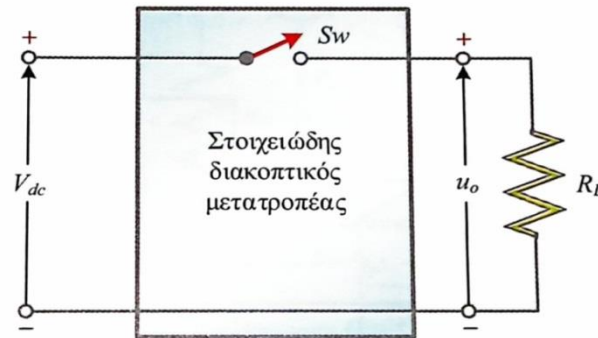
Η τεχνική Διαμόρφωσης της Συχνότητας των Παλμών συνίσταται στο να διατηρούμε σταθερό τον χρόνο αγωγής ή αποκοπής του ημιαγωγού στοιχείου, να μεταβάλλουμε ανάλογα τον χρόνο αποκοπής ή αγωγής, και επομένως την συχνότητα λειτουργίας του μετατροπέα, ώστε να πάρουμε την επιθυμητή έξοδο. Το ποιος από τους δύο χρόνους θα πρέπει να παραμένει σταθερός, εξαρτάται από το είδος του μετατροπέα.

2.1 Μετατροπείς Συνεχούς Ρεύματος Χωρίς Γαλβανική Απομόνωση

Καθώς είπαμε, οι δύο βασικότερες τοπολογίες μετατροπέων συνεχούς ρεύματος χωρίς γαλβανική απομόνωση είναι ο μετατροπέας υποβιβασμού της τάσης και ο μετατροπέας ανύψωσης της τάσης.

2.2 Αρχή Λειτουργίας των Μετατροπέων Συνεχούς Ρεύματος

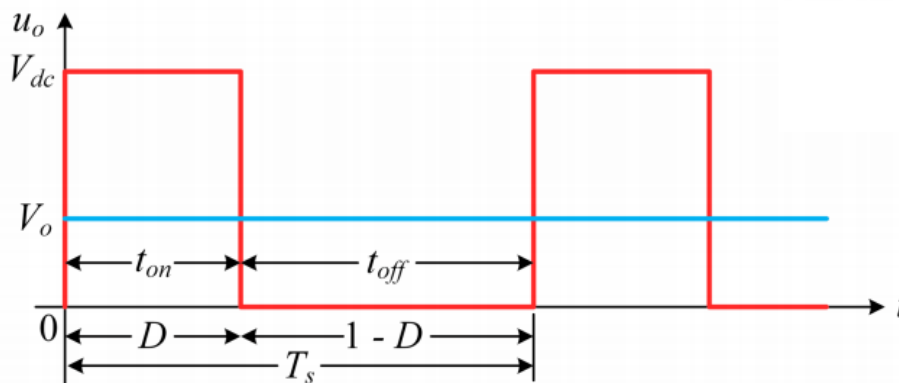
Ένας κλασικός διακοπτικός μετατροπέας συνεχούς ρεύματος απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1. Αποτελείται από έναν διακόπτη Sw που τροφοδοτεί ένα ωμικό φορτίο R_L . Η συνεχής τάση στην είσοδό του προέρχεται, συνήθως, από την ανορθωμένη τάση δικτύου, η οποία εξομαλύνεται με πυκνωτές ή μπαταρίες [1].



Σχήμα 2.1: Στοιχειώδης μετατροπέας συνεχούς ρεύματος ενός διακόπτη [1]

Ο διακόπτης στους μετατροπείς συνεχούς ρεύματος είναι πλήρως ελεγχόμενος, δεδομένου ότι η τάση εισόδου είναι σταθερή. Κυρίαρχος ημιαγωγός διακόπτης είναι το MOSFET, καθώς παρουσιάζει σημαντικότερα πλεονεκτήματα, όπως εύκολη οδήγηση, υψηλή συχνότητα λειτουργίας και πολύ μικρές απώλειες αγωγής σε τάσεις λειτουργίας έως μερικές δεκάδες Volts. Στην ανάλυση των μετατροπέων, ο διακόπτης Sw θεωρείται ιδανικός. Αυτό σημαίνει ότι έχει μηδενική αντίσταση αγωγιμότητας, καθώς και μηδενικούς χρόνους έναυσης και σβέσης [1].

Η τάση εξόδου u_o του μετατροπέα διατηρείται σταθερή στην επιθυμητή τιμή τάσης, ανεξαρτήτως των μεταβολών της τάσης εισόδου V_{dc} και του φορτίου R_L . Η ρύθμιση της τάσης εξόδου στην επιθυμητή τιμή τάσης επιτυγχάνεται με τον έλεγχο των χρονικών διαστημάτων αγωγής και αποκοπής του διακόπτη, με την τάση εξόδου να αποκτά την παλμική μορφή που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2. Η μέση τιμή της τάσης εξόδου V_o διατηρείται σταθερή με τον έλεγχο του κύκλου λειτουργίας του διακόπτη, ενώ η διακοπτική συχνότητα f_s είναι σταθερή [1].



Σχήμα 2.2: Κυματομορφή της τάσης εξόδου του στοιχειώδη μετατροπέα συνεχούς ρεύματος [1]

Ο κύκλος λειτουργίας D του διακόπτη ορίζεται από τη σχέση:

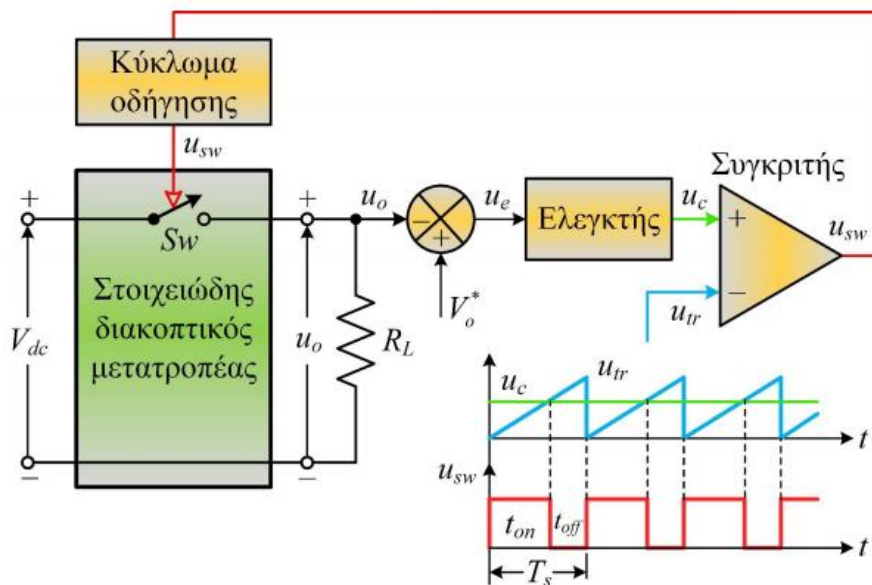
$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (2.1)$$

όπου $T_s = \frac{1}{f_s}$ είναι η διακοπτική περίοδος, η οποία είναι ίση με το άθροισμα των χρονικών διαστημάτων αγωγής t_{on} και αποκοπής t_{off} του διακόπτη. Δηλαδή:

$$T_s = t_{on} + t_{off} \quad (2.2)$$

Αυτή η τεχνική ελέγχου του διακόπτη ονομάζεται Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (Pulse Width Modulation, PWM) και χρησιμοποιείται σε όλους τους τύπους διακοπτικών μετατροπέων συνεχούς ρεύματος [1].

Η τυπική μέθοδος με την οποία ελέγχεται ο κύκλος λειτουργίας σε κλειστό βρόχο εμφανίζεται στο Σχήμα 2.3. Η τάση εξόδου u_o του μετατροπέα συγκρίνεται με την επιθυμητή τιμή της τάσης V_o^* . Το σήμα σφάλματος u_e επεξεργάζεται από έναν ελεγκτή αντιστάθμισης, ο οποίος παράγει το σήμα ελέγχου u_c , που συγκρίνεται με μία περιοδική πριονωτή κυματομορφή. Από τη σύγκριση παράγονται οι παλμοί οδήγησης του διακόπτη με τον κατάλληλο κύκλο λειτουργίας, η συχνότητα των οποίων καθορίζουν την διακοπτική συχνότητα του μετατροπέα [1].



Σχήμα 2.3: Έλεγχος διακοπτικού μετατροπέα σε κλειστό βρόχο, με την τεχνική PWM [1]

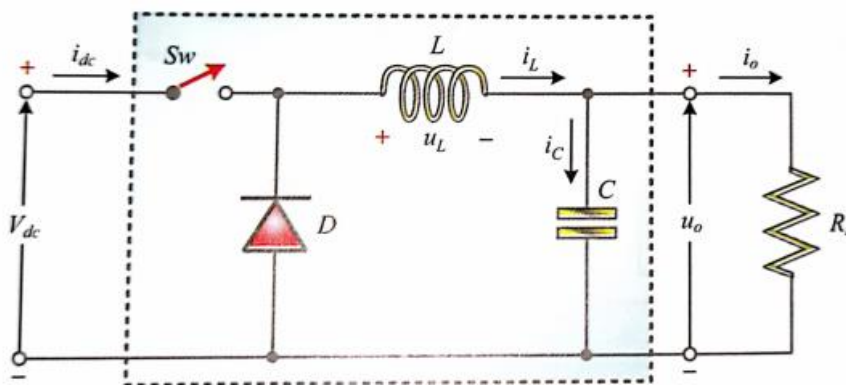
2.3 Μετατροπέας Υποβιβασμού της Τάσης

Ο κλασικός μετατροπέας του Σχήματος 2.1 είναι ένας μετατροπέας υποβιβασμού της τάσης, με δύο μειονεκτήματα. Το πρώτο αφορά την ασταθή στιγμιαία τάση εξόδου, αφού μεταβάλλεται βηματικά από το μηδέν έως την τάση εισόδου V_{dc} , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Η διακύμανση της εξόδου δεν

είναι σε καμία περίπτωση αποδεκτή στις εφαρμογές των διακοπτικών τροφοδοτικών, όπου απαιτείται μία χρονικά αμετάβλητη τάση εξόδου. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με τη χρήση ενός βαθυπερατού LC φίλτρου, η συχνότητα αποκοπής του οποίου επιλέγεται να είναι πολύ μικρότερη από τη διακοπτική συχνότητα, αποκόπτοντας έτσι τη συχνότητα f_s και τις αρμονικές της, επιτρέποντας στην έξοδο τη διέλευση μόνο της συνεχούς συνιστώσας (μέσης τιμής) V_o της παλμικής τάσης u_o .

Το δεύτερο μειονέκτημα εκδηλώνεται όταν το φορτίο έχει επαγωγική συμπεριφορά. Η αποθηκευμένη ενέργεια στην επαγωγή του φορτίου προκαλεί υπερτάσεις στα άκρα του διακόπτη κατά τη σβέση του, πρόβλημα που αντιμετωπίζεται με την τοποθέτηση μίας διόδου ελεύθερης ροής αντιπαράλληλα στο φορτίο, προσθήκη άκρως αναγκαία, ανεξάρτητα από το είδος του φορτίου, όταν χρησιμοποιείται το LC φίλτρο [1].

Με την προσθήκη της διόδου ελεύθερης ροής και το βαθυπερατό LC φίλτρο στον μετατροπέα του Σχήματος 2.1, προκύπτει στο Σχήμα 2.4 ο πρακτικός μετατροπέας υποβιβασμού της τάσης. Στο χρονικό διάστημα που ο διακόπτης Sw άγει, η πηγή εισόδου παρέχει ενέργεια στην επαγωγή και στο φορτίο, ενώ η διόδος ελεύθερης ροής είναι πολωμένη ανάστροφα και δεν άγει. Κατά τη σβέση του διακόπτη, το ρεύμα της επαγωγής ρέει μέσω της διόδου. Όταν το ρεύμα ρέει στην επαγωγή σε όλο το διάστημα αποκοπής του διακόπτη, ο μετατροπέας λειτουργεί με συνεχή αγωγή του ρεύματος [1].

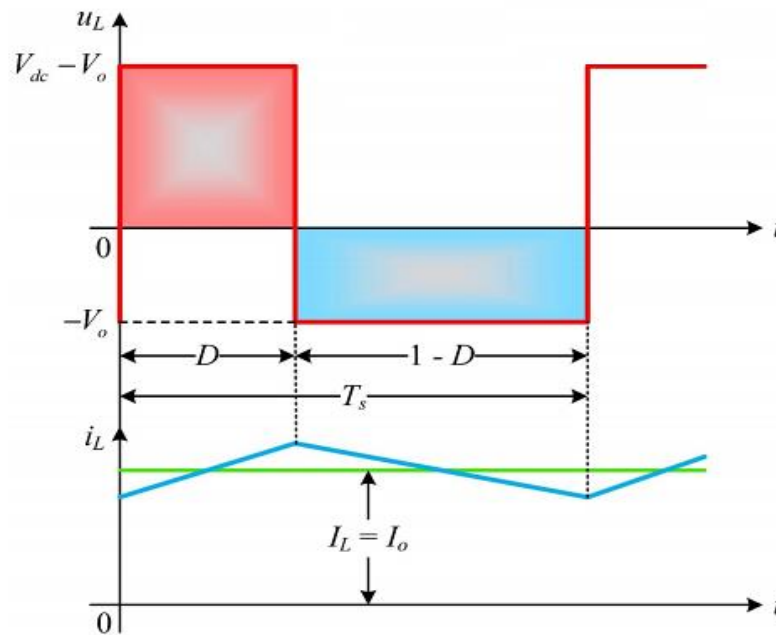


Σχήμα 2.4: Δομή κυκλώματος μετατροπέα υποβιβασμού της τάσης [1]

Αν το ρεύμα της επαγωγής δεν ρέει σε όλη την περίοδο λειτουργίας T_s , αλλά μηδενίζεται στο διάστημα αποκοπής του διακόπτη, ο μετατροπέας λειτουργεί με ασυνεχή αγωγή του ρεύματος. Οι δύο τρόποι λειτουργίας του μετατροπέα υποβιβασμού της τάσης εξετάζονται στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας. Στην κατάσταση ισορροπίας οι κυματομορφές των τάσεων και των ρευμάτων επαναλαμβάνονται όμοιες σε κάθε διακοπτική περίοδο T_s [1].

2.3.1 Συνεχής Αγωγή του Ρεύματος

Ο μετατροπέας υποβιβασμού της τάσης του Σχήματος 2.4 λειτουργεί με συνεχή αγωγή του ρεύματος, όταν το ρεύμα ρέει μέσω της επαγωγής L σε όλη την περίοδο λειτουργίας T_s . Οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος στην επαγωγή απεικονίζονται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5: Κυματομορφές τάσης και ρεύματος του μετατροπέα υποβιβασμού της τάσης σε συνεχή αγωγή του ρεύματος [1]

Η τάση στα άκρα της επαγωγής ισούται με $(V_{dc} - V_o)$ στο διάστημα αγωγής του διακόπτη. Ο διακόπτης άγει για χρόνο ίσο με $t_{on} = D * T_s$ και βρίσκεται σε αποκοπή στο χρονικό διακόπτη $t_{off} = (1 - D) * T_s$. Στο διάστημα αποκοπής του διακόπτη, το ρεύμα της επαγωγής i_L ρέει μέσω της διόδου ελεύθερης ροής και μειώνεται γραμμικά. Η τάση της επαγωγής είναι ίση με την τάση εξόδου V_o . Καθώς η επαγωγή δεν καταναλώνει ενεργό ισχύ, η μέση τιμή της τάσης u_L είναι μηδενική. Επομένως ισχύει η εξίσωση [1]:

$$(V_{dc} - V_o) * D * T_s = V_o * (1 - D) * T_s \quad (2.3)$$

Από την Εξίσωση (2.3) προκύπτει ο λόγος της τάσης εξόδου προς την τάση εισόδου του μετατροπέα:

$$D = \frac{V_o}{V_{dc}} \quad (2.4)$$

Στη λειτουργία του μετατροπέα με συνεχή αγωγή του ρεύματος, η τάση εξόδου εξαρτάται αποκλειστικά από τον κύκλο λειτουργίας και είναι ανεξάρτητη από το ρεύμα του φορτίου I_o . Επίσης, η τάση εξόδου μεταβάλλεται γραμμικά με τον κύκλο λειτουργίας. Αφού θεωρούμε τα στοιχεία του μετατροπέα ιδανικά, η ισχύς εισόδου ισούται με την ισχύ εξόδου. Επομένως [1]:

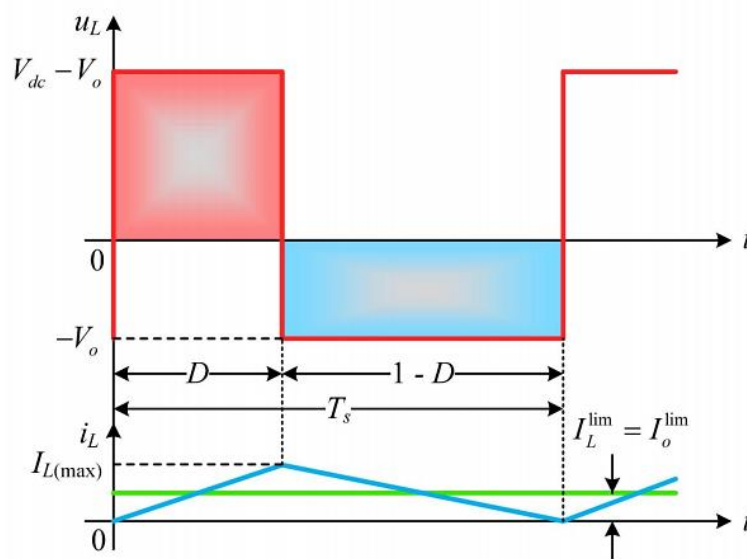
$$V_{dc} * I_{dc} = V_o * I_o \quad (2.5)$$

Από την Εξίσωση (2.5), προκύπτει:

$$D = \frac{V_o}{V_{dc}} = \frac{I_{dc}}{I_o} \quad (2.6)$$

Από την Εξίσωση (2.6), ο μετατροπέας υποβιβασμού της τάσης με συνεχή αγωγή του ρεύματος συμπεριφέρεται ως μετασχηματιστής συνεχούς ρεύματος με ηλεκτρονικά ρυθμιζόμενο λόγο μετασχηματισμού D [1].

Το ρεύμα της επαγωγής i_L εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος που απαιτεί το φορτίο. Καθώς η αντίσταση του φορτίου αυξάνεται, το ρεύμα I_o μειώνεται. Το ρεύμα εξόδου I_o είναι ίσο με τη μέση τιμή του ρεύματος στην επαγωγή $i_L = I_o$. Επομένως, υπάρχει ένα όριο στη λειτουργία του μετατροπέα με συνεχή αγωγή του ρεύματος, στο οποίο οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος στην επαγωγή έχουν τη μορφή του Σχήματος 2.6 [1].



Σχήμα 2.6: Κυματομορφές τάσης και ρεύματος του μετατροπέα υποβιβασμού της τάσης στο όριο της λειτουργίας με συνεχή αγωγή του ρεύματος [1]

Η μέση τιμή του ρεύματος στην επαγωγή, στο όριο λειτουργίας, είναι [1]:

$$I_L^{lim} = I_o^{lim} = \frac{1}{2} * I_{L(max)} = \frac{V_o * (1-D) * T_s}{2 * L} \quad (2.7)$$

Όταν η τάση εισόδου V_{dc} είναι σταθερή και η τάση εξόδου V_o μεταβάλλεται, το ρεύμα του φορτίου που εξασφαλίζει τη λειτουργία του μετατροπέα με συνεχή αγωγή του ρεύματος αποκτά τη μέγιστη τιμή όταν $D = 0.5$ [1]:

$$I_{o,max}^{lim} |_{V_{dc}=c} = \frac{V_{dc} * T_s}{8 * L} \quad (2.8)$$

Αντίστοιχα, όταν η τάση εξόδου διατηρείται σταθερή και η τάση εισόδου μεταβάλλεται, το μέγιστο

ρεύμα φορτίου για συνεχή αγωγή του ρεύματος αντιστοιχεί σε $D \rightarrow 0$, οπότε από την Εξίσωση (2.8) προκύπτει [1]:

$$I_{o,max} |_{V_o=c} = \frac{V_o * T_s}{2 * L} \quad (2.9)$$

2.3.2 Ασυνεχής Αγωγή του Ρεύματος

Για δεδομένη τάση εισόδου και εξόδου στο μετατροπέα, εάν το ρεύμα φορτίου I_o μειωθεί πέρα από ένα συγκεκριμένο όριο, το ρεύμα στην επαγωγή γίνεται ασυνεχές, όπως μπορούμε να δούμε στο Σχήμα 2.7. Κατά το χρονικό διάστημα ($\delta_2 * T_s$), η τάση και το ρεύμα στην επαγωγή είναι μηδενικά, ενώ ο πυκνωτής του φίλτρου παρέχει ρεύμα στο φορτίο. Η μέση τιμή της τάσης στην επαγωγή είναι μηδέν, επομένως [1]:

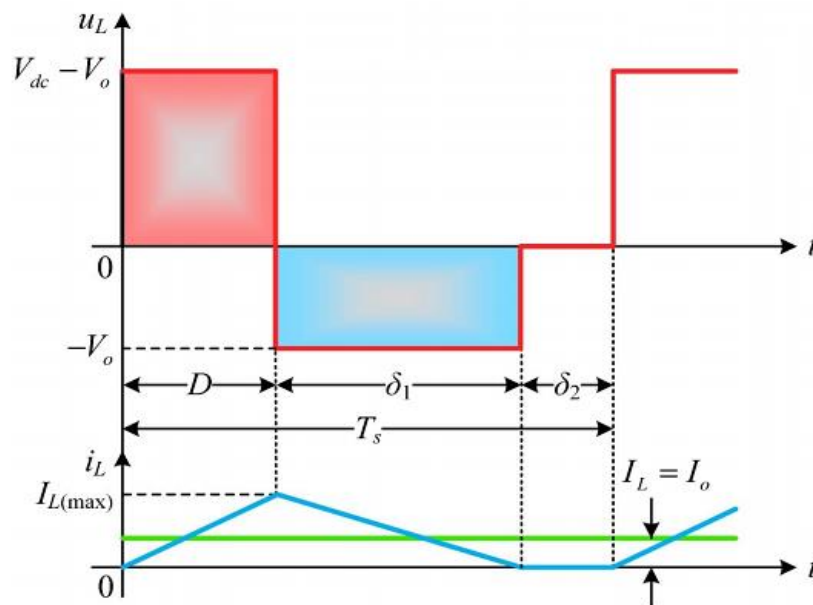
$$(V_{dc} - V_o) * D * T_s - (V_o * \delta_1 * T_s) = 0 \quad (2.10)$$

Από την Εξίσωση (2.10), υπολογίζεται ο λόγος της τάσης εξόδου προς την τάση εισόδου, ο οποίος πλέον εξαρτάται από το ρεύμα του φορτίου [1]:

$$\frac{V_o}{V_{dc}} = \frac{D}{D + \delta_1} \quad (2.11)$$

Η μέση τιμή του ρεύματος στην επαγωγή, η οποία είναι ίση με το ρεύμα του φορτίου I_o , είναι [1]:

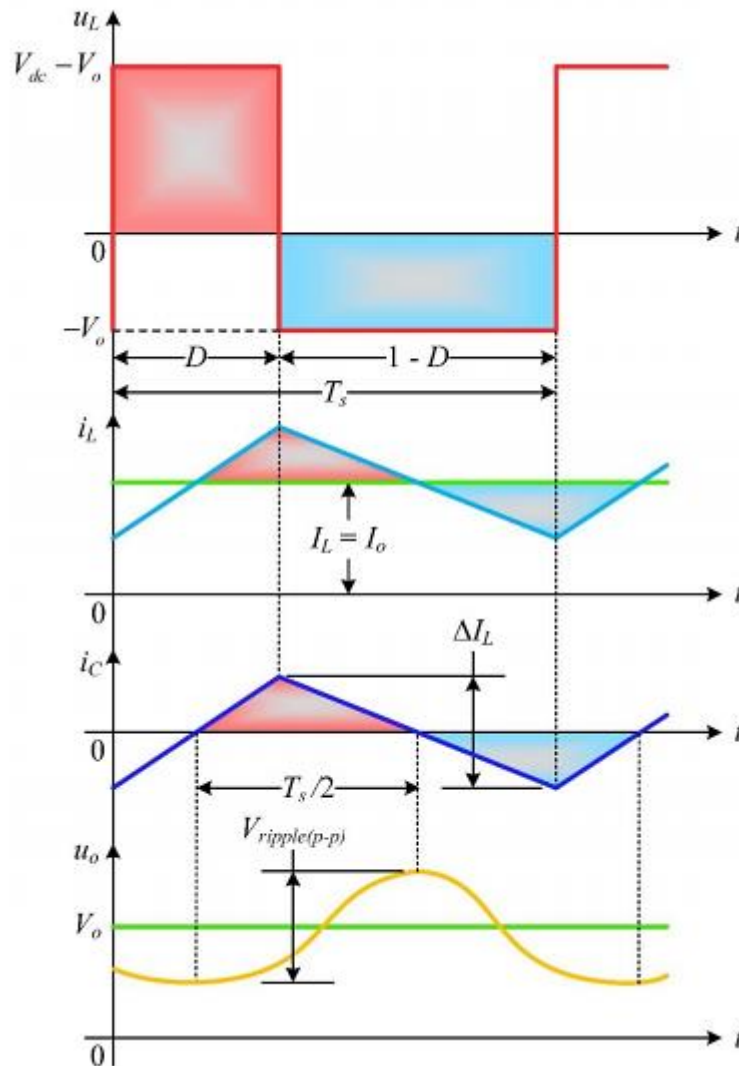
$$I_L = I_{L(max)} = \frac{(D + \delta_1) * T_s}{2 * T_s} = \frac{V_o * \delta_1 * T_s}{L} * \frac{D + \delta_1}{2} = \frac{\delta_1 * T_s}{2 * L} * V_o * (D + \delta_1) = \frac{\delta_1 * T_s}{2 * L} * D * V_{dc} \quad (2.12)$$



Σχήμα 2.7: Κυματομορφές τάσης και ρεύματος μετατροπέα υποβιβασμού της τάσης με ασυνεχή αγωγή του ρεύματος [1]

2.3.3 Κυμάτωση της Τάσης Εξόδου

Σε έναν πρακτικό μετατροπέα, η τάση εξόδου u_o δεν είναι απολύτως σταθερή, αλλά μεταβάλλεται γύρω από την μέση τιμή V_o . Η μεταβολή της τάσης εξόδου ονομάζεται κυμάτωση. Στο Σχήμα 2.8, φαίνεται η κυμάτωση της τάσης εξόδου καθώς ο μετατροπέας λειτουργεί με συνεχή αγωγή ρεύματος. Στον υπολογισμό της κυμάτωσης, θεωρούμε ότι όλες οι αρμονικές συνιστώσες του ρεύματος i_L ρέουν μέσω του πυκνωτή, ενώ η μέση τιμή του ρεύματος i_L διέρχεται από το ωμικό φορτίο. Η κυμάτωση της τάσης εξόδου οφείλεται στο μεταβαλλόμενο ρεύμα, με μηδενική μέση τιμή, το οποίο ρέει μέσω του πυκνωτή [1].



Σχήμα 2.8: Κυμάτωση της τάσης εξόδου σε συνεχή αγωγή ρεύματος στον μετατροπέα [1]

Η κυμάτωση $V_{ripple(p-p)}$ ορίζεται από τη σχέση [1]:

$$V_{ripple(p-p)} = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{1}{C} * \frac{1}{2} * \frac{T_s}{2} * \frac{\Delta I_L}{2} \quad (2.13)$$

Η διακύμανση του ρεύματος στην επαγωγή ΔI_L δίνεται από τη σχέση [1]:

$$\Delta I_L = \frac{V_o * (1-D) * T_s}{L} \quad (2.14)$$

Η συχνότητα αποκοπής f_c του LC φίλτρου δίνεται ως εξής [1]:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.15)$$

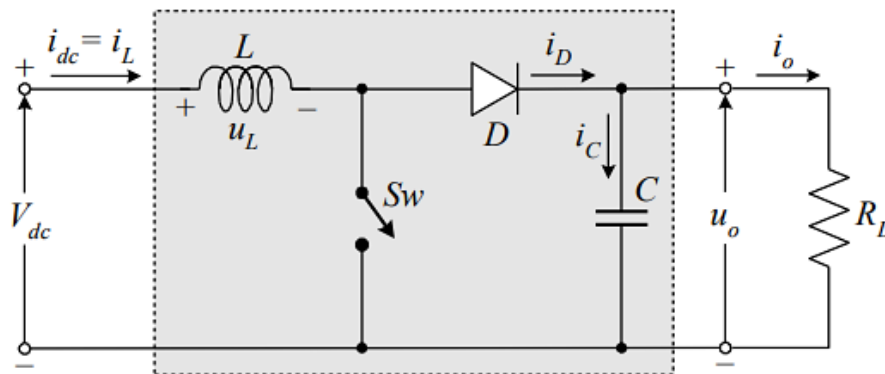
Αντικαθιστώντας τις Εξισώσεις (2.14) και (2.15) στην Εξίσωση (2.13), προκύπτει η σχέση [1]:

$$V_{ripple(p-p)} = \frac{\pi^2}{2} * V_o * (1 - D) * \left(\frac{f_c}{f_s}\right)^2 \quad (2.16)$$

Από την Εξίσωση (2.16), η κυμάτωση της τάσης εξόδου είναι τόσο μικρότερη, όσο μικρότερη είναι η συχνότητα αποκοπής του φίλτρου, σε σχέση με τη διακοπτική συχνότητα f_s . Η συχνότητα αποκοπής του φίλτρου επιθυμείται να είναι υψηλή. Επακολούθως, η αυτεπαγωγή του πηνίου και η χωρητικότητα του πυκνωτή είναι μικρές. Επομένως, οι διαστάσεις του φίλτρου είναι περιορισμένες, γεγονός που επιβάλλει τη λειτουργία του διακόπτη σε υψηλή συχνότητα [1].

2.4 Μετατροπέας Ανύψωσης της Τάσης

Ο μετατροπέας ανύψωσης της τάσης παρέχει στην έξοδο μία τάση V_o μεγαλύτερη της τάσης εισόδου V_{dc} . Η δομή κυκλώματος του μετατροπέα αυτού εμφανίζεται στο Σχήμα 2.9. Όταν ο διακόπτης Sw άγει, η πηγή εισόδου παρέχει ενέργεια στην επαγωγή, αποθηκευόμενη με τη μορφή μαγνητικού πεδίου. Η διάδος είναι αναστροφα πολωμένη και δεν άγει. Έτσι, επιτυγχάνεται απομόνωση της εξόδου από την είσοδο. Όταν ο διακόπτης βρεθεί σε αποκοπή, το ρεύμα της επαγωγής μειώνεται, ενώ η τάση u_L αλλάζει πολικότητα. Μόλις η τάση της επαγωγής γίνει ίση με $(V_{dc} - V_o)$, η διάδος πολώνεται ορθά και η ενέργεια μεταφέρεται από την πηγή και την επαγωγή στο φορτίο [1].

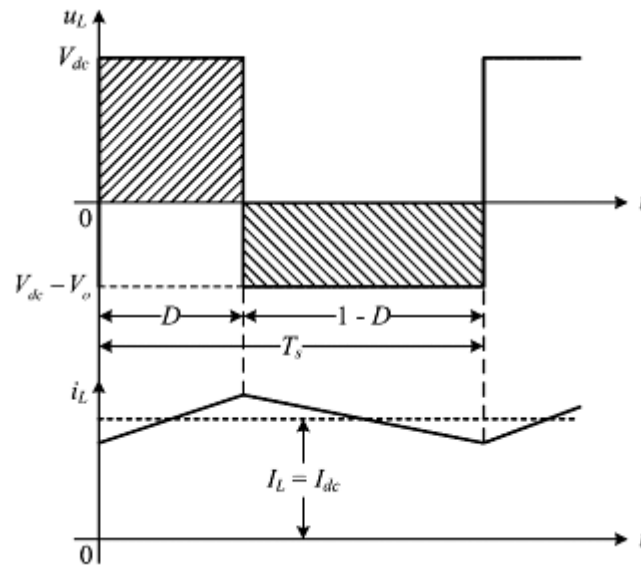


Σχήμα 2.9: Δομή του κυκλώματος μετατροπέα ανύψωσης της τάσης [1]

Ο μετατροπέας ανύψωσης της τάσης λειτουργεί με συνεχή αγωγή του ρεύματος, όταν υπάρχει συνεχής ροή ρεύματος στην επαγωγή. Όταν αυτή διακόπτεται σε τμήμα της περιόδου όπου ο διακόπτης βρίσκεται σε αποκοπή, ο μετατροπέας λειτουργεί με ασυνεχή αγωγή του ρεύματος [1].

2.4.1 Συνεχής Αγωγή του Ρεύματος

Σε λειτουργία του μετατροπέα με συνεχή αγωγή του ρεύματος, οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος στην επαγωγή εμφανίζονται στο Σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.10: Κυματομορφές τάσης και ρεύματος μετατροπέα ανύψωσης τάσης σε συνεχή αγωγή ρεύματος [1]

Ο λόγος της τάσης εξόδου προς της τάση εισόδου υπολογίζεται από τη μηδενική μέση τιμή της τάσης στα άκρα της επαγωγής και τη σχέση [1]:

$$(V_{dc} * D * T_s) + [(V_{dc} - V_o) * (1 - D) * T_s] \quad (2.19)$$

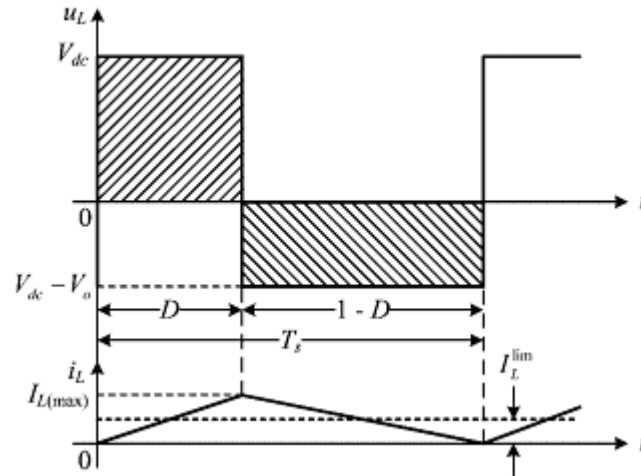
από την οποία προκύπτει ότι [1]:

$$\frac{V_o}{V_{dc}} = \frac{1}{1-D} \quad (2.20)$$

Θεωρώντας μηδενικές απώλειες στο μετατροπέα, η ισχύς εισόδου ισούται με την ισχύ εξόδου $V_{dc} * I_{dc} = V_o * I_o$, επομένως ισχύει [1]:

$$\frac{V_o}{V_{dc}} = \frac{I_{dc}}{I_o} = \frac{1}{1-D} \quad (2.21)$$

Για δεδομένες τιμές των τάσεων εισόδου και εξόδου, ο μετατροπέας λειτουργεί με συνεχή αγωγή ρεύματος, εφόσον το ρεύμα στο φορτίο I_o είναι μεγαλύτερο από κάποια οριακή τιμή $I_{o,lim}$. Οι κυματομορφές στο όριο της λειτουργίας με συνεχή αγωγή του ρεύματος εμφανίζονται στο Σχήμα 2.11 [1].



Σχήμα 2.11: Κυματομορφές τάσης και ρεύματος μετατροπέα ανύψωσης τάσης στο όριο της λειτουργίας με συνεχή αγωγή του ρεύματος [1]

Η μέση τιμή του ρεύματος στην επαγωγή, στο όριο της λειτουργίας, είναι [1]:

$$I_L^{lim} = \frac{1}{2} * I_{L(max)} = \frac{1}{2} * \frac{V_{dc}}{L} D * T_s = \frac{V_o * T_s}{2 * L} * (1 - D) * D \quad (2.22)$$

Το ρεύμα i_L λαμβάνει τη μέγιστη τιμή όταν $D = 0.5$, η οποία είναι [1]:

$$I_{L,max}^{lim} = \frac{V_o * T_s}{8 * L} \quad (2.23)$$

Στον μετατροπέα ανύψωσης της τάσης, η μέση τιμή του ρεύματος στην επαγωγή δεν είναι ίση με το ρεύμα στο φορτίο, αλλά με το ρεύμα εισόδου $i_L = i_{dc}$. Έτσι, το ρεύμα του φορτίου στο όριο της συνεχούς αγωγής του ρεύματος, προκύπτει από τη σχέση [1]:

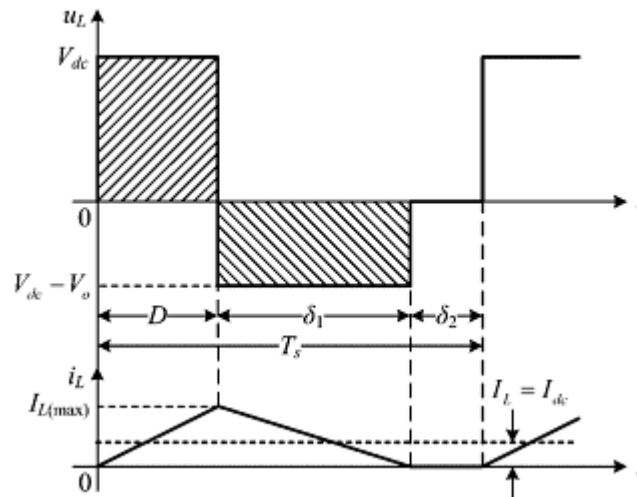
$$I_o^{lim} = I_L^{lim} * (1 - D) = \frac{V_o * T_s}{2 * L} * (1 - D)^2 * D \quad (2.24)$$

Το ρεύμα I_o^{lim} είναι μέγιστο όταν $D = \frac{1}{3}$, οπότε [1]:

$$I_{o,max}^{lim} = \frac{2 * V_o * T_s}{27 * L} \quad (2.25)$$

2.4.2 Ασυνεχής Αγωγή του Ρεύματος

Όταν το ρεύμα στο φορτίο του μετατροπέα ανύψωσης της τάσης είναι μικρότερο από μία οριακή τιμή, εξαρτώμενη από τις συνθήκες λειτουργίας, το ρεύμα στην επαγωγή γίνεται ασυνεχές. Οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος στην επαγωγή L με ασυνεχή ροή του ρεύματος φαίνονται στο Σχήμα 2.12 [1].



Σχήμα 2.12: Κυματομορφές τάσης και ρεύματος μετατροπέα ανύψωσης τάσης σε ασυνεχή αγωγή του ρεύματος [1]

Ο λόγος της τάσης εξόδου προς την τάση εισόδου υπολογίζεται από τη μηδενική μέση τιμή της τάσης u_L , όπου [1]:

$$(V_{dc} * D * T_s) + (V_{dc} - V_o) * \delta_1 * T_s = 0 \quad (2.26)$$

και τελικά:

$$\frac{V_o}{V_{dc}} = \frac{I_{dc}}{I_o} = \frac{D + \delta_1}{\delta_1} \quad (2.27)$$

Η μέση τιμή του ρεύματος εισόδου, το οποίο είναι ίσο με το ρεύμα της επαγωγής, είναι [1]:

$$I_{dc} = I_L = \frac{D + \delta_1}{2} * I_{L(max)} = \frac{D + \delta_1}{\delta_1} * \frac{V_{dc}}{L} * D * T_s \quad (2.28)$$

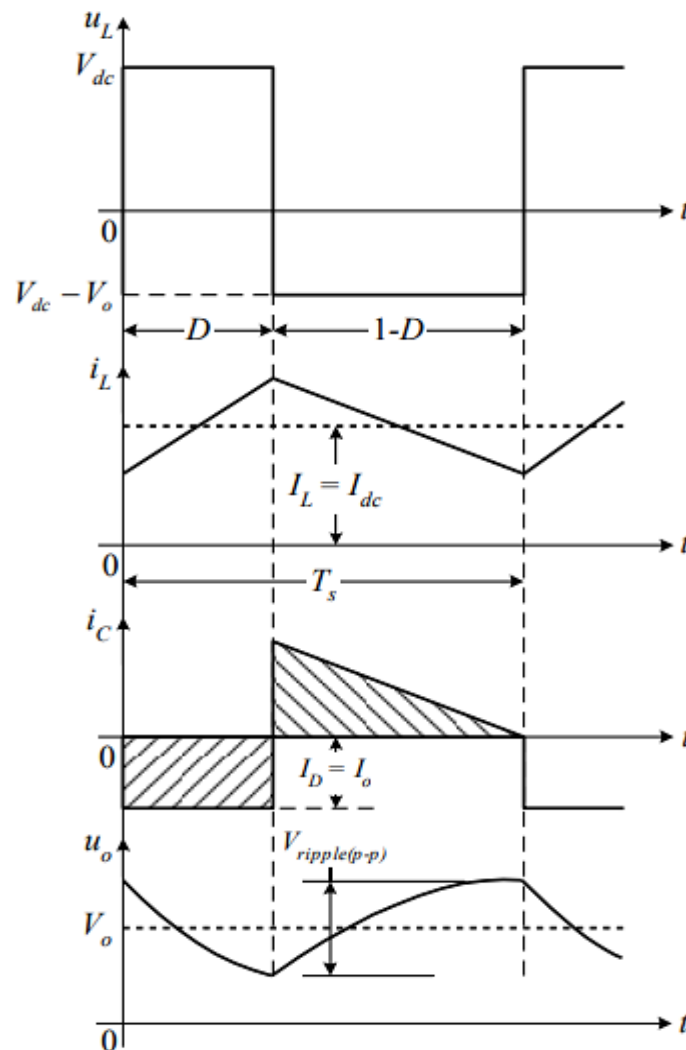
Η μέση τιμή του ρεύματος εξόδου, από την Εξίσωση (2.27), δίνεται από τη σχέση [1]:

$$I_o = I_{dc} = \frac{\delta_1}{D + \delta_1} = \frac{V_{dc} * \delta_1}{2 * L} * D * T_s \quad (2.29)$$

2.4.3 Κυμάτωση της Τάσης Εξόδου

Για τον υπολογισμό της κυμάτωσης στην τάση εξόδου με συνεχή αγωγή του ρεύματος, θεωρείται ότι η μέση τιμή του ρεύματος στη δίοδο ρέει στο φορτίο, ενώ ο πυκνωτής φέρει όλες τις αρμονικές συνιστώσες του ρεύματος i_D . Η μέση τιμή του ρεύματος στον πυκνωτή είναι μηδέν, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13. Η κυμάτωση της τάσης εξόδου ορίζεται από τη σχέση [1]:

$$V_{ripple(p-p)} = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{I_o * D * T_s}{C} = \frac{V_o}{R_L * C} * D * T_s \quad (2.30)$$

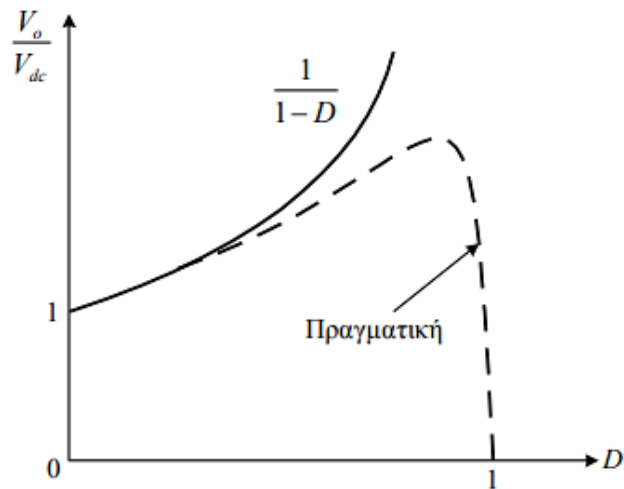


Σχήμα 2.13: Κυμάτωση της τάσης εξόδου όταν ο μετατροπέας ανύψωσης της τάσης λειτουργεί σε συνεχή αγωγή ρεύματος [1]

2.4.4 Πρακτικός Μετατροπέας Ανύψωσης της Τάσης

Από την Εξίσωση (2.20), η τάση εξόδου του μετατροπέα λαμβάνει πολύ υψηλές τιμές όταν $D \rightarrow 1$. Όμως, σε έναν πρακτικό μετατροπέα, τα παρασιτικά στοιχεία που σχετίζονται με τους ημιαγωγούς διακόπτες, το πηνίο και τον πυκνωτή, προκαλούν αντί για την αύξηση της τάσης εξόδου τη μείωση

της V_o , καθώς ο κύκλος λειτουργίας D προσεγγίζει τη μονάδα. Αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 2.14 [1].



Σχήμα 2.14: Επίδραση παρασιτικών στοιχείων στην τάση εξόδου του μετατροπέα ανύψωσης τάσης [1]

2.5 Τεχνική Διαμόρφωσης του Εύρους Παλμών – PWM

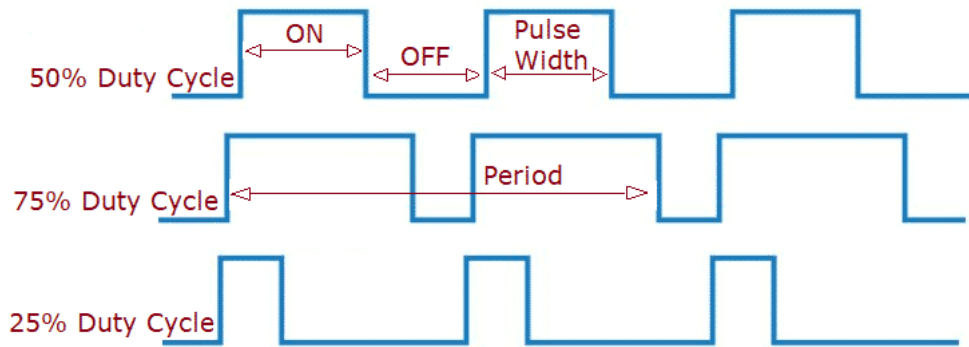
Όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή του παρόντος κεφαλαίου, η τεχνική Διαμόρφωσης του Εύρους Παλμών, ή αλλιώς PWM, συνίσταται στο να διατηρούμε σταθερή τη διακοπτική συχνότητα του μετατροπέα και να μεταβάλλουμε τον χρόνο αγωγής του ημιαγωγού στοιχείου, έτσι ώστε να επιτυγχάνουμε την επιθυμητή μέση τιμή της τάσης εξόδου.

Στα ηλεκτρονικά ισχύος, η τεχνική PWM αποτελεί τον πυρήνα ελέγχου και έχει αποδειχθεί αποτελεσματικότερη στην οδήγηση σύγχρονων διατάξεων ημιαγωγών. Η πλειονότητα των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων ισχύος ελέγχεται από σήματα PWM διαφόρων μορφών. Χάρη στην αποτελεσματικότητά της, χρησιμοποιείται ως τεχνική ελέγχου για τη δημιουργία αναλογικών σημάτων από μία ψηφιακή συσκευή, όπως παραδείγματος χάρη από έναν μικροελεγκτή. Με αυτήν, η ενέργεια κατανέμεται μέσω μίας σειράς παλμών, αυξάνοντας ή μειώνοντας το πλάτος των οποίων μπορεί να ελεγχθεί η ροή ενέργειας στην εκάστοτε διάταξη [3].

Στο Σχήμα 2.16 που ακολουθεί, απεικονίζονται ορισμένες PWM παλμοσειρές με διαφορετικούς κύκλους εργασίας. Το χρονικό διάστημα για το οποίο ο παλμός είναι θετικός, ή όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.15 “ON”, ονομάζεται κύκλος λειτουργίας (Duty Cycle – DC). Ο κύκλος λειτουργίας ορίζεται, όπως και προαναφέραμε στην ανάλυση των μετατροπέων συνεχούς ρεύματος, ως εξής:

$$DC\% = \frac{t_{on}}{T} * 100\% \quad (2.31)$$

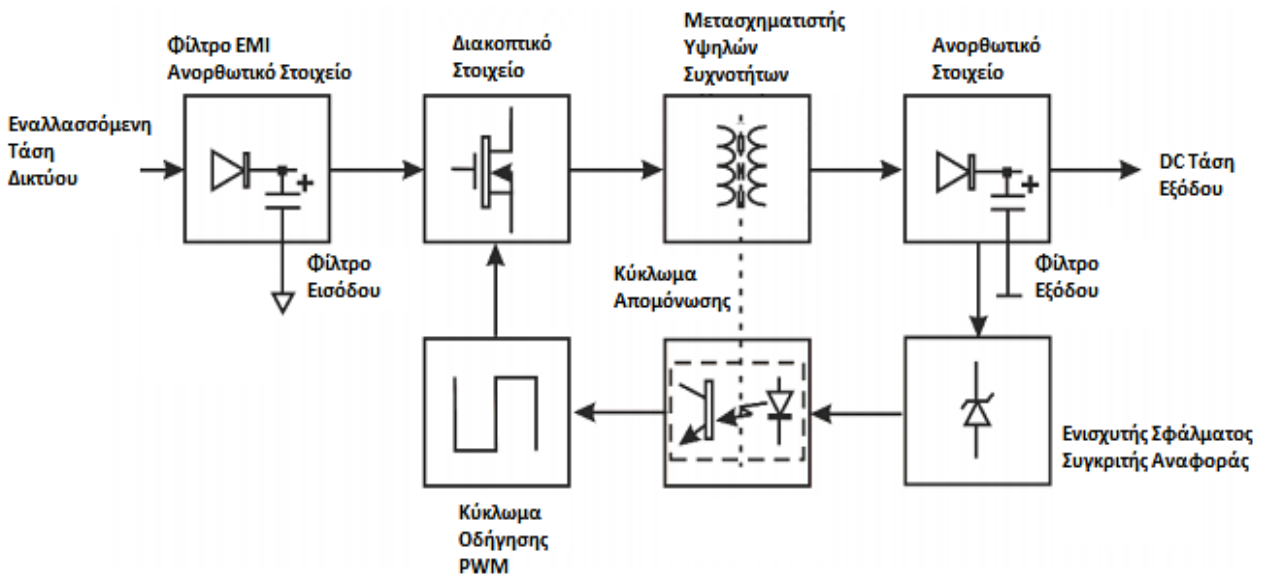
όπου t_{on} το χρονικό διάστημα θετικότητας του παλμού και T η περίοδος της PWM παλμοσειράς [3].



Σχήμα 2.15: PWM παλμοσειρές διαφόρων τιμών κύκλου εργασίας [3]

Η «μέση» τάση μπορεί να ελεγχθεί μεταβάλλοντας το πλάτος του θετικού παλμού. Με μεταβολή ή διαμόρφωση του χρόνου όπου η έξοδος είναι “ON”, μπορούμε να τροποποιήσουμε τη μέση τάση, η οποία εξαρτάται από τον κύκλο εργασίας. Όσο μικρότερος είναι ο χρόνος “ON”, τόσο μικρότερη είναι η μέση τιμή. Και αντίστοιχα, μεγαλύτερος, τόσο υψηλότερη είναι η μέση τιμή τάσης [3].

Για να συσχετίσουμε την έως τώρα δοθείσα γνώση με το θέμα της εργασίας, στο Σχήμα 2.16 δίνεται το απλοποιημένο λειτουργικό διάγραμμα ενός διακοπτικού τροφοδοτικού που ελέγχεται με την Τεχνική Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (PWM) και με ηλεκτρική απομόνωση.



Σχήμα 2.16: Απλοποιημένο λειτουργικό διάγραμμα ενός διακοπτικού τροφοδοτικού ελεγχόμενο με την τεχνική PWM και με ηλεκτρική απομόνωση

Η εναλλασσόμενη τάση εισόδου ανορθώνεται σε μία μη σταθεροποιημένη συνεχή τάση με τη βοήθεια μίας ανορθωτικής διάταξης. Στην είσοδο, επίσης, τοποθετείται και ένα φίλτρο για τον περιορισμό της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής που εισάγει η λειτουργία της συσκευής στο δίκτυο

(φίλτρο EMI). Η βαθμίδα του μετατροπέα μεταβάλλει την συνεχή τάση από ένα επίπεδο σε ένα άλλο. Αυτό επιτυγχάνεται με τη διακοπτική λειτουργία του ελεγχόμενου ημιαγωγού στοιχείου, ο ρόλος του οποίου είναι να τροφοδοτεί το πρωτεύον του μετασχηματιστή με παλμική τάση υψηλής συχνότητας. Η τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή ανορθώνεται και φιλτράρεται, ώστε να προκύψει η τάση εξόδου της συσκευής. Αυτή η τάση συγκρίνεται με την επιθυμητή τιμή της τάσης εξόδου και παράγεται ένα σφάλμα, το οποίο, αφού διαμορφωθεί και ενισχυθεί κατάλληλα, καθορίζει την παλμοδότηση των ημιαγωγικών στοιχείων του μετατροπέα.

2.6 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα της Τεχνικής PWM

Η εξέλιξη της τεχνολογίας των ημιαγωγών και ουσιαστικά η εμφάνιση των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος τύπου φαινόμενου πεδίου με δομή μέταλλο – οξείδιο – ημιαγωγός, των λεγόμενων MOSFET, είναι οι κύριοι παράγοντες που συνέβαλαν στην ευρεία χρήση των διακοπτικών μετατροπέων συνεχούς ρεύματος που ελέγχονται με την τεχνική Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται σήμερα ευρέως σε εφαρμογές χαμηλής και μέσης ισχύος, με τιμές από μερικές δεκάδες Watt μέχρι 5kWatt, και για διακοπτικές συχνότητες λειτουργίας 30 – 300kHz, λόγω του απλού κυκλώματος και της ευκολίας ελέγχου. Η επιλογή της συχνότητας λειτουργίας εξαρτάται από το ημιαγωγό στοιχείο και την ισχύ του μετατροπέα. Στις προαναφερθείσες περιοχές συχνοτήτων, οι μετατροπείς συνεχούς ρεύματος θεωρούνται οι πλέον κατάλληλοι ως προς το βάρος, το σχήμα, την απόδοση, την αξιοπιστία, αλλά και το κόστος [3].

Τα πλεονεκτήματα των διακοπτικών τροφοδοτικών που ελέγχονται με την τεχνική PWM, σε σχέση με τα γραμμικά τροφοδοτικά, ανάγονται στο ότι τα ημιαγωγά στοιχεία, όπως τα MOSFET ισχύος και οι δίοδοι, λειτουργούν ως διακόπτες, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται μία σημαντική μείωση των απωλειών ισχύος. Ο βαθμός απόδοσης αυτών των μετατροπέων κυμαίνεται στο 70 – 95%. Επιπλέον, εφόσον απαιτείται ηλεκτρική απομόνωση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας μετασχηματιστής για υψηλές συχνότητες λειτουργίας, το μέγεθος και το βάρος του οποίου είναι σημαντικά μικρότερα συγκριτικά με τους μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται στα γραμμικά τροφοδοτικά, τα οποία λειτουργούν στη συχνότητα των 50Hz. Ακόμη, ένα ημιαγωγό στοιχείο που λειτουργεί ως διακόπτης, μπορεί να αντέχει μεγαλύτερες ισχύεις απ' ότι ένα ημιαγωγό στοιχείο που λειτουργεί στη γραμμική περιοχή [3].

Το κυριότερο πρόβλημα αυτών των μετατροπέων είναι οι διακοπτικές απώλειες, που εμφανίζονται τόσο κατά την έναυση όσο και κατά τη σβέση των ημιαγωγών στοιχείων, και οι οποίες αυξάνουν γραμμικά με αύξηση της διακοπτικής συχνότητας λειτουργίας. Ένα επιπλέον πρόβλημα που παρουσιάζεται κατά τη λειτουργία των μετατροπέων αυτών, είναι η υπέρταση που εμφανίζεται στα άκρα του ημιαγωγικού διακόπτη κατά τη σβέση του, η οποία μπορεί να οδηγήσει στην καταστροφή του, καθώς και η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (EMI), που παράγεται λόγω των μεγάλων μεταβολών της τάσης και του ρεύματος κατά την αλλαγή κατάστασης του ημιαγωγού διακόπτη, και δημιουργεί προβλήματα στη λειτουργία άλλων συσκευών [3].

Κεφάλαιο 3^ο: Μικροελεγκτές – PID Ελεγκτές

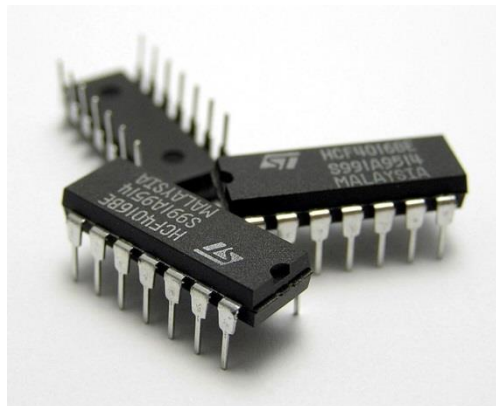
Μικροελεγκτές και PID ελεγκτές αποτελούν βασικά στοιχεία της πτυχιακής αυτής εργασίας, όπως θα φανεί στο επόμενο και τελευταίο κεφάλαιο. Για την κατανόηση, λοιπόν, της λειτουργίας και χρήσης τους, θα αναλυθούν συνοπτικά σε αυτό το κεφάλαιο.

3.1 Μικροελεγκτές

Παρότι οι μικροϋπολογιστές/μικροεπεξεργαστές/μικροελεγκτές υπάρχουν μόλις εδώ και μερικές δεκαετίες, η σπουδαιότητά τους είναι αφάνταστα μεγάλη. Σήμερα χρησιμοποιούνται σε ένα τεράστιο εύρος εφαρμογών. Από τα κινητά τηλέφωνα, τα αυτοκίνητα και τις τηλεοράσεις, μέχρι τη βαριά βιομηχανία και την αεροναυπηγική. Οι μικροελεγκτές συνήθως χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου θέλουμε να ελέγξουμε κάποια συγκεκριμένη λειτουργία και όχι τόσο για επεξεργαστικά περίπλοκες εφαρμογές. Το ζητούμενο, λοιπόν, συνήθως από τους μικροελεγκτές είναι η επικοινωνία τους με τον «έξω κόσμο» και η πραγματοποίηση λειτουργιών, όπως το άνοιγμα ή κλείσιμο κάποιων συσκευών, η παρακολούθηση ορισμένων λειτουργιών και άλλα [4].

3.1.1 Ορισμός και Πεδία Εφαρμογών

Μικροελεγκτής είναι ένα ολοκληρωμένο, που περιέχει ενσωματωμένα, εκτός από έναν μικροεπεξεργαστή, και διάφορα περιφερειακά, όπως μνήμες RAM, ROM, πόρτες I/O, χρονοστάτες, απαριθμητές και ενδεχομένως διάφορα άλλα [5].



Σχήμα 3.1: Τσιπ μικροελεγκτών [8]

Οι μικροελεγκτές χρησιμοποιούνται σε όλες τις εφαρμογές αυτοματισμού, όπως ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές, συστήματα ελέγχου, υπολογιστές, κλιματιστικά, εκτυπωτές, αυτοκίνητα, αεροπλάνα, μηχανές CNC, συστήματα δικτύωσης σύγχρονης κατοικίας, προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές PLC, συστήματα ελέγχου προσπέλασης και πάρα πολλές άλλες εφαρμογές ελέγχου και αυτοματισμού, που είναι αδύνατον να απαριθμηθούν λόγω του τεράστιου πλήθους τους [5].

3.1.2 Ιστορική Αναδρομή

Πριν από αρκετά χρόνια παρήγαγαν στην εταιρία General Instruments ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα, που ονομάστηκε PIC1650 και προοριζόταν να χρησιμοποιηθεί σαν περιφερειακό για έναν δικό τους μικροελεγκτή, τον CP1600. Το ολοκληρωμένο αυτό αναφέρθηκε ως ένας Προγραμματιζόμενος Έξυπνος Υπολογιστής (**P**rogrammable **I**ntelligent **C**omputer) και θεωρείται ως μητρικό όλων των ολοκληρωμένων PIC. Η λειτουργία και οι δυνατότητές του μοιάζουν πολύ με αυτές του σημερινού μικροελεγκτή PIC 16C54. Πιθανόν για αυτόν τον λόγο πολλοί πιστεύουν πως το ακρώνυμο PIC σημαίνει Peripheral Interface Controller. Αν και τα ολοκληρωμένα κυκλώματα της General Instruments ήταν πλήρως αυτόνομα και περιείχαν μερικά σημαντικά και προοδευτικά χαρακτηριστικά, ήταν χοντροκομμένα και ανορθόδοξα [6].

Η αρχιτεκτονική των πρώτων μικροελεγκτών ονομάστηκε RISC και είχε έναν μοναδικό καταχωρητή εργασίας με μόλις 30 εντολές. Οι ακροδέκτες εξόδου ήταν δυνατό να αποδώσουν περισσότερο ρεύμα σε σχέση με τους άλλους μικροελεγκτές της εποχής. Έτσι, τα χαρακτηριστικά στοιχεία του PIC άρχισαν να εμφανίζουν αμέσως απλότητα, αυτονομία, υψηλή ταχύτητα και χαμηλό κόστος [7].

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990, η ποικιλία των διαθέσιμων μικροελεγκτών PIC μεγάλωσε και σταδιακά οι δυνατότητές τους ξεπέρασαν αυτές των πιο καθιερωμένων ανταγωνιστών της General Instruments. Οι μικροελεγκτές PIC, σε αρκετές περιπτώσεις, μπορούσαν να λειτουργήσουν πιο γρήγορα, απαιτούσαν πιο απλό σύνολο από άλλα ολοκληρωμένα κυκλώματα και ήταν πιο γρήγορη η παραγωγή προτύπων σε σχέση με τον ανταγωνισμό. Σε αντίθεση με τους ανταγωνιστές, η Microchip έκανε τα αναπτυξιακά της εργαλεία απλά και τα παρείχε σε χαμηλό κόστος ή χωρίς χρέωση. Επιπλέον, η Microchip έμεινε σταθερά εδραιωμένη στον κόσμο των 8 δυαδικών ψηφίων [6].

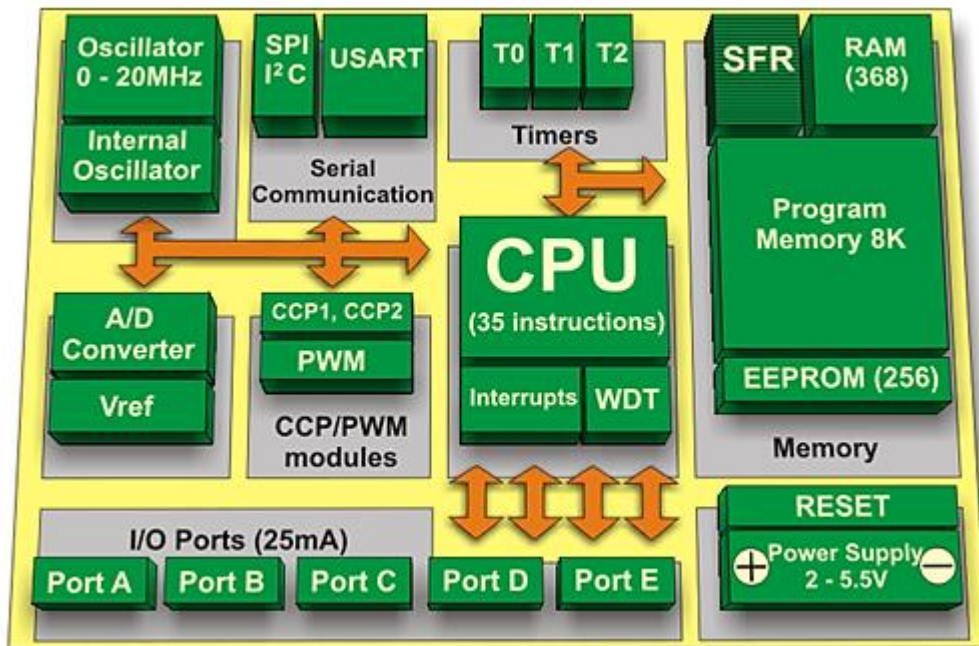
Μελετώντας την ποικιλία των μικροελεγκτών PIC σήμερα, ο καθένας μπορεί δικαιολογημένα να προσέλθει σε σύγχυση. Υπάρχουν πραγματικά εκατοντάδες διαφορετικές συσκευές που προσφέρονται σε διαφορετικές συσκευασίες και για διαφορετικές εφαρμογές. Γι' αυτό το λόγο, αξίζει μία προσπάθεια προσδιορισμού των χαρακτηριστικών που είναι κοινά σε όλους αυτούς τους μικροελεγκτές [6].

Όλοι οι ελεγκτές PIC έχουν ένα κοινό πυρήνα. Αυτό σημαίνει ότι μεταξύ όλων των μελών της σειράς, υπάρχει μεγάλος βαθμός συμβατότητας από άποψη λογισμικού και εσωτερικής κυκλωματικής διασύνδεσης. Έτσι, παρατηρώντας απλώς την λίστα των διάφορων μελών της σειράς, αντιλαμβάνεται κανείς ότι υπάρχουν πάρα πολλοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη, προκειμένου να επιλεγεί ένα συγκεκριμένος τύπος. Ο πυρήνας γύρω από τον οποίο δομείται ο επεξεργαστής των PIC, ανήκει σε μία αρχιτεκτονική γνωστή ως «Αρχιτεκτονική Harvard» [6].

Πριν από χρόνια, το υπουργείο Εθνικής Άμυνας των ΗΠΑ ζήτησε από τα πανεπιστήμια του Princeton και Harvard να κατασκευάσουν έναν τύπο υπολογιστή, με σκοπό τη σχεδίαση τροχιάς βλημάτων πυροβολικού. Το Harvard παρουσίασε μία αρχιτεκτονική, στα πλαίσια της οποίας το τμήμα μνήμης χωρίζεται σε δύο μέρη. Το ένα χρησιμοποιείται για την αποθήκευση του προγράμματος, γνωστό σε εμάς ως μνήμη ελέγχου, ενώ το άλλο χρησιμοποιείται για προσωρινή αποθήκευση μεταβλητών, γνωστό σε εμάς ως μνήμη τυχαίας προσπέλασης (μνήμη RAM). Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου ήταν ότι η ανάκληση των εντολών του προγράμματος από την μνήμη ελέγχου μπορούσε να πραγματοποιηθεί ταυτόχρονα με την διαδικασία πρόσβασης στη μνήμη RAM. Η

αρχιτεκτονική που παρουσίασε το Princeton χρησιμοποιούσε την ίδια μνήμη ως μνήμη ελέγχου και ως μνήμη RAM. Αυτή η αρχιτεκτονική ονομάστηκε “Von Neumann” [6].

Η ιδέα του διαχωρισμού του συστήματος μνήμης σε μνήμη ελέγχου και μνήμη δεδομένων που επικρατούσε στην αρχιτεκτονική του Harvard, έδινε ένα πολύ πιο γρήγορο σύστημα από αυτό του Von Neumann, αλλά και πολύ πιο ακριβό. Τα παραπάνω διαδραματιστήκαν στα μέσα περίπου της δεκαετίας του 1970. Σήμερα, η Microchip διαθέτει μία πλήρη σειρά μικροελεγκτών PIC τεχνολογίας CMOS, με μία πληθώρα χαρακτηριστικών που τούς καθιστά κατάλληλους για πάρα πολλές εφαρμογές [6].



Σχήμα 3.2: Παράδειγμα αρχιτεκτονικής ενός μικροελεγκτή [9]

3.1.3 Κριτήρια Επιλογής Μικροελεγκτή

Μπορεί κανείς να επιλέξει έναν από τους πολλούς μικροελεγκτές που κατασκευάζονται και ικανοποιεί τις ειδικές απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Από τους μικροελεγκτές PIC της Microchip, τους 68HCXX της Motorola, τους AVR της Atmel, τον περίφημο 8051 της INTEL σε όλες του τις ποικιλίες και παραλλαγές, προερχόμενες από διάφορους κατασκευαστές, όπως Dallas, Phillips, Atmel κ.ά. Υπάρχουν σταθεροί υποστηρικτές για κάθε έναν τύπο και κατασκευαστή μικροελεγκτών, με ισχυρά επιχειρήματα αναφορικά με τα πλεονεκτήματα του κάθε ενός από αυτούς. Αυτό που μπορεί να πει κανείς με σιγουριά είναι ότι σε περίπλοκες εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλές ταχύτητες, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται 16 – ψήφιοι ή ακόμη και 32 – ψήφιοι μικροελεγκτές [5].

Τα κριτήρια, λοιπόν, που πρέπει κανείς να λάβει υπ’ όψιν του όταν διαλέγει έναν μικροελεγκτή είναι:

- Η διαθεσιμότητα σε Ελλάδα και εξωτερικό.
- Η τιμή αγοράς.

- Η ευκολία στη χρήση.
- Η ποιότητα και τιμή των εργαλείων ανάπτυξης.
- Η ποικιλότητα υποστήριξη από τον κατασκευαστή.
- Τα υπάρχοντα forum στο διαδίκτυο με παραδείγματα εφαρμογών.
- Τα χαρακτηριστικά και τα ενσωματωμένα περιφερειακά του ολοκληρωμένου (ακίδες IO, UART, A/D, D/A, χρονοστάτες, μετρητές, ταχύτητα, μέγεθος κώδικα, μέγεθος δεδομένων κ.τ.λ.).
- Ευκολία στο να απευθύνεται/επικοινωνεί με μικρότερα και πιο οικονομικά ή μεγαλύτερα ολοκληρωμένα με περισσότερες δυνατότητες [5].

3.2 PID Ελεγκτές

Ένας αναλογικός – ολοκληρωτικός – διαφορικός ελεγκτής (Proportional – Integral – Derivative Controller, PID Controller) είναι ένας μηχανισμός ανάδρασης βρόχου ελέγχου, χρησιμοποιούμενος σε βιομηχανικά συστήματα ελέγχου, αλλά και σε άλλες ποικίλες εφαρμογές όπου απαιτείται συνεχής έλεγχος [7].

Η διαδικασία λειτουργίας είναι κοινή για όλους τους ελεγκτές αυτού του είδους. Ένας PID ελεγκτής υπολογίζει συνεχώς μία τιμή σφάλματος $e(t)$ ως τη διαφορά μεταξύ μίας επιθυμητής τιμής ρύθμισης (Set Point, SP) και μίας μεταβλητής της, υπό έλεγχο, διαδικασίας (Process Value, PV) και εφαρμόζει μία διόρθωση, βασισμένη στον αναλογικό, ολοκληρωτικό και διαφορικό όρο του, P, I και D αντίστοιχα [7].

Στην πράξη, ένας PID ελεγκτής εφαρμόζει αυτόματα ακριβή διόρθωση σε μία λειτουργία ελέγχου. Ένα καθημερινό παράδειγμα είναι ο έλεγχος της ταχύτητας σε ένα οδικό όχημα, όπου εξωτερικές επιδράσεις, όπως η αντίσταση του αέρα, θα προκαλούσαν αλλαγές στην ταχύτητα του οχήματος. Ο αλγόριθμος PID επαναφέρει την ταχύτητα του οχήματος στην, από τον οδηγό, επιθυμητή τιμή της, ελέγχοντας την ισχύ εξόδου του κινητήρα του οχήματος [7].

Οι ηλεκτρονικοί αναλογικοί βρόχοι ελέγχου PID βρίσκονται μέσα σε σύνθετα ηλεκτρονικά συστήματα, όπως είναι η τοποθέτηση της κεφαλής μίας μονάδας σκληρού δίσκου, η ρύθμιση της ισχύος ενός τροφοδοτικού ή το κύκλωμα ανίχνευσης κίνησης ενός σύγχρονου σεισμομέτρου. Οι διακριτοί ηλεκτρονικοί αναλογικοί ελεγκτές έχουν αντικατασταθεί σε μεγάλο βαθμό από ψηφιακούς ελεγκτές που χρησιμοποιούν μικροελεγκτές ή FPGA για την εφαρμογή των αλγορίθμων PID. Όμως, οι διακριτοί αναλογικοί ελεγκτές PID εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται σε εξειδικευμένες εφαρμογές που απαιτούν απόδοση υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλού θορύβου, όπως ελεγκτές με λείζερ – δίοδο [7].

3.2.1 Χρησιμότητα PID Ελεγκτών

Οι PID ελεγκτές παρουσιάζει ορισμένα σημαντικά χαρακτηριστικά [7]:

- παρέχει ανατροφοδότηση ελέγχου,

- έχει την ικανότητα να εξαλείφει το σφάλμα μόνιμης κατάστασης μέσω του ολοκληρωτικού όρου του, και
- μπορεί να προβλέπει το μελλοντικό σφάλμα μέσω του διαφορικού όρου του.

Οι PID ελεγκτές παρέχουν ικανοποιητικό έλεγχο σε ποικίλα προβλήματα ελέγχου, ιδίως όταν οι δυναμικές που διέπουν την εκάστοτε διεργασία είναι ήπιες και οι απαιτήσεις ελέγχου μέτριες. Αυτού του είδους οι ελεγκτές έρχονται σε πολλές διαφορετικές μορφές, όπως για παράδειγμα αυτόνομα συστήματα μέσα σε κουτιά για έναν ή περισσότερους βρόχους, και παράγονται εκατοντάδες χιλιάδες κάθε χρόνο. Ο PID έλεγχος αποτελεί σημαντικό δομικό στοιχείο ενός καταναμημένου συστήματος ελέγχου. Οι ελεγκτές είναι, επίσης ενσωματωμένοι σε πολλά, ειδικού σκοπού, συστήματα ελέγχου [7].

Στον έλεγχο διεργασιών, η συντριπτική πλειοψηφία των βρόχων ελέγχου είναι PID τύπου. Η δημοτικότητα αυτού του τύπου ελέγχου οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην ευκολία εφαρμογής και την αποτελεσματικότητά του. Το κίνητρο για τη χρήση του PID ελέγχου προέρχεται από την αποδοτικότητα του κόστους υλοποίησής του. Ο PID ελεγκτής σπάνια αποτελεί ένα βέλτιστο ελεγκτή, αλλά είναι αρκετά καλός στη μέγιστη των περιπτώσεων, και έτσι το πρόσθετο κόστος και η πολυπλοκότητα ενός βέλτιστου ελεγκτή δεν αξίζουν την οριακή αύξηση στην απόδοση. Επιπλέον, ο έλεγχος PID δεν απαιτεί βαθιά κατανόηση των υποκείμενων λειτουργιών μίας διαδικασίας. Το μόνο που έχει σημασία είναι ότι μερικές μετρούμενες μεταβλητές της διαδικασίας μπορούν να επηρεαστούν έντονα από ορισμένες ελεγχόμενες μεταβλητές. Επίσης, ένας PID ελεγκτής μπορεί εύκολα να μεταφερθεί από διεργασία σε διεργασία. Το μόνο που χρειάζεται είναι να προσαρμοστούν τα κέρδη των όρων του και τα όρια της εξόδου του, έτσι ώστε να ταιριάζουν στην νέα διεργασία [7].

Συνεπώς, ο PID ελεγκτής αποτελεί ένα σημαντικό στοιχείο στην εργαλειοθήκη κάθε μηχανικού ελέγχου. Οι PID ελεγκτές έχουν υποστεί πάρα πολλές αλλαγές στην τεχνολογία, πηγαινόντας από τη χρήση πνευματικών συστημάτων στη χρήση μικροεπεξεργαστών μέσω ηλεκτρονικών σωλήνων, τρανζίστορ, ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Οι μικροεπεξεργαστές είχαν μεγάλη επίδραση στους PID ελεγκτές, καθώς σήμερα όλοι οι PID ελεγκτές κατασκευάζονται με τη χρήση μικροεπεξεργαστών, γεγονός που έδωσε την δυνατότητα να συμπεριληφθούν επιπλέον χαρακτηριστικά στους PID ελεγκτές [7].

3.2.2 Αρχές Λειτουργίας

Ο PID ελεγκτής αποτελεί τον πιο κοινό αλγόριθμο ελέγχου. Οι περισσότεροι βρόχοι ανάδρασης ελέγχονται από αυτόν ή από διαφοροποιήσεις του. Ο έλεγχος αυτός, λοιπόν, έχει διάφορους τρόπους αντιμετώπισης. Μπορεί να θεωρείται ως συσκευή η οποία λειτουργεί με κάποιους εμπειρικούς κανόνες, ή μπορεί και να προσεγγιστεί αναλυτικά. Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν ο βασικός αλγόριθμος, καθώς και οι μηχανισμοί που διέπουν τη λειτουργία του PID ελεγκτή [7].

3.2.2.1 Διάδραση

Ο PID ελεγκτής, όπως οι περισσότεροι ελεγκτές, βασίζεται στην έννοια της ανατροφοδότησης, ή αλλιώς ανάδρασης. Συνεπώς αξίζει να γίνει μια σύντομη αναφορά στο τι είναι ανάδραση και πώς λειτουργεί. Ας υποθέσουμε ότι σε μία διαδικασία, εάν αυξηθεί η έξοδος του ελεγκτή (σήμα ελέγχου),

τότε θα αυξηθεί και η τιμή της μεταβλητής της διαδικασίας που μάς ενδιαφέρει (ελεγχόμενη μεταβλητή). Με αυτό το σκεπτικό, η ανάδραση μπορεί να περιγραφεί ως εξής: «Αύξησε το σήμα ελέγχου, όταν η ελεγχόμενη μεταβλητή είναι χαμηλότερη από την επιθυμητή τιμή, και μείωσε το σήμα ελέγχου όταν η ελεγχόμενη μεταβλητή είναι μεγαλύτερη από την επιθυμητή τιμή.». Αυτού του είδους η ανάδραση ονομάζεται αρνητική, καθώς το σήμα ελέγχου κινείται αντίθετα από την ελεγχόμενη μεταβλητή. Στο Σχήμα 3.3 εικονίζεται ένα κλασικό παράδειγμα αρνητικής ανάδρασης [7].

3.2.2.2 Αναλογικός Όρος

Ο αναλογικός όρος παράγει ένα σήμα εξόδου, το οποίο είναι ανάλογο στην τρέχουσα τιμή του σφάλματος. Αυτό επιτυγχάνεται πολλαπλασιάζοντας το σφάλμα $e(t) = y_{sp} - y$ με έναν συντελεστή K_p , που ονομάζεται αναλογικό κέρδος. Συνεπώς, ο αναλογικός όρος δίνεται από τη σχέση [7]:

$$P = K_p * e(t) \quad (3.1)$$



Σχήμα 3.3: Μπλοκ – διάγραμμα διεργασίας με αρνητική ανάδραση [7]

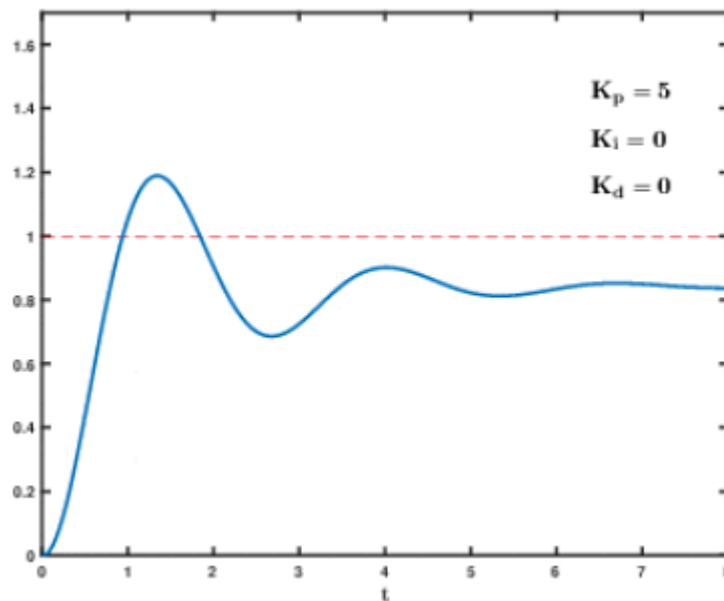
Ένα υψηλό αναλογικό κέρδος έχει ως αποτέλεσμα μία αισθητά μεγάλη αλλαγή στην έξοδο δεδομένης μίας αλλαγής στο σφάλμα. Εάν, ωστόσο, το αναλογικό κέρδος είναι αρκετά υψηλό, το σύστημα μπορεί να γίνει ασταθές. Αντιθέτως, ένα μικρό κέρδος έχει ως αποτέλεσμα μία μικρή απόκριση εξόδου σε ένα μεγάλο σφάλμα εισόδου και έναν λιγότερο ανταποκρίσιμο ή λιγότερο ευαίσθητο ελεγκτή. Εάν, πάλι, το αναλογικό κέρδος είναι πολύ χαμηλό, η ενέργεια ελέγχου μπορεί να είναι πολύ μικρή όταν οφείλεται σε διαταραχές του συστήματος [7].

Στις περισσότερες εφαρμογές ελέγχου, ο αναλογικός όρος είναι αυτός που συνεισφέρει το μεγαλύτερο μέρος στην έξοδο του ελεγκτή. Επειδή επιδρά στην τρέχουσα τιμή του σφάλματος, ένας αναλογικός ελεγκτής πάντα παρουσιάζει ένα σφάλμα μόνιμης κατάστασης. Εξαιρείται η περίπτωση όπου η επιθυμητή τιμή είναι η τιμή στην οποία ο αναλογικός όρος ισούται με το μηδέν. Στο Σχήμα 3.4 παρακάτω, απεικονίζεται η επίδραση μόνο του αναλογικού όρου σε μία διεργασία. Για την εξάλειψη του σφάλματος μόνιμης κατάστασης χρησιμοποιούμε τον όρο που ακολουθεί [7].

3.2.2.3 Ολοκληρωτικός Όρος

Η συμβολή του ολοκληρωτικού όρου είναι ανάλογη του μεγέθους του σφάλματος και της διάρκειάς του. Το ολοκλήρωμα στον τύπο ενός PID ελεγκτή είναι το άθροισμα του στιγμιαίου σφάλματος με

την πάροδο του χρόνου, και δίνει τη συσσωρευμένη μετατόπιση που θα έπρεπε προηγουμένως να διορθωθεί. Στη συνέχεια, το συσσωρευμένο σφάλμα πολλαπλασιάζεται με το ολοκληρωτικό κέρδος K_i και προστίθεται στην έξοδο του ελεγκτή [7].



Σχήμα 3.4: Επίδραση αναλογικού όρου σε διεργασία [7]

Ο ολοκληρωτικός όρος δίνεται από τη σχέση [7]:

$$I = K_i * \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (3.2)$$

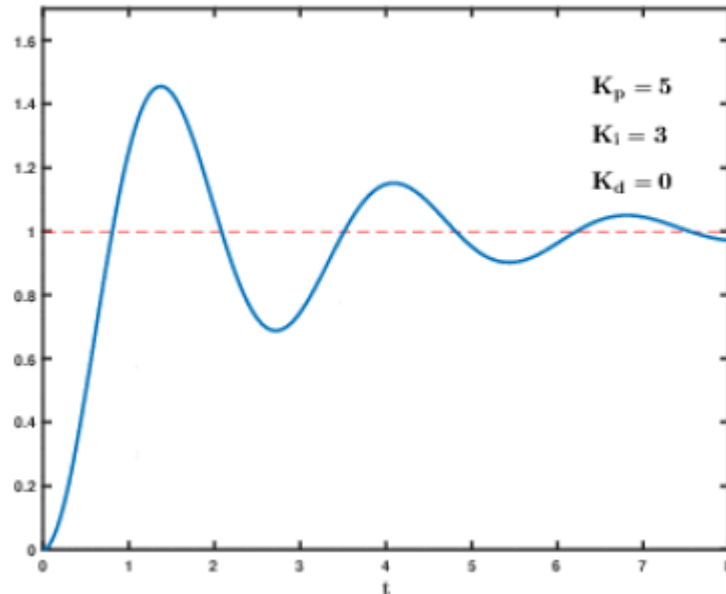
όπου τ είναι η μεταβλητή ολοκλήρωσης και παίρνει τιμές από το 0 έως την τρέχουσα χρονική στιγμή t .

Έτσι, εάν η εφαρμοζόμενη δράση δεν είναι αρκετή για να φέρει το σφάλμα στο μηδέν, αυτή η δράση θα αυξηθεί με το πέρασμα του χρόνου. Επίσης, ο ολοκληρωτικός όρος επιταχύνει την κίνηση της ελεγχόμενης μεταβλητής προς την επιθυμητή τιμή. Ένας καθαρά ολοκληρωτικός ελεγκτής “I” θα μπορούσε να φέρει το σφάλμα στο μηδέν. Ωστόσο, θα είχε αντίδραση [7]:

- πολύ αργή στην αρχή, καθώς η δράση θα ήταν μικρή και, έτσι, θα χρειαζόταν χρόνο για να γίνει σημαντική,
- βίαιη, καθώς η δράση αυξάνεται όσο το σφάλμα είναι θετικό, ακόμη και αν το σφάλμα έχει αρχίσει να πλησιάζει το μηδέν, και
- αργή ώστε να τελειώσει, αφού όταν το σφάλμα αλλάζει πρόσημο, αυτό για κάποιο χρονικό διάστημα μόνο θα μειώνει τη δύναμη της δράσης του ελεγκτή και δε θα το κάνει να αλλάζει και αυτή πρόσημο, προκαλώντας ταλαντώσεις.

Επιπλέον, θα μπορούσε να προκαλέσει το σύστημα να αποκριθεί ακόμα και αν ήδη υπάρχει μηδενικό σφάλμα, καθώς θυμάται ότι το σύστημα είχε σφάλμα, και έτσι, θα μπορούσε να προκαλέσει μία ενέργεια χωρίς αυτή να είναι απαραίτητη.

Το Σχήμα 3.5, μάς δείχνει πώς η προσθήκη ενός ολοκληρωτικού όρου εξαλείφει το σφάλμα μόνιμης κατάστασης, το οποίο δεν κατάφερε να εξαλείψει ο αναλογικός όρος, ενώ ταυτόχρονα εισάγει ταλαντώσεις στο σύστημα [7].



Σχήμα 3.5: Εφαρμογή ολοκληρωτικού όρου στην προηγούμενη απόκριση, διατηρώντας το αναλογικό κέρδος σταθερό [7]

3.2.2.4 Διαφορικός Όρος

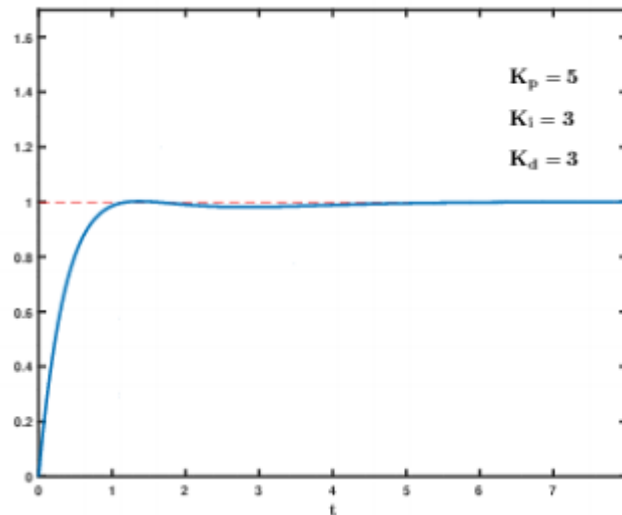
Η παράγωγος του σφάλματος της διαδικασίας υπολογίζεται καθορίζοντας την κλίση του σφάλματος με την πάροδο του χρόνου. Το μέγεθος της συμβολής του διαφορικού όρου στη συνολική δράση ελέγχου ονομάζεται διαφορικό κέρδος K_d .

Ο διαφορικός όρος δίνεται από τη σχέση [7]:

$$D = K_d * \frac{de}{dt} \quad (3.3)$$

Ένας διαφορικός όρος δεν λαμβάνει υπόψιν του το σφάλμα, γεγονός που σημαίνει ότι δεν μπορεί να το φτάσει στο μηδέν. Ένας καθαρά διαφορικός ελεγκτής “D” δε μπορεί να φέρει το σύστημα στην επιθυμητή τιμή του, αλλά το ρυθμό αλλαγής του σφάλματος, προσπαθώντας να φέρει αυτόν τον ρυθμό στο μηδέν. Στόχος του είναι η τροχιά του σφάλματος να γίνει μία οριζόντια γραμμή, αποσβένοντας την εφαρμοζόμενη δύναμη και μειώνοντας έτσι την υπερακόντιση. Η εφαρμογή υπερβολικής ώθησης όταν το σφάλμα είναι μικρό και συνεχίζει να μειώνεται, θα οδηγήσει σε υπερακόντιση. Μετά την υπερακόντιση, εάν ο ελεγκτής εφαρμόσει μία μεγάλη διόρθωση στην αντίθετη κατεύθυνση και επανειλημμένα υπερβεί την επιθυμητή θέση, η έξοδος θα ταλαντώνεται γύρω από την επιθυμητή τιμή. Εάν το πλάτος των ταλαντώσεων αυξάνεται με το χρόνο, το σύστημα είναι ασταθές. Εάν μειώνεται, το σύστημα είναι ευσταθές. Εάν οι ταλαντώσεις διατηρούν σταθερό πλάτος, το σύστημα είναι οριακά ευσταθές [7].

Ο διαφορικός όρος προβλέπει τη συμπεριφορά του συστήματος και, επομένως, βελτιώνει τον χρόνο που απαιτείται για να ηρεμήσει το σύστημα, καθώς και τη σταθερότητα του συστήματος. Ένας ιδανικός διαφορικός ελεγκτής δεν είναι αιτιατός, και έτσι οι εφαρμογές των PID ελεγκτών περιλαμβάνουν ένα πρόσθετο φίλτρο χαμηλής διέλευσης για τον διαφορικό όρο, ώστε να περιορίσουν το κέρδος και το θόρυβο υψηλής συχνότητας.



Σχήμα 3.6: Εφαρμογή διαφορικού όρου στην προηγούμενη απόκριση, διατηρώντας τα υπόλοιπα κέρδη σταθερά [7]

Ο διαφορικός όρος χρησιμοποιείται πολύ πιο σπάνια στην πράξη από τους άλλους δύο όρους, λόγω της μεταβλητής επίδρασής του στη σταθερότητα του συστήματος σε πραγματικές εφαρμογές. Το Σχήμα 3.6, δείχνει πώς βελτιώθηκε η συνολική απόκριση του συστήματος και εξαλείφθηκαν οι ταλαντώσεις που είχε εισάγει ο ολοκληρωτικός όρος, με την προσθήκη του διαφορικού όρου [7].

3.2.2.4 Εξίσωση του PID Ελεγκτή

Οι τρεις όροι που αναλύθηκαν προηγουμένως είναι και αυτοί που δίνουν στον ελεγκτή το όνομά του. Το άθροισμά τους αποτελεί το σήμα ελέγχου και ισούται με την έξοδο του ελεγκτή. Ορίζοντας ως $u(t)$ την έξοδο του ελεγκτή και αθροίζοντας τις Εξισώσεις (3.1), (3.2) και (3.3), η τελική μορφή του, γνωστή και ως παράλληλη, είναι [7]:

$$u(t) = (K_p * e) + (K_i * \int_0^t e(\tau) d\tau) + (K_d * \frac{de}{dt}) \quad (3.4)$$

Η μορφή του PID που χρησιμοποιείται περισσότερο στη βιομηχανία είναι η τυποποιημένη μορφή. Σε αυτήν, το κέρδος του αναλογικού όρου K_p εφαρμόζεται και στους άλλους δύο όρους και, έτσι, η εξίσωση που προκύπτει είναι η εξής [7]:

$$u(t) = K_p * [e(t) + \frac{1}{T_i} * \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d * \frac{de}{dt}] \quad (3.5)$$

όπου T_i είναι ο χρόνος ολοκλήρωσης και T_d είναι ο χρόνος παραγωγίσισης.

Σε αυτή τη μορφή, οι παράμετροι έχουν σαφή φυσική σημασία. Συγκεκριμένα, η εσωτερική άθροιση παράγει μία νέα μοναδική τιμή σφάλματος, η οποία αντισταθμίζεται για μελλοντικά και παρελθόντα σφάλματα. Η προσθήκη των αναλογικών και παραγωγών συνιστωσών προβλέπει την τιμή σφάλματος σε T_d δευτερόλεπτα (ή δείγματα) στο μέλλον, υποθέτοντας ότι ο έλεγχος βρόχου παραμένει αμετάβλητος. Το ολοκληρωτικό στοιχείο προσαρμόζει την τιμή σφάλματος, για να αντισταθμίσει το άθροισμα όλων των παρελθόντων σφαλμάτων, με σκοπό την πλήρη εξάλειψή τους T_i δευτερόλεπτα (ή δείγματα). Η προκύπτουσα αντισταθμισμένη τιμή μοναδικού σφάλματος κλιμακώνεται από το μοναδικό κέρδος K_p . Οι συντελεστές της Εξίσωσης (3.4) με αυτούς της Εξίσωσης (3.5) συνδέονται με τις σχέσεις [7]:

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (3.6)$$

$$K_d = K_p * T_i \quad (3.7)$$

Η παράλληλη μορφή, όπου οι παράμετροι αντιμετωπίζονται ως απλά κέρδη, είναι η πιο γενική και ευέλικτη μορφή. Ωστόσο, είναι επίσης η μορφή όπου οι παράμετροι αυτοί έχουν τη λιγότερη φυσική ερμηνεία και γενικά προορίζονται για θεωρητική ανάλυση του PID ελεγκτή. Η τυποποιημένη μορφή, παρά το γεγονός ότι είναι λίγο πιο περίπλοκη μαθηματικά, είναι πιο συνηθισμένη στη βιομηχανία [7].

Τα αποτελέσματα της επίδρασης καθεμιάς από τις παραμέτρους K_p , K_i , K_d σε ένα σύστημα κλειστού βρόχου, συνοψίζονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1 Επίδραση K παραμέτρων σε σύστημα κλειστού βρόχου

Αντίδραση Ελεγκτή	Χρόνος Ανύψωσης	Υπερύψωση	Χρόνος Αποκατάστασης	Μόνιμο Σφάλμα
K_p	Μείωση	Αύξηση	Μικρή Αλλαγή	Μείωση
K_i	Μείωση	Αύξηση	Αύξηση	Εξάλειψη
K_d	Μικρή Αλλαγή	Μείωση	Μείωση	Μικρή Αλλαγή

Αυτό που θα πρέπει να κρατήσουμε από την ανάλυση αυτή, είναι ότι ο PID ελεγκτής έχει τρεις όρους [7]:

1. Τον αναλογικό όρο ("P"), ο οποίος αφορά τον αναλογικό έλεγχο και επιδρά στο τρέχον σφάλμα.
2. Τον ολοκληρωτικό όρο ("I"), ο οποίος παρέχει μία δράση ελέγχου, ανάλογη στο χρονικό ολοκλήρωμα του σφάλματος, και εξασφαλίζει ότι το σφάλμα μόνιμης κατάστασης γίνεται μηδενικό.

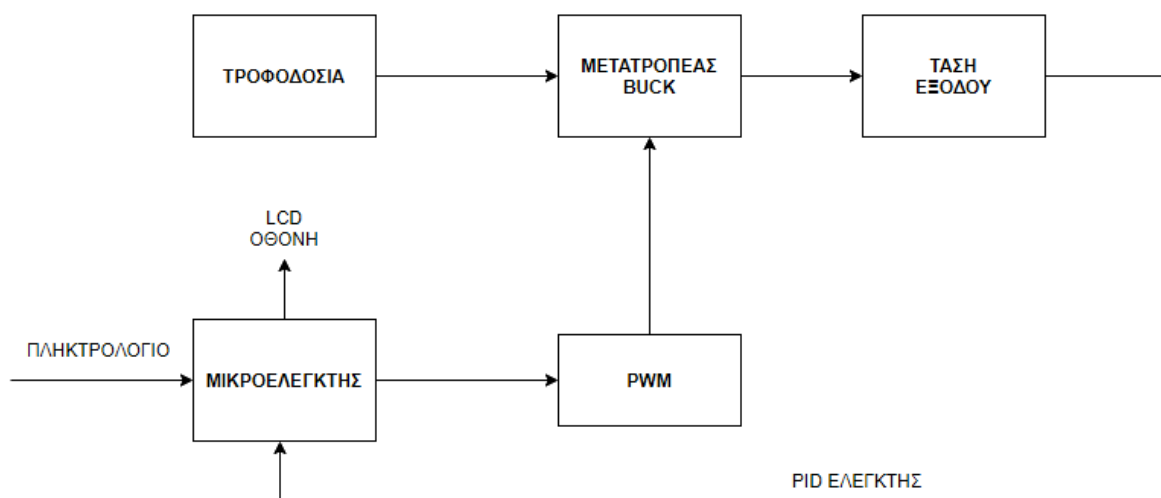
3. Τον διαφορικό όρο (“D”), ο οποίος είναι ανάλογος της χρονικής παραγώγου του σφάλματος, και προβλέπει το μελλοντικό σφάλμα.

Κεφάλαιο 4^ο: Μελέτη – Σχεδίαση Παλμοτροφοδοτικού Ελεγχόμενου από Μικροελεγκτή

Όπως έχει ήδη ειπωθεί, η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματεύεται την μελέτη και σχεδίαση ενός παλμοτροφοδοτικού, ή αλλιώς μετατροπέα συνεχούς τάση σε συνεχή με μεταβλητή τάση εξόδου, ελεγχόμενο από έναν μικροελεγκτή. Στο κεφάλαιο αυτό, αρχικά θα δούμε ποια είναι η φιλοσοφία που ακολουθήθηκε και, βάσει αυτής, ποιο ακριβώς κύκλωμα αναπτύχθηκε, από ποιες βαθμίδες αποτελείται και από ποια ηλεκτρονικά στοιχεία απαρτίζεται η κάθε μία. Στη συνέχεια, θα δούμε αποτελέσματα της προσομοίωσης του αναπτυχθέντος κυκλώματος, την σχεδίαση της PCB πλακέτας μέσω ειδικού λογισμικού και, τελικά, την κατασκευή ολοκληρωμένη.

4.1 Αρχή Λειτουργίας Παλμοτροφοδοτικού

Το μπλοκ – διάγραμμα της διάταξης που σχεδιάστηκε και μελετάται δίνεται στο Σχήμα 4.1, όπου και διακρίνονται οι επιθυμητές εκάστοτε βαθμίδες. Δέχεται τροφοδοσία 12V και έχει έξοδο μεταβλητή, από 1 έως 11V. Κύρια δομικά στοιχεία της συγκεκριμένης διάταξης αποτελούν ο μετατροπέας Buck και ο μικροελεγκτής. Από τη βαθμίδα τροφοδοσίας των 12V τροφοδοτείται απευθείας ο μετατροπέας Buck, ενώ ο μικροελεγκτής, μέσω ενός ρυθμιστή τάσης, τροφοδοτείται με την τάση που απαιτείται.



Σχήμα 4.1: Μπλοκ – διάγραμμα του αναπτυχθέντος παλμοτροφοδοτικού

Συνδεδεμένα στον μικροελεγκτή υπάρχουν ένα πληκτρολόγιο και μία οθόνη LCD. Σκοπός τους είναι να εισάγεται από τον χρήστη, μέσω του πληκτρολογίου, η επιθυμητή τάση εξόδου του παλμοτροφοδοτικού, βάσει των κανόνων που εμφανίζονται στην οθόνη LCD, καθώς και η εμφάνιση της πληκτρολογηθείσας τιμής τάσης σε αυτήν. Αφού πληκτρολογηθεί η επιθυμητή τάση εξόδου, ο μικροελεγκτής, μέσω ειδικού κώδικα που αναπτύσσεται, παράγει μία παλμοσειρά με κύκλο εργασίας ανάλογο της επιθυμητής τιμής τάσης. Η παλμοσειρά αυτή οδηγεί τον μετατροπέα Buck και με τη λειτουργία αυτού, στην έξοδό του, παράγεται η επιθυμητή τιμή τάσης εξόδου που πληκτρολογεί ο

χρήστης. Η τάση εξόδου ελέγχεται εάν είναι σωστή από τον μικροελεγκτή, μέσω ενός PID ελεγκτή, που υλοποιείται επίσης μέσω αναπτυχθέντος κώδικα. Εάν δεν είναι, αναλαμβάνει να διορθώσει το λάθος και να δοθεί η τιμή τάσης εξόδου που εισήχθη από το πληκτρολόγιο.

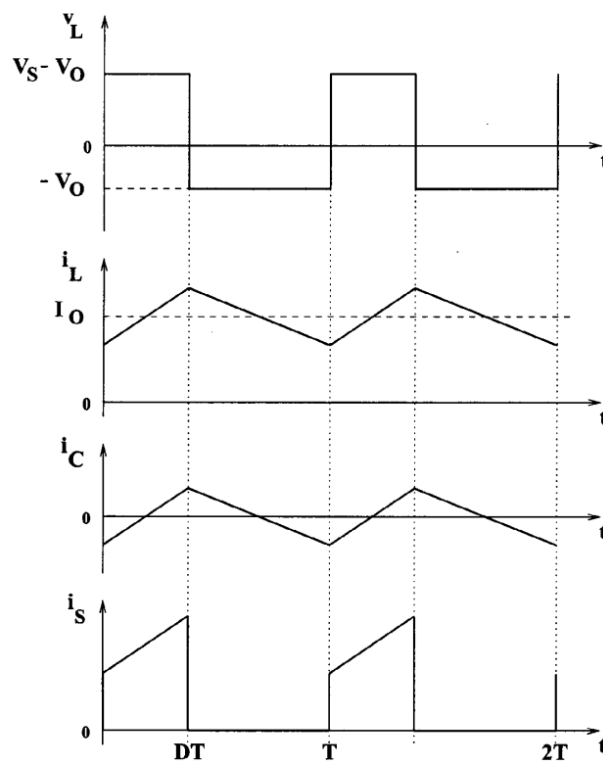
Πριν την προσομοίωση οποιασδήποτε ηλεκτρονικής διάταξης σε κάποιο ειδικό λογισμικό, πραγματοποιούνται υπολογισμοί που οδηγούν στην επιλογή των κατάλληλων στοιχείων για αυτήν. Προτού, λοιπόν, προηγηθεί η προσομοίωση, ας δούμε τους θεωρητικούς υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν για το παλμοτροφοδοτικό μας, βάσει των κριτηρίων και απαιτήσεών μας.

4.2 Επιλογή Κατάλληλων Ηλεκτρονικών Στοιχείων

Όπως ήδη αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα κύρια δομικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται ένας μετατροπέας Buck είναι:

- ένας ημιαγωγικός διακόπτης,
- ένα πηνίο,
- ένας πυκνωτής,
- μία διόδος, και
- μία βαθμίδα ελέγχου με την τεχνική Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (PWM).

Η σχέση μεταξύ της τάσης εισόδου, της τάσης εξόδου, και του κύκλου λειτουργίας D μπορεί να προέλθει, για παράδειγμα, από κυματομορφή τάσης επαγωγέα v_L , που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2: Κυματομορφή τάσης επαγωγέα v_L

Σύμφωνα με τον νόμο του Faraday, το επαγωγικό γινόμενο βολτ – δευτερολέπτου κατά την διάρκεια μίας περιόδου στην σταθερή κατάσταση είναι μηδέν. Για τον μετατροπέα Buck ισχύει:

$$(V_S - V_O) * D * T = -V_O * (1 - D) * T \quad (4.1)$$

Ως εκ τούτου, η συνάρτηση μεταφοράς της συνεχούς τάσης, ορίζεται ως ο λόγος της τάσης εξόδου προς την τάση εισόδου, και είναι:

$$M_V \equiv \frac{V_O}{V_S} = D \quad (4.2)$$

Όπως φαίνεται από την παραπάνω σχέση η τάση εξόδου είναι πάντοτε μικρότερη της τάσης εισόδου.

Οι μετατροπείς DC – DC μπορούν να λειτουργήσουν σε δύο διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας σε σχέση με το ρεύμα επαγωγής i_L . Το Σχήμα 4.2 απεικονίζει τη λειτουργία συνεχούς αγωγιμότητας (CCM – Continuous Current Mode), στο οποίο το ρεύμα επαγωγέα είναι πάντα μεγαλύτερο από μηδέν. Όταν η μέση τιμή του ρεύματος εξόδου είναι χαμηλή (μεγάλη R) ή η συχνότητα μεταγωγής f είναι χαμηλή, ο μετατροπέας μπορεί να εισέλθει στη λειτουργία ασυνεχούς αγωγιμότητας (DCM). Στο DCM, το ρεύμα του επαγωγέα είναι μηδέν κατά τη διάρκεια ενός μέρους της περιόδου μετάβασης. Το CCM προτιμάται για υψηλή απόδοση και καλή χρήση των διακοπών ημιαγωγών και των παθητικών συστατικών. Το DCM μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές με ειδικές απαιτήσεις ελέγχου, επειδή η δυναμική τάξη λειτουργίας του μετατροπέα μειώνεται (η ενέργεια που αποθηκεύεται στον επαγωγέα είναι μηδέν στην αρχή και στο τέλος κάθε περιόδου μεταγωγής). Είναι ασυνήθιστο να αναμειγνύονται οι δύο αυτοί τρόποι λειτουργίας λόγω διαφορετικών αλγορίθμων ελέγχου.

Στον μετατροπέα Buck, η τιμή της επαγωγής του φίλτρου είναι αυτή που καθορίζει το όριο μεταξύ CCM και DCM, και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$L_b = \frac{(1-D)*R}{2*f} \quad (4.3)$$

Στην εφαρμογή μας, ο κύκλος λειτουργίας μπορεί ανάλογα με την τάση εξόδου να μεταβάλλεται από περίπου 0.1 έως 0.9. Η αντίσταση φορτίου R στο κύκλωμά μας είναι 10Ω. Η συχνότητα λειτουργίας είναι 57kHz. Οπότε η τιμή της αυτεπαγωγής θα πρέπει για να λειτουργεί ο μετατροπέας σε συνεχή τρόπο λειτουργίας θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από:

$$L = \frac{(1-0.1)*10}{2*57000} = 78.94\mu H \text{ για κύκλο λειτουργίας } 10\% \text{ και}$$

$$L = \frac{(1-0.9)*10}{2*57000} = 8.77\mu H \text{ για κύκλο λειτουργίας } 90\%.$$

Στο κύκλωμά μας επιλέξαμε πηνίο με αυτεπαγωγή 100μH.

Το ρεύμα επαγωγής του φίλτρου i_L στη λειτουργία CCM αποτελείται από μία dc συνιστώσα I_O με υπέρθεση ενός AC σήματος τριγωνικής μορφής. Σχεδόν όλο αυτό το AC σήμα ρέει μέσω του φίλτρου του πυκνωτή ως τρέχον i_C . Το ρεύμα i_C προκαλεί μικρή τάση κυμάτωσης στην τάση DC εξόδου V_O . Για να περιοριστεί η από κορυφή – σε – κορυφή τιμή της τάσης κυμάτωσης κάτω από μία ορισμένη τιμή V_r , η χωρητικότητα του πυκνωτή του φίλτρου C θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από:

$$C_{min} = \frac{(1-D)*V_O}{8*V_r*L*f^2} \quad (4.4)$$

Στο κύκλωμά μας ο κύκλος λειτουργίας μεταβάλλεται από 0.1 έως 0.9 και η τάση εξόδου αντίστοιχα από περίπου 1 V – 11V. Η τάση κυμάτωσης είναι κάτω από 30mV και η συχνότητα 57kHz. Με αυτά τα δεδομένα, η τιμή του πυκνωτή θα πρέπει να έχει τιμή τουλάχιστον:

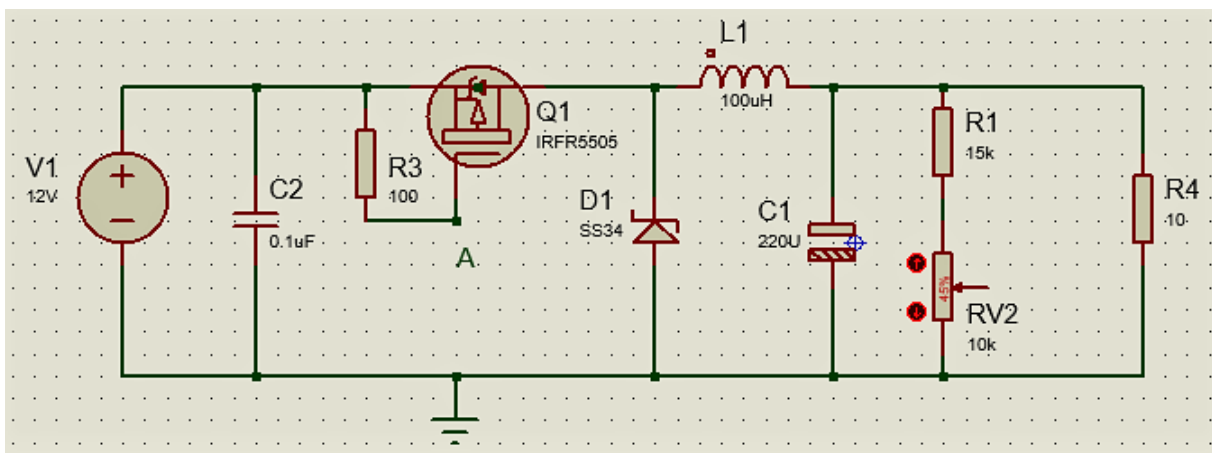
$$C_{min} = \frac{(1 - 0.1) * 1}{8 * 0.03 * 100 * 10^{-6} * 57000^2} = 11.54\mu F$$

$$C_{min} = \frac{(1 - 0.9) * 11}{8 * 0.03 * 100 * 10^{-6} * 57000^2} = 14.1\mu F$$

Στο κύκλωμά μας έχει επιλεγεί να είναι 100 μF.

Για συμπαγή και με χαμηλές απώλειες αγωγιμότητας του μετατροπέα, είναι επιθυμητό να χρησιμοποιούνται μικρές τιμές στα παθητικά στοιχεία. Οι παραπάνω εξισώσεις δείχνουν ότι αυτό μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας υψηλή συχνότητα μεταγωγής f. Η συχνότητα μεταγωγής περιορίζεται ωστόσο, από τον τύπο των χρησιμοποιούμενων διακοπτικών ημιαγωγικών στοιχείων του και τις απώλειες μεταγωγής τους. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι οι τιμές των L και C μπορεί να μεταβληθούν λόγω της επίδρασης των παρασιτικών συστατικών στον μετατροπέα, ειδικά από την αντίσταση σειράς του πυκνωτή.

Βάσει των επιλεχθέντων ηλεκτρονικών στοιχείων του μετατροπέα Buck, η βαθμίδα του μετατροπέα αυτής της διάταξης, χωρίς τη βαθμίδα ελέγχου PWM ακόμα συνδεδεμένη στο σημείο A, φαίνεται ολοκληρωμένη στο Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3: Βαθμίδα μετατροπέα Buck

4.3 Επιλογή Μικροελεγκτή και PID ελεγκτή

Η επιλογή μικροελεγκτή για την διάταξή μας αποτελεί προτεραιότητα, καθώς με τη βοήθειά του «συνθέτονται» οι βαθμίδες PWM και ελεγκτή PID. Η βαθμίδα PWM θα παράγει μία παλμοσειρά με,

ανάλογο κάθε φορά,, κύκλο εργασίας, ενώ η βαθμίδα του ελεγκτή PID θα ελέγχει την τάση εξόδου του μετατροπέα Buck με την τάση που επιθυμεί ο χρήστης και πληκτρολογεί. Θα διαβάζεται, δηλαδή, η αναλογική έξοδος του μετατροπέα από τον μικροελεγκτή και θα μετατρέπεται σε ψηφιακή με την βαθμίδα PWM. Προαπαιτούμενα, λοιπόν, χαρακτηριστικά είναι η ύπαρξη εξόδου PWM και μετατροπέα σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό.

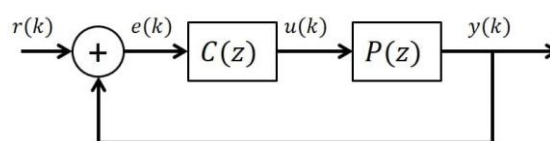
Όπως είπαμε, ο μετατροπέας σήματος αναλογικού σε ψηφιακό (ADC) χρησιμοποιείται για να μετατρέψει ένα αναλογικό σήμα, όπως η τάση, σε ψηφιακή μορφή, έτσι ώστε ένας μικροελεγκτής να μπορεί να το διαβάσει και να το επεξεργαστεί. Μερικοί μικροελεγκτές έχουν ενσωματωμένους 12 μετατροπείς ADC. Αυτοί είναι συνήθως 8, 10, 12, 16 bit, και έχουν 256 έως 56635 επίπεδα κβαντοποίησης.

Επιλέχθηκε, τελικά ο μικροελεγκτής PIC18F4550, ο οποίος διαθέτει έως και 13 κανάλια εισόδου των 10 bit. Η διαδικασία μετατροπής ADC πρέπει να αρχίσει από το πρόγραμμα χρήστη και μπορεί να πάρει αρκετά μsec για να ολοκληρωθεί. Οι ADC μετατροπείς παράγουν συνήθως μία μικροδιακοπή όταν μια μετατροπή ολοκληρωθεί, έτσι ώστε το πρόγραμμα του χρήστη να μπορεί να διαβάσει τα στοιχεία γρήγορα [10].

Εκτός από ADC μετατροπέα, ο μικροελεγκτής PIC18F4550 διαθέτει και έξοδο PWM, η τάση τροφοδοσίας του μπορεί να κυμαίνεται από 2 έως και 5.5V, ενώ διαθέτει και συγκριτή, ο οποίος είναι ιδιαίτερος χρήσιμος για τον έλεγχο με PID [10].

Με τον επιλεγόμενο μικροελεγκτή, θα υλοποιηθούν οι βαθμίδες PWM και PID ελεγκτή. Ο ελεγκτής PID είναι ένας από τους περισσότερο χρησιμοποιούμενους ελεγκτές, ή αντισταθμιστές, που υπάρχουν σήμερα στον αυτόματο έλεγχο, λόγω του εύκολου συντονισμού και της ανθεκτικότητάς του στις διάφορες υπάρχουσες διεργασίες. Χρησιμοποιείται για να φέρει μία φυσική μεταβλητή (θερμοκρασία, ταχύτητα, πίεση, κ.λπ.) σε ένα προκαθορισμένο επίπεδο λειτουργίας (set point).

Ένα κλασικό μπλοκ – διάγραμμα συστήματος αυτομάτου ελέγχου κλειστού βρόχου μπορεί να παρασταθεί ως εξής:



Σχήμα 4.4: Μπλοκ – διάγραμμα ενός συστήματος αυτομάτου ελέγχου κλειστού βρόχου

Όπου $r(k)$ είναι το σήμα αναφοράς ή το επιθυμητό σημείο ρύθμισής, το $e(k)$ το σήμα σφάλματος που προκύπτει από αφαίρεση του $y(k)$ από το $r(k)$, το $C(z)$ είναι η συνάρτηση μεταφοράς του διακριτού ελεγκτή PID, το $u(k)$ είναι το σήμα ελέγχου, το $P(z)$ είναι η διεργασία σε διακριτή μορφή παράστασης, και $y(k)$ είναι η μεταβλητή ελέγχου της εξόδου.

Η έξοδος του ελεγκτή PID στο χρόνο μπορεί να παρασταθεί με την ακόλουθη εξίσωση:

$$u(t) = k_p * e(t) + \frac{k_p}{t_i} * \int_0^t e(t)dt + k_p * t_d * \frac{de(t)}{dt} \quad (4.5)$$

και ο αντίστοιχος μετασχηματισμός Laplace δίδεται από τη παρακάτω σχέση:

$$u(s) = k_p * \left[1 + \frac{1}{t_i * s} + (t_d * s) \right] * e(s) \quad (4.6)$$

Κάθε ελεγκτής PID έχει τρεις παραμέτρους (k_p , t_i , t_d):

- το αναλογικό κέρδος k_p ,
- τον χρόνο ολοκλήρωσης t_i , και
- τον χρόνο διαφόρισης t_d .

Υπάρχουν πολλές τεχνικές και συγγραφείς που ασχολούνται με τον τρόπο συντονισμού ή προσαρμογής αυτών των παραμέτρων στο PID ελεγκτή. Συνήθως, κάθε βιομηχανική διεργασία αντιπροσωπεύεται από συναρτήσεις μεταφοράς πρώτης ή δεύτερης τάξης. Παρακάτω δίνεται ένα μοντέλο πρώτης τάξης, το οποίο πρόκειται να διαμορφωθεί, ώστε να προσομοιώνει τη συμπεριφορά της διεργασίας μας.

$$P(s) = \frac{K * e^{-\theta * s}}{(\tau * s) + 1} \quad (4.7)$$

Το μοντέλο παρουσιάζεται στη συνεχή του μορφή, στο πεδίο s , δηλαδή μετασχηματισμένο κατά Laplace, όπου K είναι το αναλογικό κέρδος του συστήματος, τ είναι η σταθερά του χρόνου της διεργασίας και θ είναι η καθυστέρηση της διεργασίας.

Στην πτυχιακή αυτή εργασία, θα εφαρμοστεί ένας τρόπος ελέγχου, χρησιμοποιώντας την τεχνική PI με εκχώρηση 2 πραγματικών πόλων. Σε αυτόν τον τύπο του ελεγκτή PID, στον μικροελεγκτή PIC χρησιμοποιούμε μόνο τον αναλογικό ελεγκτή και τον ολοκληρωτικό ελεγκτή, θέτοντας το παραγωγικό όρο στο μηδέν. Η βασική ιδέα αυτού του σχεδιασμού είναι να αντιστοιχίσουμε τους πόλους της διεργασίας, έτσι ώστε να ενεργεί όπως θέλουμε, ακολουθώντας την ακόλουθη διαδικασία:

- *Επιλέγουμε τον επιθυμητό χρόνο αποκατάστασης T_{SS} , δηλαδή τον χρόνο μέσα στον οποίο θέλουμε να σταθεροποιηθεί η τάση. Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι θέλουμε να σταθεροποιηθεί η τάση σε περίπου 5 δευτερόλεπτα. Τότε: $T_{SS} = 5$.*
- *Υπολογίζουμε τη φυσική συχνότητα του συστήματος, έτσι ώστε να μην υπάρχει υπέρβαση (overshooting). Ένας τρόπος ώστε αυτό να επιτευχθεί είναι να θεωρήσουμε 2 ίσους πόλους πάνω στο κατακόρυφο άξονα. Αυτό είναι γνωστό και ως κρίσιμα αποσβεννόμενο σύστημα. Η φυσική συχνότητα μπορεί να προσδιοριστεί με τον ακόλουθο τύπο, όπως περιγράφεται λεπτομερώς στην εξίσωση αμέσως παρακάτω:*

$$W_n = \frac{5.8335}{T_{SS}} \quad (4.8)$$

- Υπολογίζουμε το επιθυμητό πολυώνυμο που περιέχει τους δύο ίσους πόλους που εκχωρούμε στο σύστημα:

$$(s + W_n)^2 = s^2 + (p_1 * s) + p_2 = s^2 + (2 * W_n * s) + W_n^2 \quad (4.9)$$

$$p_1 = 2 * W_n \quad (4.10)$$

$$p_2 = W_n^2 \quad (4.11)$$

- Τέλος, υπολογίζουμε τις παραμέτρους k_p και t_i με τις ακόλουθες σχέσεις:

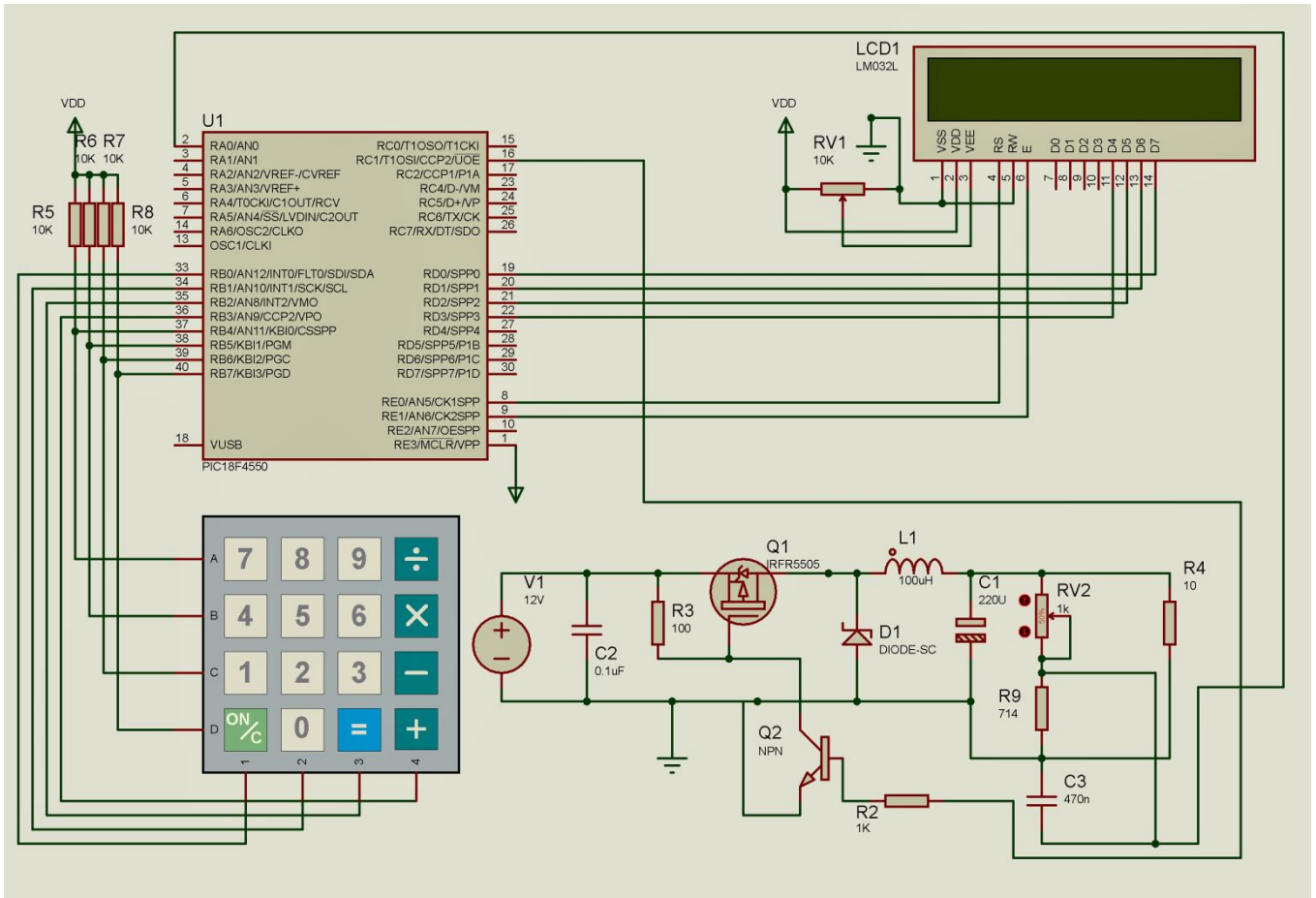
$$k_p = \frac{(p_1 * \tau) - 1}{K} \quad (4.12)$$

$$t_i = \frac{k_p * K}{p_2 * \tau} \quad (4.13)$$

Με την επιλογή και του κατάλληλου μικροελεγκτή, και επομένως, υλοποίηση της βαθμίδας ελέγχου PWM και του PID ελεγκτή με αυτόν μέσω κώδικα, ολοκληρώνεται η διάταξη του παλμοτροφοδοτικού. Ολοκληρωμένο το κύκλωμα, με τις κατάλληλες συνδέσεις μεταξύ ηλεκτρονικών στοιχείων και βαθμίδων, απεικονίζεται στο Σχήμα 4.5.

4.4 Προσομοίωση Παλμοτροφοδοτικού στο Λογισμικό Proteus 8.12

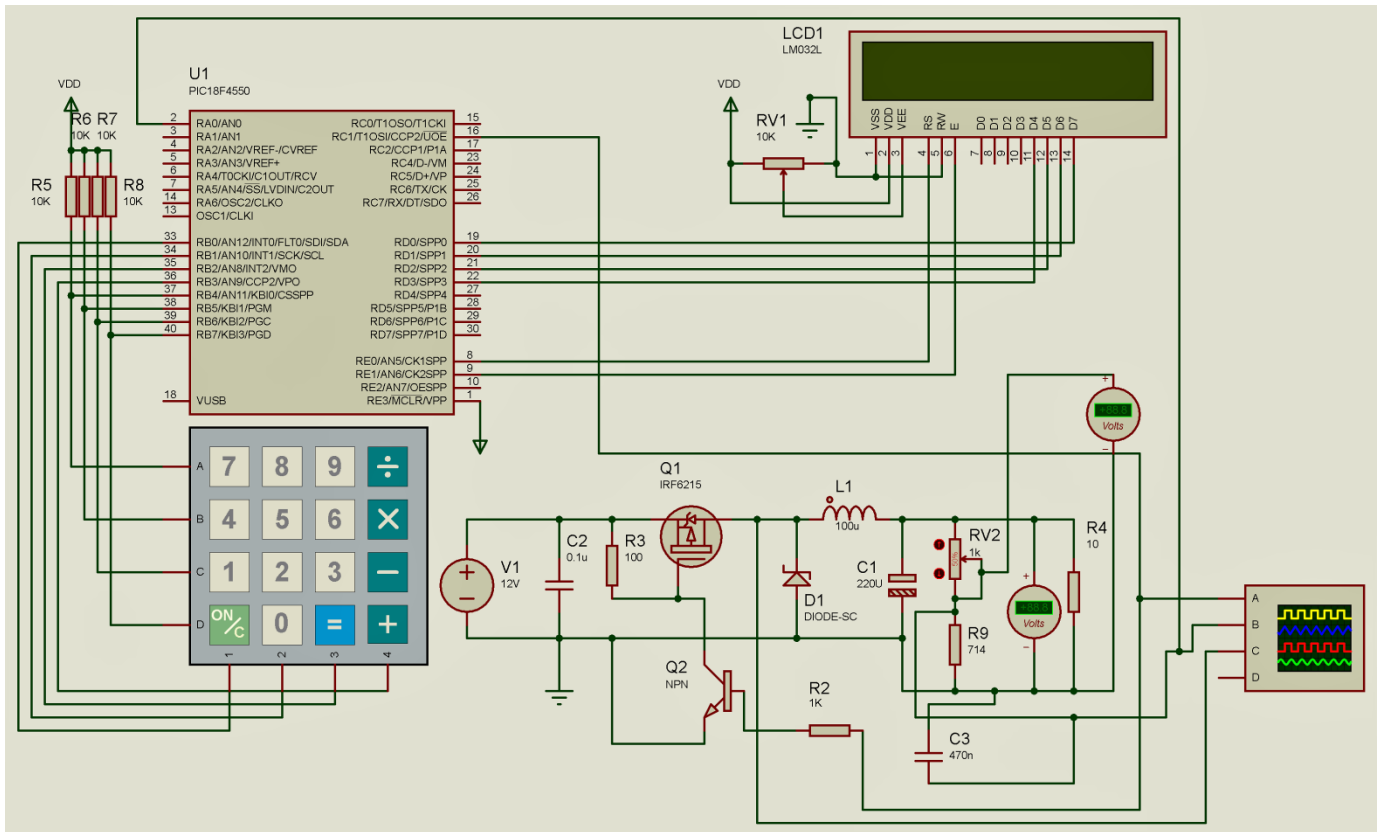
Τους υπολογισμούς και την επιλογή των ηλεκτρονικών στοιχείων ακολουθεί η προσομοίωση του κυκλώματος μέσω ειδικού λογισμικού. Για την προσομοίωση της συγκεκριμένης ηλεκτρονικής διάταξης, δεδομένου ότι χρησιμοποιείται μικροελεγκτής και θα χρειαστεί σύνταξη και ενσωμάτωση κώδικα, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Proteus 8 Professional, και ακόμα πιο ειδικά η έκδοση 8.12. Η κυκλωματική διάταξη στο περιβάλλον του Proteus απεικονίζεται στο Σχήμα 4.6.



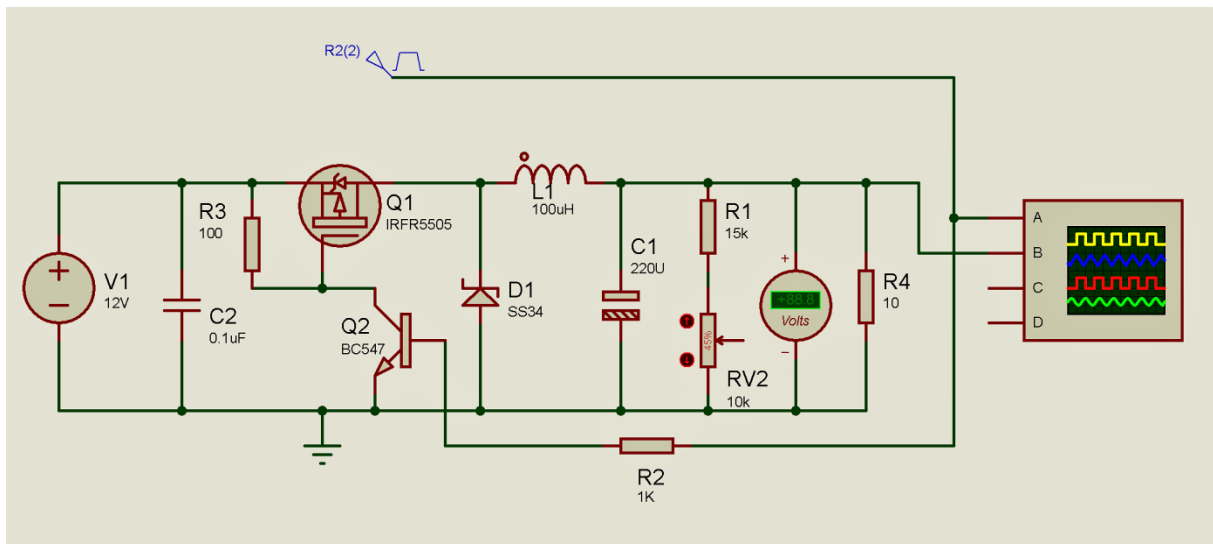
Σχήμα 4.5: Ολοκληρωμένη κυκλωματική διάταξη του παλμοτροφοδοτικού

Στο Proteus δεν προσομοιώνεται απόλυτα ο χρόνος και η συχνότητα της βαθμίδας ελέγχου PWM με τον μικροελεγκτή. Γι' αυτό και το κομμάτι λειτουργίας του μετατροπέα Buck θα προσομοιωθεί αυτούσιο, όπως και φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Στο σχήμα αυτό, βλέπουμε την βαθμίδα του μετατροπέα Buck, ο ημιαγωγός διακόπτης του οποίου οδηγείται από το σήμα μίας γεννήτριας παλμών που έχουμε προσθέσει, με ορισμένο από εμάς κύκλο λειτουργίας. Με την ρύθμιση του κύκλου εργασίας της παλμοσειράς που παράγεται από την γεννήτρια, μέσω των ρυθμίσεών της, σε διάφορες τιμές, θα παρατηρήσουμε την λειτουργία του μετατροπέα και την μεταβολή της τιμής της τάσης εξόδου.

Η γεννήτρια R2(2) παράγει μία παλμοσειρά με συγκεκριμένο κύκλο εργασίας, η οποία εφαρμόζεται στο τρανζίστορ Q2, με αποτέλεσμα αυτό να άγει, όπως επίσης να άγει και το MOSFET Q1. Το τρανζίστορ Q2 λειτουργεί ως ένας ενισχυτής ρεύματος, καθώς η πύλη του MOSFET θέλει κάποιο στιγμιαίο ρεύμα για να άγει, ενώ ταυτόχρονα αντιστρέφει και το σήμα της γεννήτριας.



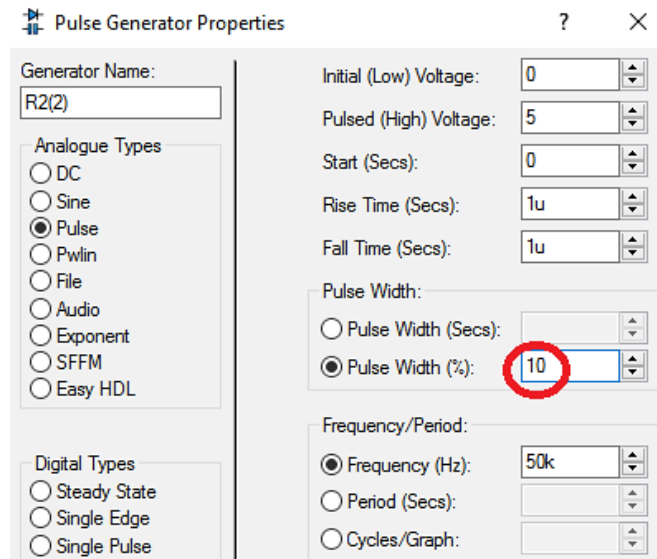
Σχήμα 4.6: Το κύκλωμα του παλμοτροφοδοτικού στο περιβάλλον του Proteus 8.12



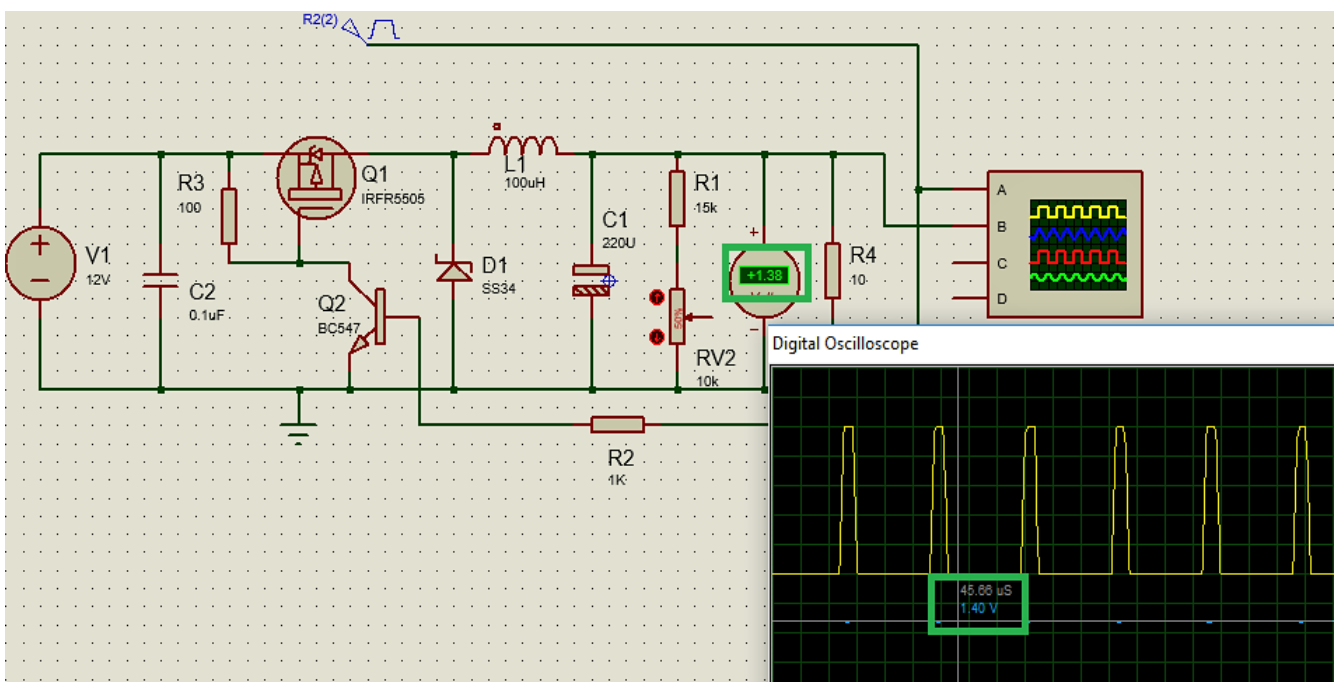
Σχήμα 4.7: Προσομοίωση της βαθμίδας του μετατροπέα Buck με τη βοήθεια γεννήτριας

Επίσης, ο ρόλος της αντίστασης R2 που βρίσκεται στην βάση του τρανζίστορ Q2 είναι ο περιορισμός του ρεύματος της τάσης των 5V από τον μικροελεγκτή στο πραγματικό κύκλωμα, όταν αυτός είναι συνδεδεμένος.

Η τάση εισόδου του μετατροπέα είναι σταθερά 12V. Μεταβάλλουμε τον κύκλο λειτουργίας της παλμοσειράς της γεννήτριας. Με έναν παλμογράφο θα δούμε τις κυματομορφές της εξόδου της γεννήτριας και του μετατροπέα. Ενώ, με τη βοήθεια ενός βολτόμετρου θα βλέπουμε την τιμή της τάσης εξόδου του μετατροπέα Buck.

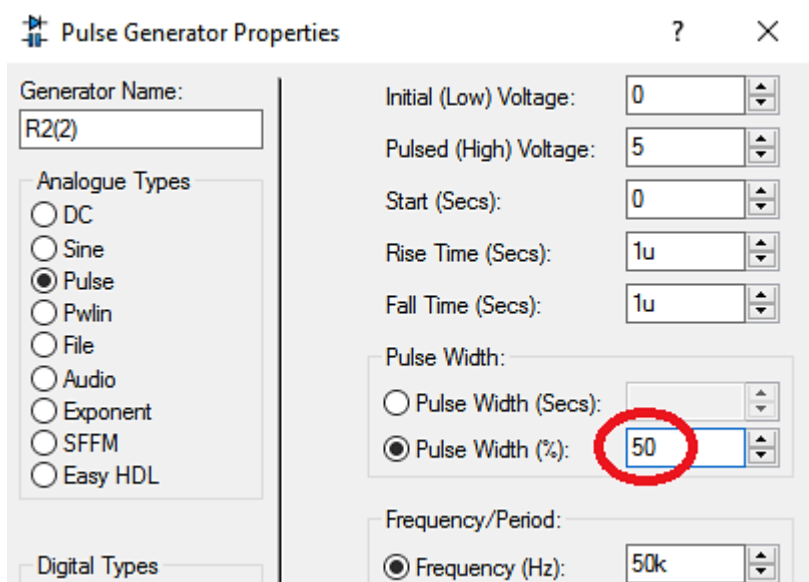


Σχήμα 4.8: Ρύθμιση πλάτους στα 5V και κύκλου εργασίας της παλμοσειράς στο 10%

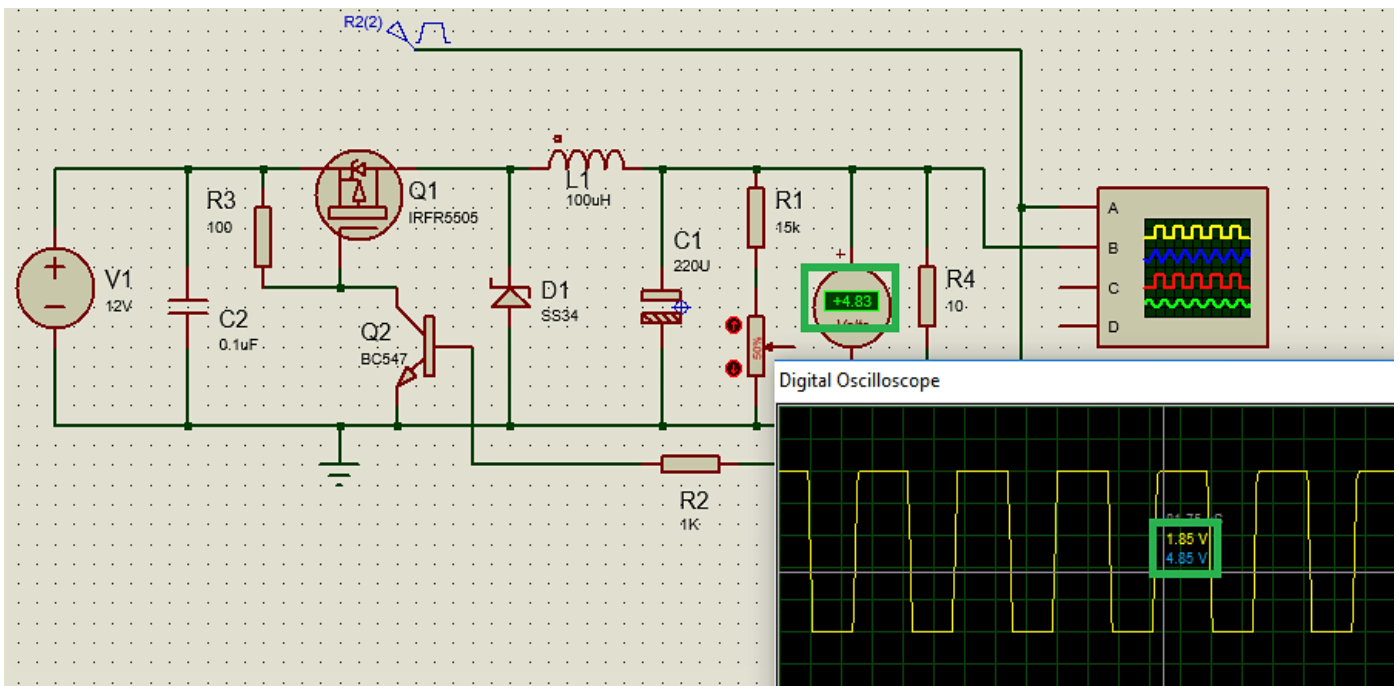


Σχήμα 4.9: Τάση εξόδου 1.4V για κύκλο εργασίας 10%

Στο Σχήμα 4.9 φαίνονται τα αποτελέσματα των ρυθμίσεών μας. Για κύκλο εργασίας 10%, παρατηρούμε ότι η έξοδος του μετατροπέα βρίσκεται στα 1.4V. Ενδεικτικά, θα ρυθμίσουμε τον κύκλο εργασίας στο 50%, καθώς και στο 80%, ώστε να δούμε και για αυτές την τάση εξόδου.

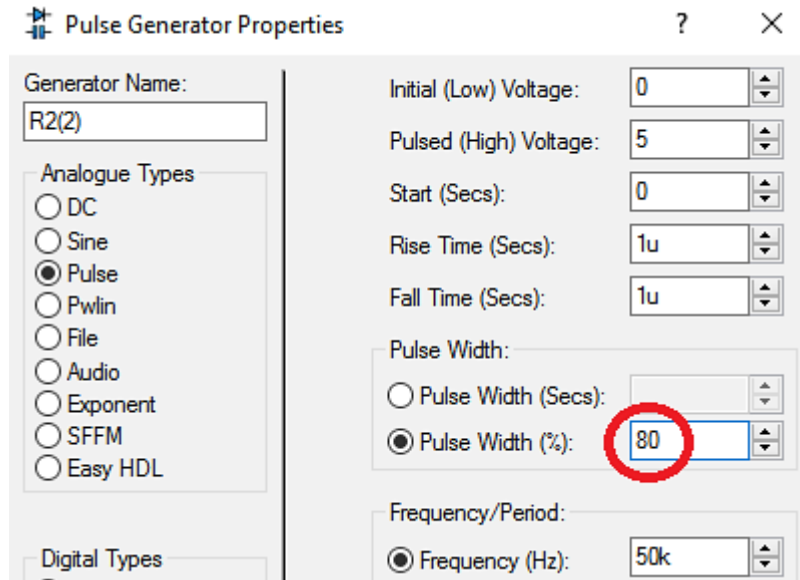


Σχήμα 4.10: Ρύθμιση πλάτους στα 5V και κύκλου εργασίας της παλμοσειράς στο 50%

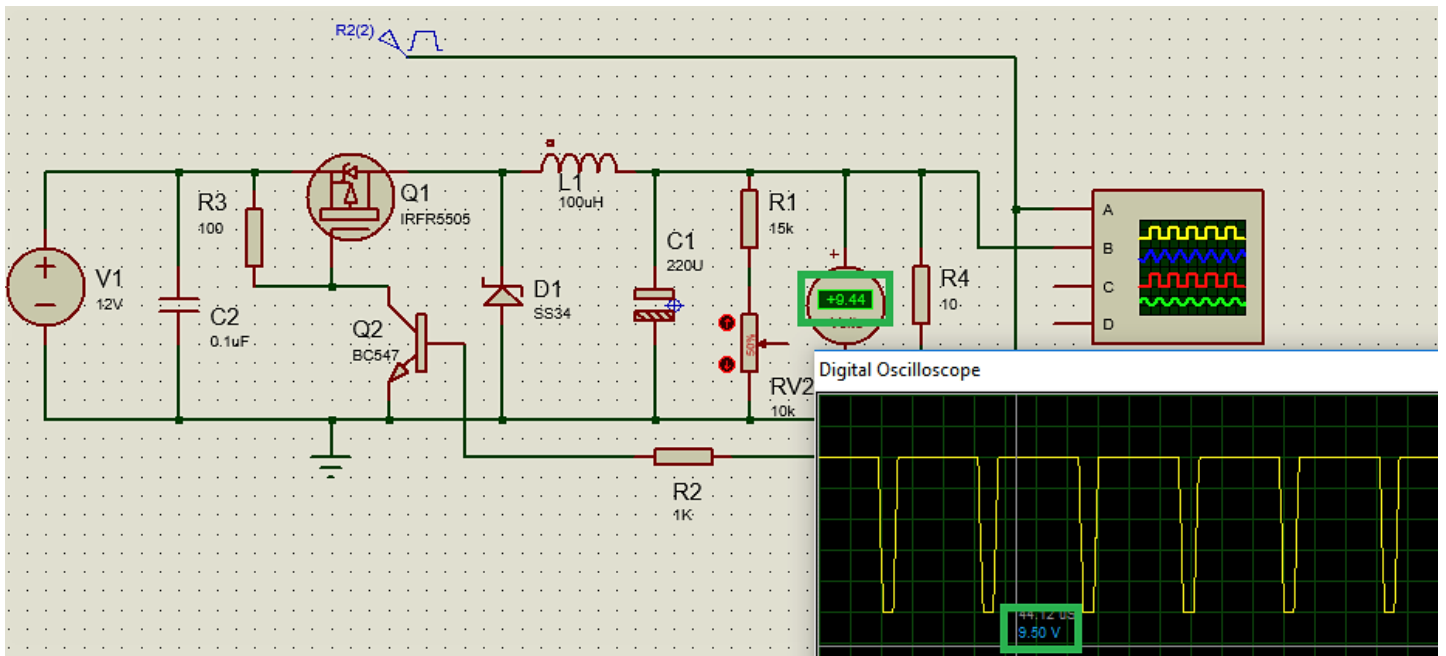


Σχήμα 4.11: Τάση εξόδου 4.85V για κύκλο εργασίας 50%

Στα Σχήματα 4.10, 4.11, 4.12 και 4.13, φαίνονται τα αποτελέσματα των ρυθμίσεών μας για κύκλο εργασίας 50% και 80%, και παρατηρούμε ότι η έξοδος του μετατροπέα βρίσκεται στα 4.85V και 9.5V, αντίστοιχα.



Σχήμα 4.12: Ρύθμιση πλάτους στα 5V και κύκλου εργασίας της παλμοσειράς στο 80%



Σχήμα 4.13: Τάση εξόδου 9.5V για κύκλο εργασίας 80%

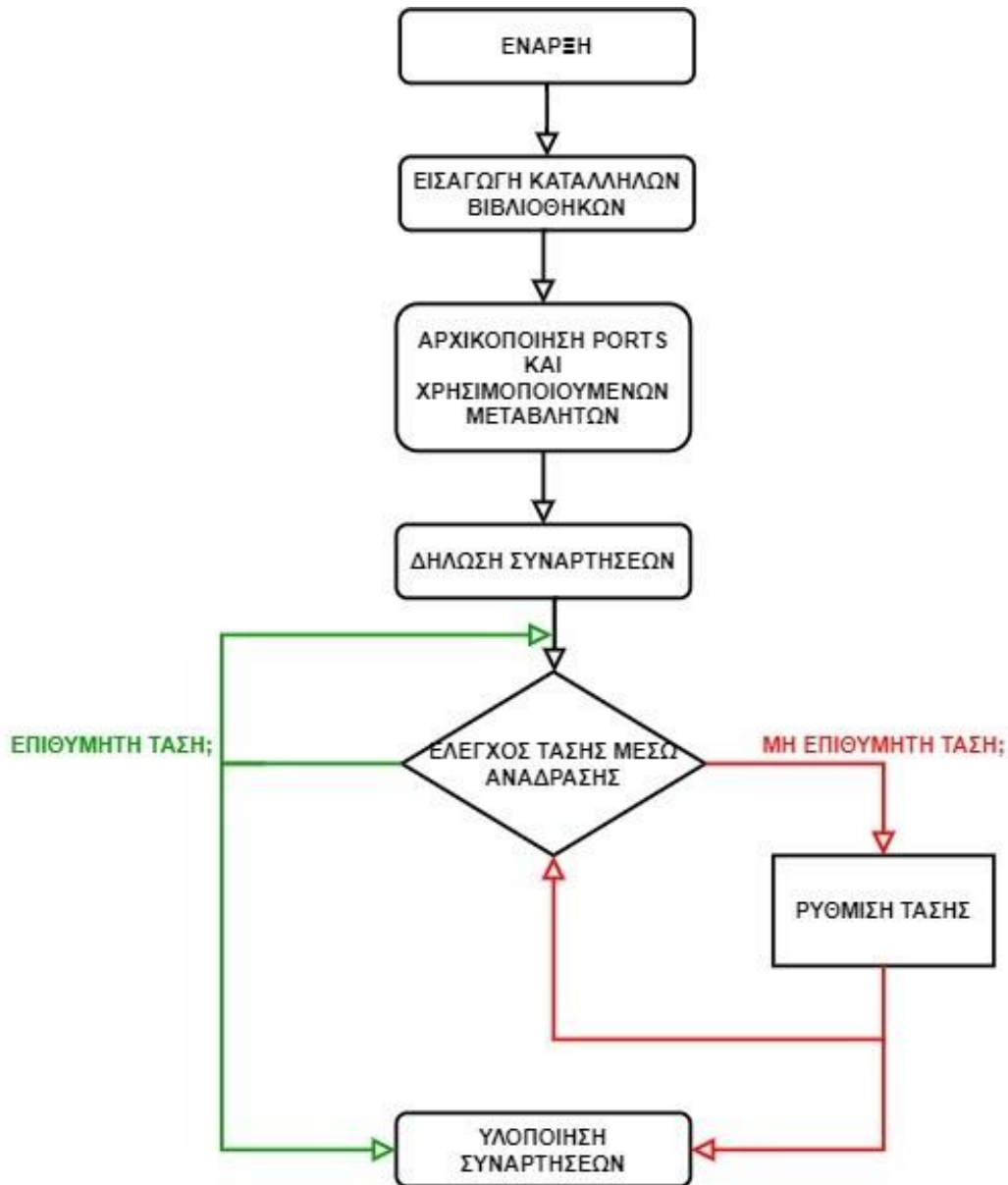
Για να υπάρχει μία πλήρης εικόνα των θεωρητικών τιμών της τάσης εξόδου για τιμές του κύκλου λειτουργίας από 0 έως και 90%, δίνεται ένας πίνακας με τις τιμές εξόδου για κάθε μία από αυτές, όπως αυτές υπολογίζονται μέσω της Εξίσωσης (2.4) της ενότητας 2.3.1 του κεφαλαίου 2. Παρά τις όποιες μικρές διαφοροποιήσεις σε ορισμένες περιπτώσεις, η λειτουργία του μετατροπέα Buck είναι ορθή.

Πίνακας 4.1: Τιμή τάσης εξόδου βάσει του κύκλου εργασίας της παλμοσειράς PWM

Κύκλος εργασίας (DC%)	Τάση εξόδου μετατροπέα Buck
10%	1.2V
20%	2.4V
30%	3.6
40%	4.8V
50%	6V
60%	7.2V
70%	8.4V
80%	9.6V
90%	10.8V

4.5 Κώδικας Μικροελεγκτή

Για την λειτουργία του παλμοτροφοδοτικού, συντάχθηκε κώδικας για τον μικροελεγκτή ώστε να πραγματοποιεί όλες τις δέουσες λειτουργίες. Το διάγραμμα ροής του δίνεται στο Σχήμα 4.14. Παρουσιάζει συνοπτικά όλες τις διαδικασίες που περιλαμβάνει και εκτελεί διαρκώς. Ο πλήρης κώδικας του μικροελεγκτή δίνεται στο Παράρτημα Α της εργασίας, με επεξηγήσεις και σχόλια.



Σχήμα 4.14: Διάγραμμα ροής κώδικα μικροελεγκτή

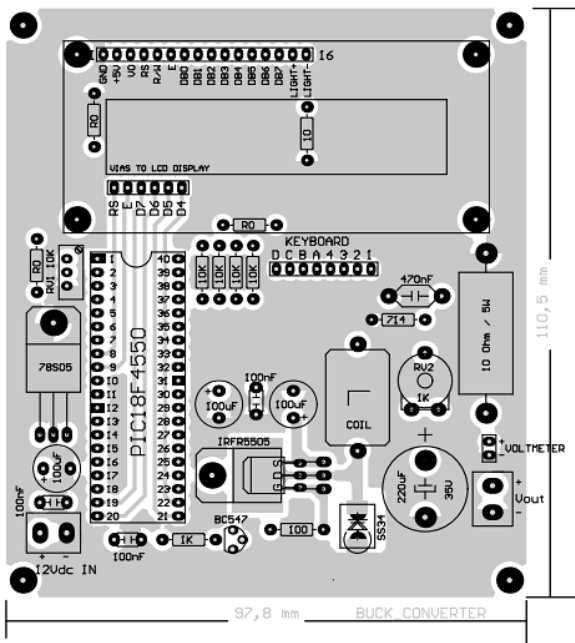
4.6 Σχεδίαση PCB Πλακέτας Παλμοτροφοδοτικού με το Λογισμικό EasyEDA

Μετά, λοιπόν, και την προσομοίωση του κυκλώματος του παλμοτροφοδοτικού για την διαπίστωση της ορθής λειτουργίας του, ακολουθεί η σχεδίαση της PCB πλακέτας του, ούτως ώστε να προχωρήσει η υλοποίησή του.

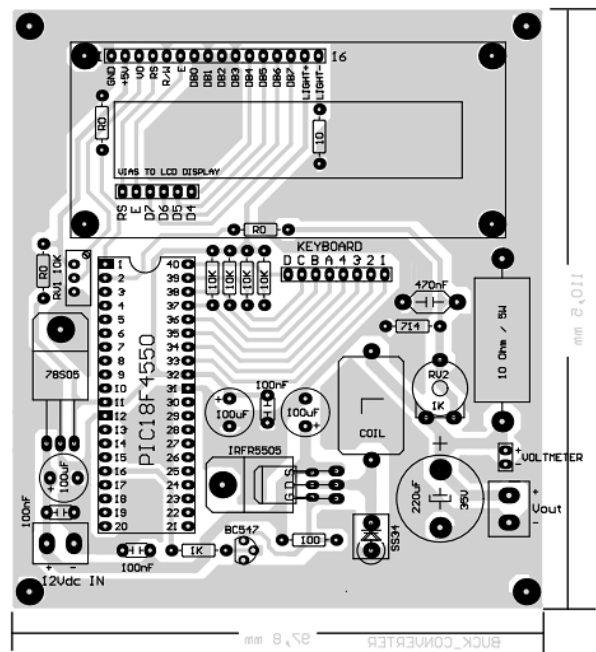
Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για τον σκοπό αυτό είναι το EasyEDA. Πρόκειται για μία διαδικτυακή υπηρεσία εργαλείων, που επιτρέπει σε μηχανικούς ανά τον κόσμο να σχεδιάζουν, να προσομοιώνουν, να μοιράζονται – δημόσια ή και ιδιωτικά – και να συζητούν σχηματικά, προσομοιώσεις και πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων. Επιτρέπει τη δημιουργία και επεξεργασία σχηματικών διαγραμμάτων, την προσομοίωση αναλογικών και ψηφιακών κυκλωμάτων, την

δημιουργία και επεξεργασία διατάξεων πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων, καθώς και, προαιρετικά, την κατασκευή πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων.

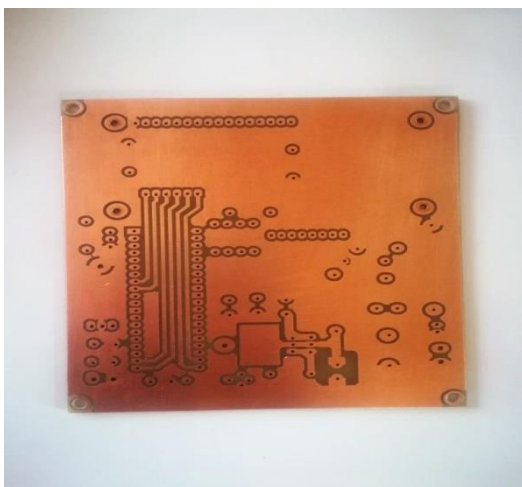
Με τη βοήθεια του EasyEDA, βασιζόμενοι στο ηλεκτρονικό κύκλωμα του παλμοτροφοδοτικού που είδαμε στο Σχήμα 4.5 της υποενότητας 4.3, βρέθηκαν όλα τα απαραίτητα ηλεκτρονικά στοιχεία, σχεδιάστηκαν όλες οι βαθμίδες, έγιναν οι κατάλληλες συνδέσεις μεταξύ τους. Αφού στήθηκε το ολοκληρωμένο κύκλωμα, έγινε η μετατροπή του σε PCB πλακέτα. Τα στοιχεία διατάχθηκαν έτσι, ώστε να μη συγχέονται τυχόν συνδέσεις μεταξύ τους και προκληθεί βραχυκύκλωμα ή οποιοδήποτε άλλο πρόβλημα. Ο τρόπος διάταξης των στοιχείων και οι συνδέσεις και των δύο όψεων της πλακέτας φαίνονται στα Σχήματα 4.15 και 4.16.



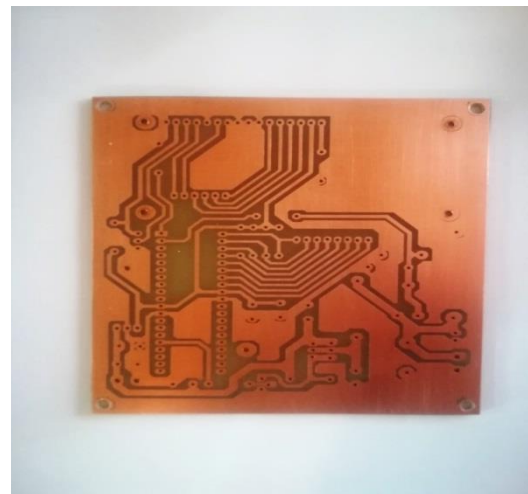
Σχήμα 4.15: Άνω όψη της PCB πλακέτας



Σχήμα 4.16: Κάτω όψη της PCB πλακέτας



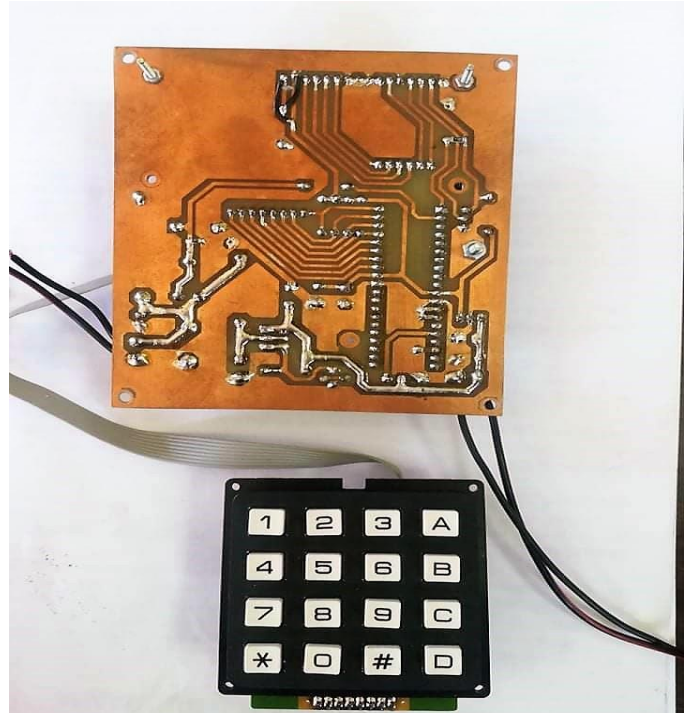
Σχήμα 4.17: Άνω όψη της τελικής PCB πλακέτας



Σχήμα 4.18: Κάτω όψη της τελικής PCB πλακέτας



Σχήμα 4.19: Τελική διάταξη παλμοτροφοδοτικού



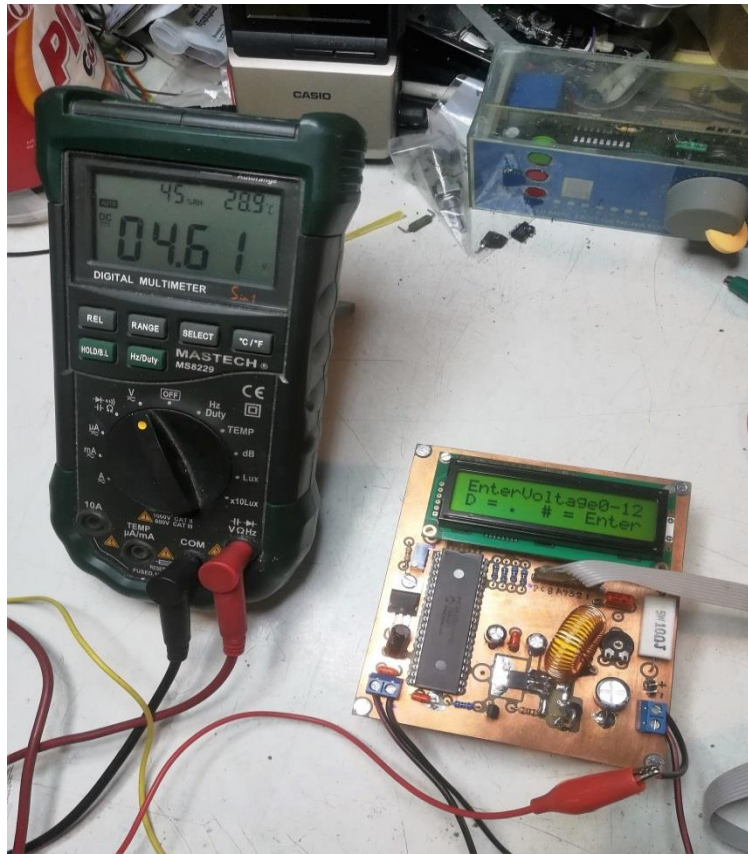
Σχήμα 4.20: Κολλήσεις κάτω όψης πλακέτας

Εφόσον πραγματοποιείται και η σχεδίαση της PCB πλακέτας του παλμοτροφοδοτικού, γίνεται η παραγγελία της. Αποστέλλεται εντός λίγων ημερών και η μορφή της, και από τις δύο της όψεις, απεικονίζεται στα Σχήματα 4.17 και 4.18.

4.7 Υλοποίηση Παλμοτροφοδοτικού και Μετρήσεις

Στην πορεία προς την τελική μορφή του παλμοτροφοδοτικού, τοποθετούνται τα ηλεκτρονικά στοιχεία επάνω στην PCB πλακέτα, πραγματοποιούνται οι κολλήσεις τους με κολλητήρι επάνω σε αυτήν και η τελική της μορφή φαίνεται στο Σχήμα 4.19. Ενώ, επίσης, οι κολλήσεις που πραγματοποιήθηκαν, εικονίζονται στο Σχήμα 4.20.

Έχοντας καταλήξει στην τελική μορφή της διάταξης, ακολουθούν οι μετρήσεις του παλμοτροφοδοτικού σε κατάσταση λειτουργίας. Συνδέουμε σταθερή τροφοδοσία 12V στην διάταξη, μέσω της οποίας τροφοδοτείται επίσης και ένας σταθεροποιητής τάσης 5V, ο οποίος τροφοδοτεί με την τάση αυτή τον μικροελεγκτή PIC18F4550, την οθόνη LCD και το πληκτρολόγιο. Επιπροσθέτως, προς επιβεβαίωση της λειτουργίας του τροφοδοτικού, συνδέεται στην έξοδο του, δηλαδή στην έξοδο του μετατροπέα Buck, ένα βολτόμετρο, για μέτρηση της τάσης εξόδου από το παλμοτροφοδοτικό, την οποία εισάγει ο χρήστης μέσω του πληκτρολογίου. Η πλακέτα του παλμοτροφοδοτικού και το, συνδεδεμένο στην έξοδο αυτού, βολτόμετρο απεικονίζονται στο Σχήμα 4.21.



Σχήμα 4.21: Τροφοδοσία της πλακέτας του παλμοτροφοδοτικού

Η τελική διάταξη που περιλαμβάνει:

- τον μικροελεγκτή PIC18F4550,
- την οθόνη LCD για την απεικόνιση
- το πληκτρολόγιο keypad 4x4, και
- το αναλογικό κύκλωμα μετατροπέα Buck.

Ο χρήστης εισάγει μέσω του πληκτρολογίου την τιμή τάσης που επιθυμεί να δει στην έξοδο του παλμοτροφοδοτικού. Έστω ότι θέλουμε τάση εξόδου με τιμή 6.45V. Πληκτρολογούμε τον αριθμό '6', ως το ακέραιο μέρος της τιμής, πατώντας το αντίστοιχο πλήκτρο 6. Την τελεία την εισάγουμε με το πλήκτρο 'D' και αφού πληκτρολογήσουμε και το δεκαδικό μέρος της με τα αντίστοιχα πλήκτρα, πατάμε 'Enter'. Το 'Enter' το δίνουμε πατώντας το πλήκτρο '#' του πληκτρολογίου.

Το πρόγραμμα που έχει συνταχθεί και αποθηκευτεί στον μικροελεγκτή, λαμβάνει την τιμή της τάσης εξόδου που επιθυμούμε. Έτσι, στην PWM έξοδο του παράγεται παλμοσειρά με κύκλο εργασίας τέτοιο, ώστε να ρυθμιστεί η έξοδος του παλμοτροφοδοτικού στα 6.45V που θέλουμε. Η παλμοσειρά αυτή οδηγείται στο άγον MOSFET Q1 μέσω του άγοντος τρανζίστορ Q2, και στην έξοδο του μετατροπέα Buck παράγεται η επιθυμητή τάση εξόδου.

Καθώς πρόκειται για σύστημα κλειστού βρόχου, η έξοδος του μετατροπέα Buck, μέσω ενός διαιρέτη τάσης, οδηγείται σε μία αναλογική είσοδο του μικροελεγκτή και ελέγχεται. Ο έλεγχος γίνεται

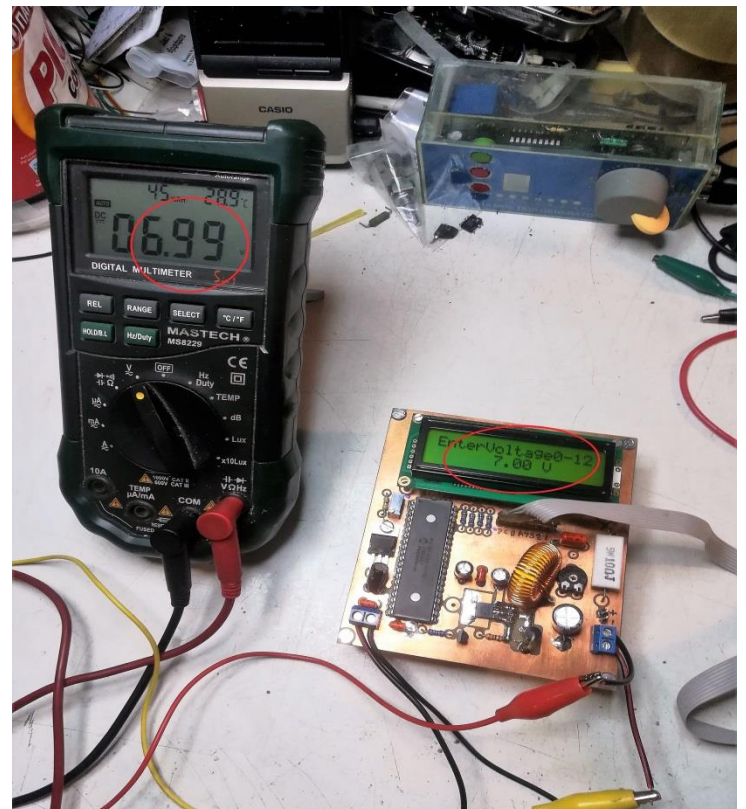
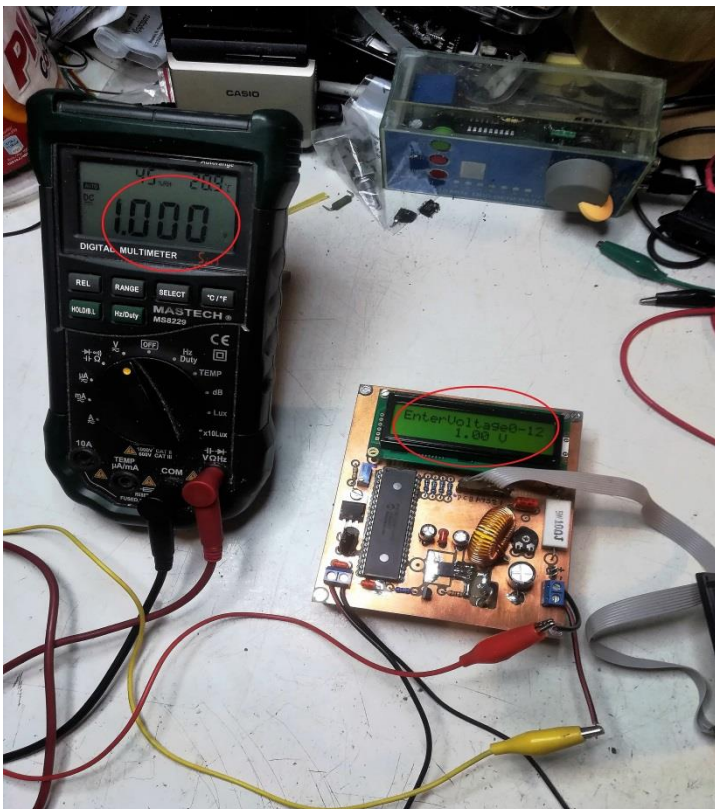
με τη βοήθεια ενός PID ελεγκτή, τα χαρακτηριστικά του οποίου καθορίζονται στον υπάρχοντα κώδικα του μικροελεγκτή, όπως είδαμε. Εάν η τιμή της τάσης εξόδου δεν είναι η σωστή και επιθυμητή, την διορθώνει αλλάζοντας τον κύκλο εργασίας της παλμοσειράς PWM και την σταθεροποιεί.

Παρακάτω, θα δούμε την λειτουργία του πραγματικού κυκλώματος παλμοτροφοδοτικού για επιθυμητές τιμές τάσεις εξόδου τις εξής που εισάγαμε: 1V, 7V και 11V. Όπως βλέπουμε από τα Σχήματα 4.22 και 4.23, διακρίνουμε τα εξής:

- Για εισαγωγή επιθυμητής τάσης εξόδου το 1V, το βολτόμετρο μετράει ακριβώς 1V.
- Για εισαγωγή επιθυμητής τάσης εξόδου τα 7V, το βολτόμετρο μετράει 6.99V.
- Για εισαγωγή επιθυμητής τάσης εξόδου τα 11V, το βολτόμετρο μετράει 10.98V.

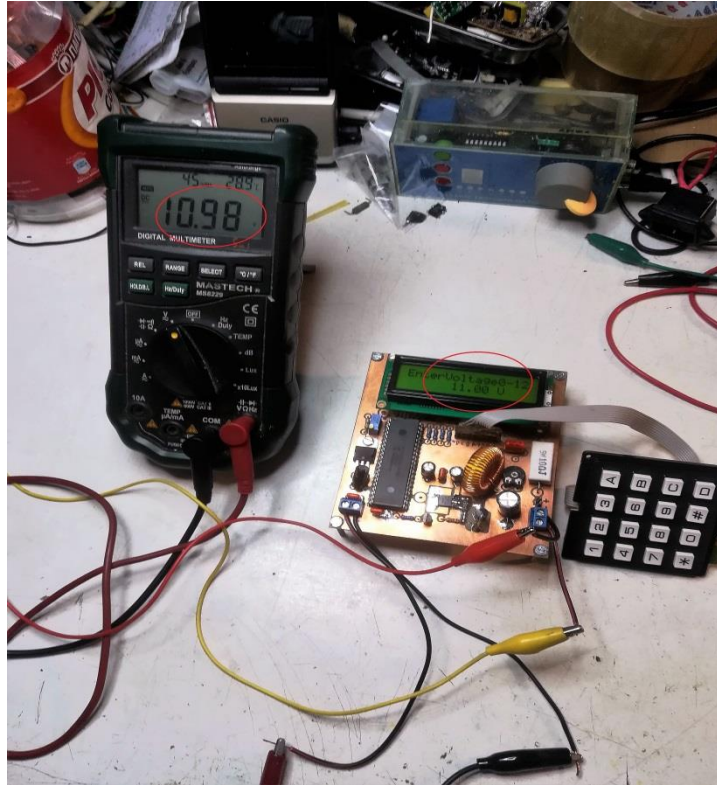
Βλέπουμε πως οι μετρούμενες τιμές τάσης είναι πάρα πολύ κοντά στις επιθυμητές, αν και υπάρχουν πολύ μικρές, αμελητέες αποκλίσεις, της τάξης των mV.

Επίσης, για τις επιθυμητές τιμές της τάσης εξόδου 1V, 1.5V, 3V, 5V, 8V, 11V και 11.5V, θα δούμε πώς μεταβάλλεται κάθε φορά ο κύκλος εργασίας της παλμοσειράς PWM που παράγει ο μικροελεγκτής. Στα Σχήματα 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28, 4.29 και 4.30 στη συνέχεια, φαίνονται, ανά τιμή επιθυμητής τάσης εξόδου, η παλμοσειρά PWM που παράγεται, καθώς και η μετρούμενη, από τον ψηφιακό παλμογράφο, τάση εξόδου του παλμοτροφοδοτικού.

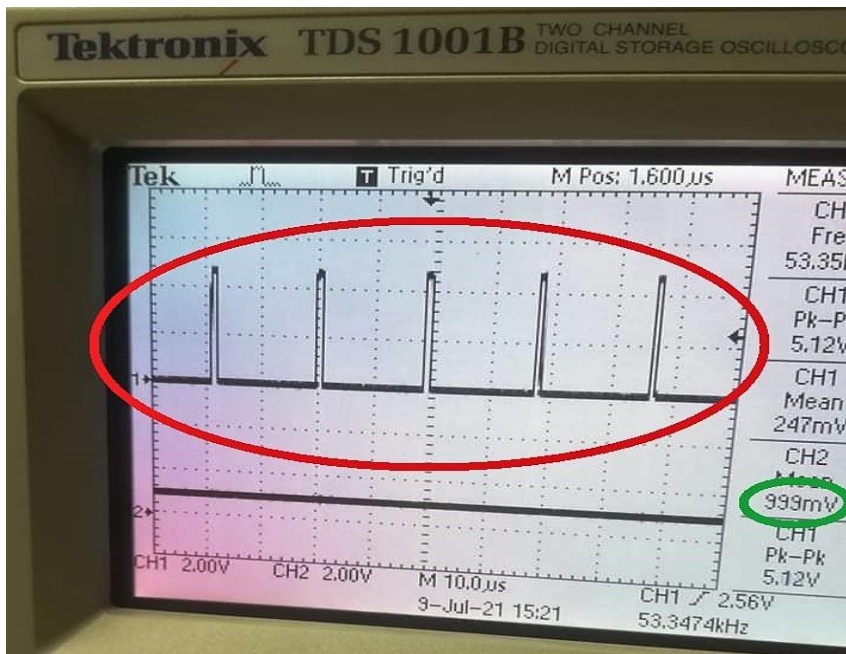


Σχήμα 4.22: Επιθυμητή τάση εξόδου: 1V, Μετρούμενη τάση εξόδου: 1V (αριστερά),

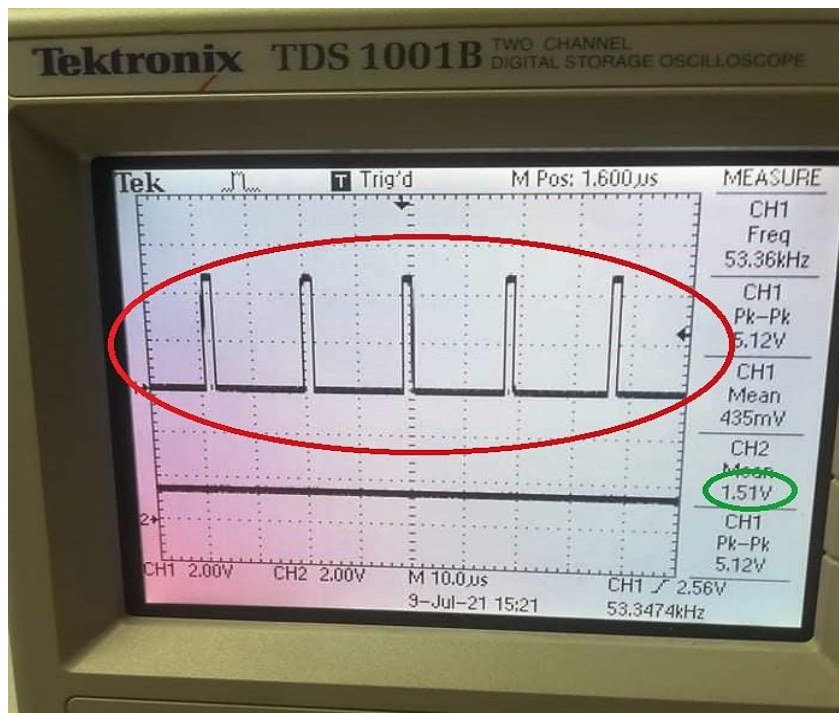
Επιθυμητή τάση εξόδου: 7V, Μετρούμενη τάση εξόδου: 6.99V (δεξιά)



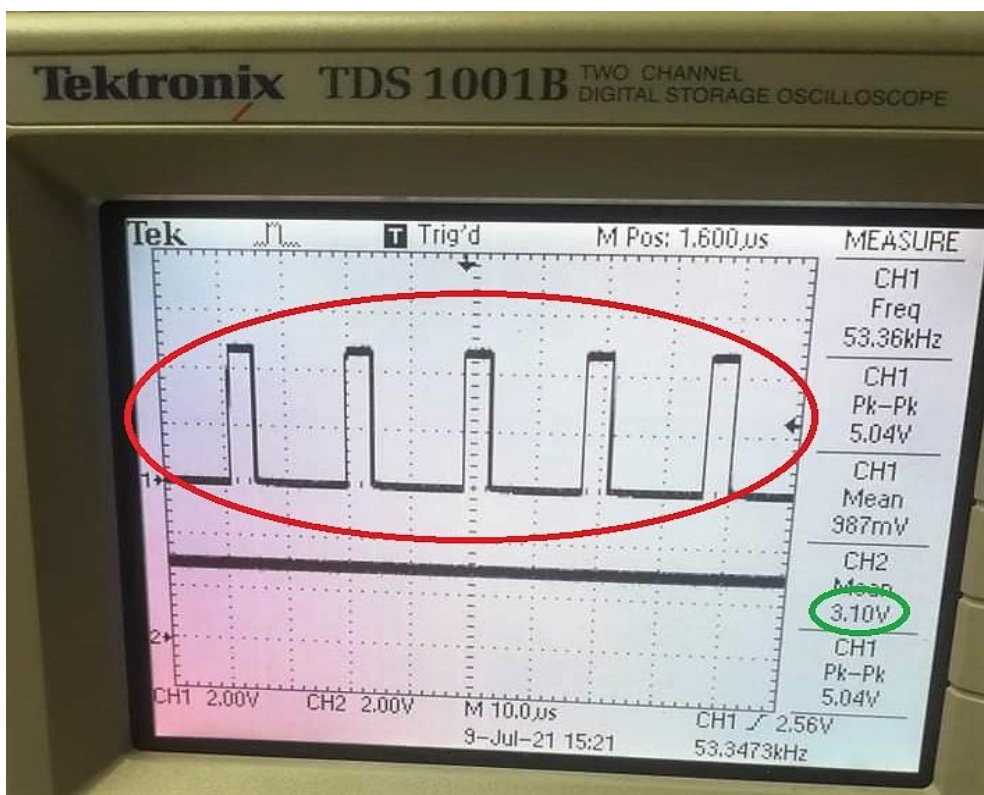
Σχήμα 4.23: Επιθυμητή τάση εξόδου: 11V, Μετρούμενη τάση εξόδου: 10.98V



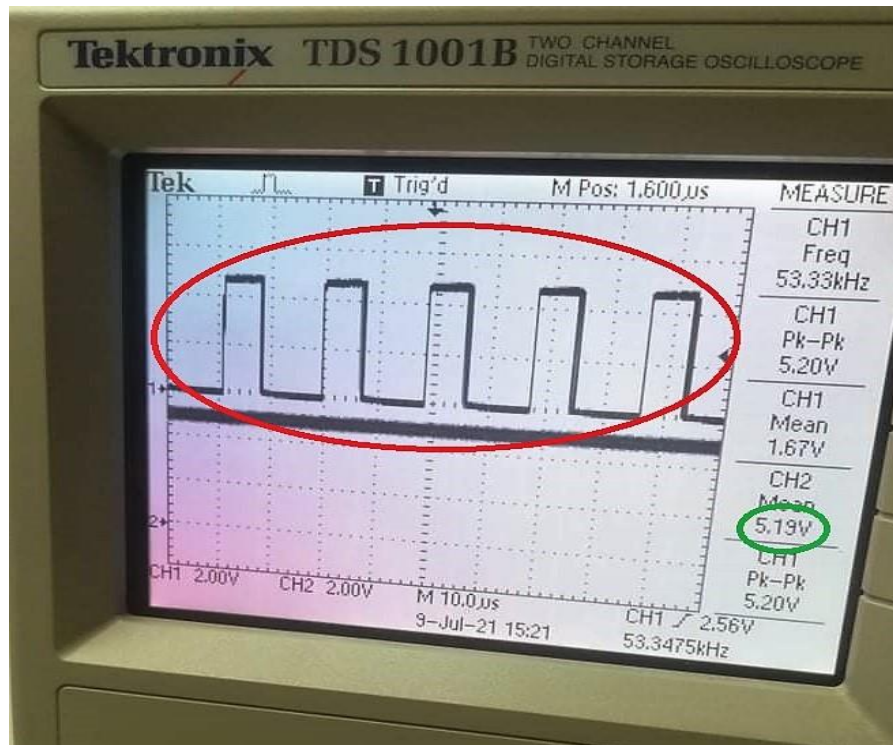
Σχήμα 4.24: Επιθυμητή τάση εξόδου: 1V, Παραγόμενη Παλμοσειρά PWM, Μετρούμενη τάση εξόδου: 999mV



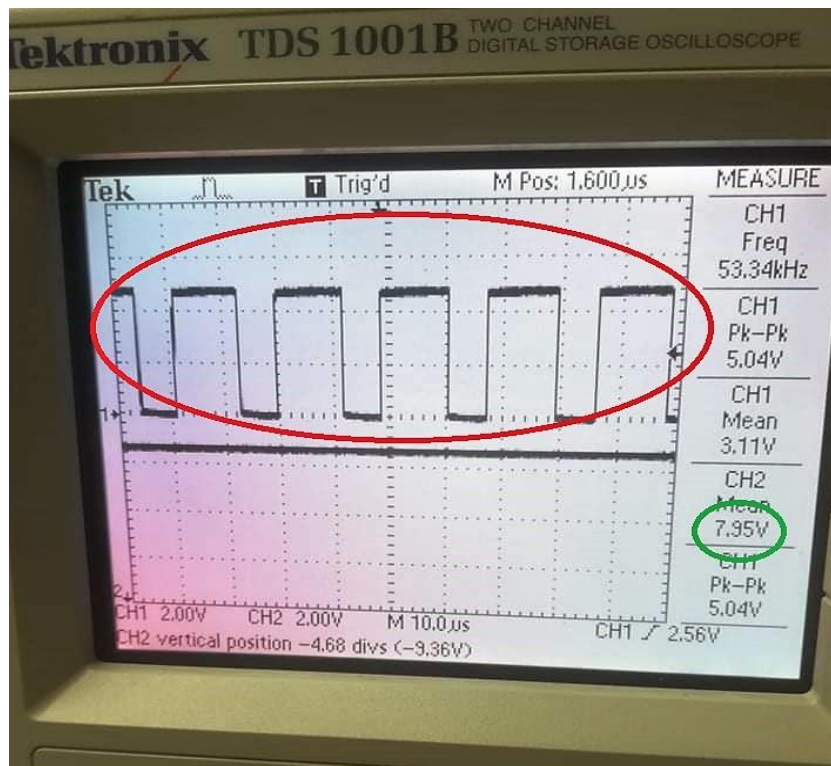
Σχήμα 4.25: Επιθυμητή τάση εξόδου: 1.5V, Παραγόμενη Παλμοσειρά PWM, Μετρούμενη τάση εξόδου: 1.51V



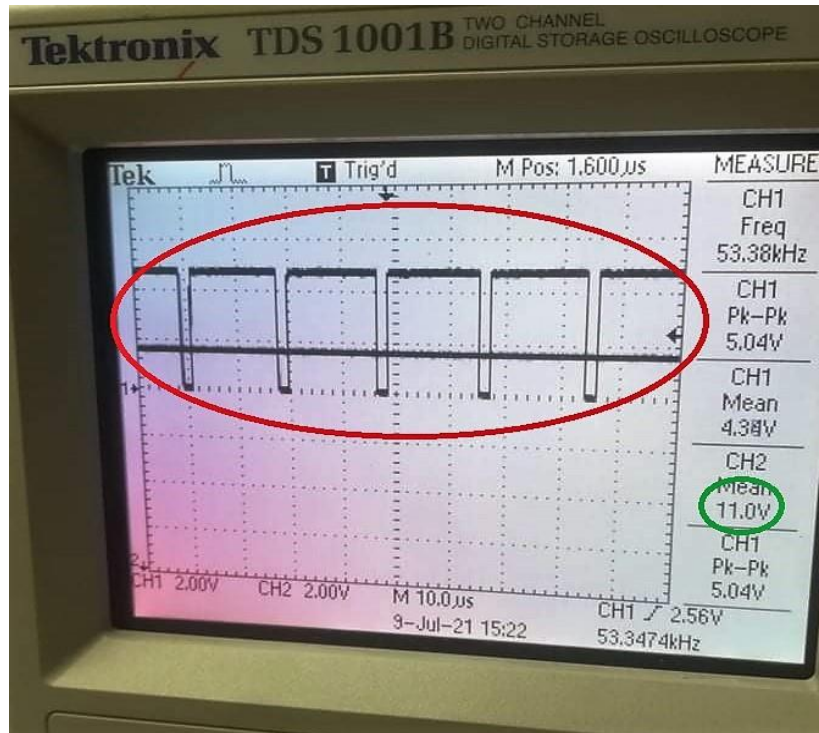
Σχήμα 4.26: Επιθυμητή τάση εξόδου: 3V, Παραγόμενη Παλμοσειρά PWM, Μετρούμενη τάση εξόδου: 3.1V



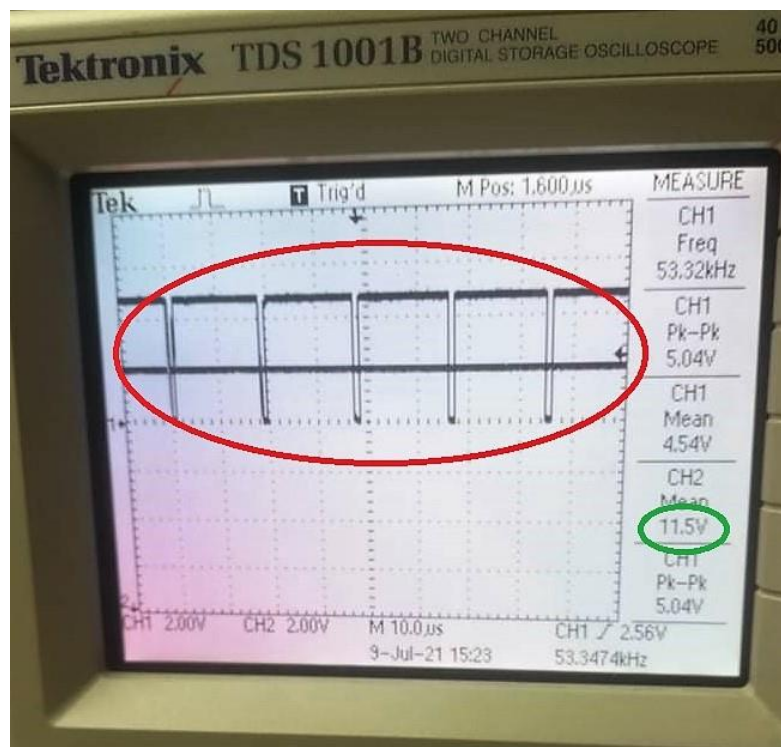
Σχήμα 4.27: Επιθυμητή τάση εξόδου: 5V, Παραγόμενη Παλμοσειρά PWM, Μετρούμενη τάση εξόδου: 5.19V



Σχήμα 4.28: Επιθυμητή τάση εξόδου: 8V, Παραγόμενη Παλμοσειρά PWM, Μετρούμενη τάση εξόδου: 7.95V



Σχήμα 4.29: Επιθυμητή τάση εξόδου: 11V, Παραγόμενη Παλμοσειρά PWM, Μετρούμενη τάση εξόδου: 11V



Σχήμα 4.30: Επιθυμητή τάση εξόδου: 11.5V, Παραγόμενη Παλμοσειρά PWM, Μετρούμενη τάση εξόδου: 11.5V

Παρατηρούμε από το Σχήμα 4.24 έως και το Σχήμα 4.30, τα εξής:

- Για εισαγωγή επιθυμητής τάσης εξόδου το 1V, ο παλμογράφος μετράει 999mV.
- Για εισαγωγή επιθυμητής τάσης εξόδου το 1.5V, ο παλμογράφος μετράει 1.51V.
- Για εισαγωγή επιθυμητής τάσης εξόδου τα 3V, ο παλμογράφος μετράει 3.1V.
- Για εισαγωγή επιθυμητής τάσης εξόδου τα 5V, ο παλμογράφος μετράει 5.19V.
- Για εισαγωγή επιθυμητής τάσης εξόδου τα 8V, ο παλμογράφος μετράει 7.95V.
- Για εισαγωγή επιθυμητής τάσης εξόδου τα 11V, ο παλμογράφος μετράει 11V.
- Για εισαγωγή επιθυμητής τάσης εξόδου τα 11.5V, ο παλμογράφος μετράει 11.5V.

Όπως φαίνεται, οι μετρούμενες τιμές τάσης εξόδου με τον ψηφιακό παλμογράφο είναι, επίσης, πάρα πολύ κοντά στις εισαχθείσες επιθυμητές, αν και σε κάποιες περιπτώσεις υπάρχουν πάρα πολύ μικρές αποκλίσεις, της τάξης των mV.

Με την πραγματοποίηση των μετρήσεων της πραγματικής διάταξης του παλμοτροφοδοτικού, ολοκληρώνεται η παρούσα πτυχιακή εργασία ως προς την θεωρία, μελέτη και εφαρμογή της.

Κεφάλαιο 5^ο: Συμπεράσματα και Βελτιώσεις

Ως επίλογο της εργασίας αυτής, θα μπορούσαμε να παραθέσουμε ορισμένα συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε, καθώς και ενδεχόμενες βελτιώσεις της κατασκευής της.

Είναι πολύ σημαντική η διεξοδική μελέτη του θέματος που πραγματεύεται η εκάστοτε εργασία. Έχοντας ως γνώμονα τις γνώσεις από τα ηλεκτρονικά ισχύος και τους μικροελεγκτές, κατέστη δυνατή η διεκπεραίωση της πτυχιακής εργασίας και με επιτυχία. Μέσω συνεχών προσομοιώσεων, δοκιμών και αλλαγών είτε παραμέτρων είτε ηλεκτρονικών στοιχείων, μπόρεσα να την φέρω εις πέρας και να δημιουργήσω μία τροφοδοτική διάταξη η οποία λειτουργεί όπως ακριβώς την όρισα.

Φυσικά η υλοποίηση επιδέχεται βελτιώσεις. Ορισμένες μπορεί να είναι και οι εξής:

- Υλοποίηση της ίδιας διάταξης με διαφορετικό μικροελεγκτή PIC, για την παρατήρηση της λειτουργίας του όλου συστήματος σε σχέση με τον μικροελεγκτή που ήδη χρησιμοποιήθηκε.
- Υλοποίηση της ίδιας διάταξης χρησιμοποιώντας μικροελεγκτή ανοιχτού κώδικα, γεγονός που καθιστά ευκολότερη την υλοποίηση καθώς και για σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ του PIC και του μικροελεγκτή ανοιχτού κώδικα.
- Τροποποίηση της διάταξης με σκοπό την εφαρμογή των γνώσεων σε άλλον μετατροπέα, π.χ. ανύψωσης τάσης.
- Χρήση τεχνικών για να καταστεί η διάταξη «έξυπνη», π.χ. αποστολή δεδομένων σε κινητό τηλέφωνο, διαδίκτυο.
- Εφαρμογή της όλης διάταξης που υλοποιήθηκε για πιο επαγγελματική χρήση, εφόσον εξασφαλιστούν προϋποθέσεις που αφορούν την ασφαλή χρήση της διάταξης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Internet Site

[3] ELECTRICALFUNDABLOG.COM, ELECTRICAL & ELECTRONICS ENCYCLOPEDIA, “Pulse Width Modulation (PWM) – Generation, Applications and Advantages” [Online]. Available: <https://electricalfundablog.com/pulse-width-modulation/>

[6] ΒΙΚΙΠΑΙΔΕΙΑ, Η ελεύθερη εγκυκλοπαίδεια, «Μικροελεγκτής», [Διαδικτυακή]. Διαθέσιμη: <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CE%B9%CE%BA%CF%81%CE%BF%CE%B5%CE%BB%CE%B5%CE%B3%CE%BA%CF%84%CE%AE%CF%82>

[8] TurboFuture, “What Is a Microcontroller? — Programming an Arduino Board” [Online]. Available: <https://turbofuture.com/computers/What-is-an-Arduino-Programming-Microcontrollers>

[9] Electronics Hub, “PIC Microcontroller and Its Architecture”, [Online]. Available: <https://www.electronicshub.org/pic-microcontroller-architecture/>

Paper

[2] Αυγούστης Ανδρέας, *ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ OFF-LINE ΠΑΛΜΟΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟΥ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ FLYBACK*, ΑΤΕΙΘ, Τμήμα Ηλεκτρονικής, Θεσσαλονίκη, 2010.

[7] Μιχαήλ – Άγγελος Τριανταφύλλης, *ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΥΤΟ-ΡΥΘΜΙΖΟΜΕΝΩΝ PID ΕΛΕΓΚΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ LABVIEW*, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πάτρα, 2018.

Βιβλία

[1] Ιορδάνης Ν. Κιοσκερίδης, *ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ*, 2^η Έκδοση, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 2019.

[4] Φωτιάδης Α. Δημήτρης, *ΜΙΚΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΕΣ, ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΕΣ, ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΕΣ 8051*, 1^η Έκδοση, Θεσσαλονίκη, 2010.

[5] Σταμάτης Αλατσαθανός, *Εισαγωγή στους ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΕΣ PICmicro*, 1^η Έκδοση, Έκδοση Σταμάτης Αλατσαθανός, Αθήνα, 2007.

Data Sheet

[10] MICROCHIP, “PIC18F2455/2550/4455/4550 Data Sheet”, 2006 Microchip Technology Inc, October 2005. Available: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39632c.pdf>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΚΩΔΙΚΑΣ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ

```
#include <main.h> //Περιλαμβάνει στο κύριο πρόγραμμα το εξωτερικό πρόγραμμα main.h.  
#include <keypad.h> //Χρήση της ρουτίνας ανάγνωσης από το πληκτρολόγιο keypad.  
#include <flex_lcd.h> //Χρήση της ρουτίνας flex_lcd για εμφάνιση στην οθόνη LCD.  
#include <math.h>  
#include <stdlib.h>
```

```
//STANDARD ΕΙΣΟΔΟΙ ΚΑΙ ΕΞΟΔΟΙ.
```

```
#use standard_io ( A )  
#use standard_io ( B )  
#use standard_io ( C )
```

```
//ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΘΥΡΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΘΕΣΗ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΜΝΗΜΗ.
```

```
#byte PORTA = 0xF80  
#byte PORTB = 0xF81  
#byte PORTC = 0xF82  
#byte PORTD = 0xF83  
#byte PORTE = 0xF84
```

```
//ΔΗΛΩΣΕΙΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ.
```

```
char k = 68;  
char st = 1;  
float32 voltage = 0.0;  
float32 voltage_sel = 4.0;  
float32 df = 0.0;  
float32 ni = 1.0;  
int16 control;  
int1 flag_entry = 0;  
int32 counter = 0.0;  
float yM=0, e=0.0, e_1=0.0, e_2=0.0, u=0.0, u_1=0.0, T=3.0;  
float kp, ti, td, q0, q1, q2;  
float kw=0.8, tao=1;  
float TsMA, Wn, P1, P2;
```

```
//ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ.
```

```
void init (void);  
void input_nub(void);  
void PID(void);
```

//ΚΥΡΙΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ.

```
void main(){

    init();
    lcd_init(); //Συνάρτηση που υπάρχει στην flex_lcd.h.
    kbd_init();
    lcd_gotoxy(1,1); //Η οθόνη προετοιμάζεται να γράψει στην πρώτη θέση της πρώτης
                    // γραμμής .
    lcd_putc("MICRO BUCK CONVE" ); //Γράφει MICRO BUCK CONVE.
    delay_ms(1000); //Χρονοκαθυστέρηση ενός (1) δευτερολέπτου.
    lcd_gotoxy(1,1);
    lcd_putc(" Enter Voltage " ); //Γράφει Enter Voltage.
    lcd_gotoxy(1,2); //Η οθόνη προετοιμάζεται να γράψει στην πρώτη θέση της δεύτερης
                    // γραμμής .
    lcd_putc("D = . # = Enter" ); //Γράφει D = . # = Enter.
    delay_ms(2000); //Χρονοκαθυστέρηση δύο(2) δευτερολέπτων.
    lcd_gotoxy(1,2);
    lcd_putc("          " );
    lcd_gotoxy(1,2);
    TsMA = 5*tao; //Ορισμός του επιθυμητού χρόνου αποκατάστασης, δηλαδή της
                //σταθεροποίησης της τάσης, στον κλειστό βρόχο.
    Wn = 3/(TsMA); //Φυσική συχνότητα συστήματος.

    //ΕΚΧΩΡΗΣΗ ΔΥΟ (2) ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΩΝ ΠΟΛΩΝ.
    P1 = Wn+Wn;
    P2 = Wn*Wn;
    Kp = (P1*tao-1)/kw; //Υπολογισμός της παραμέτρου Kp.
    ti = (k*kp)/(P2*tao); //Υπολογισμός της παραμέτρου ti.
    q0 = kp*(1+T/(2*ti)+td/T);
    q1 = -kp*(1-T/(2*ti)+(2*td)/T);
    q2 = (kp*td)/T;

    while(1){ //ΒΡΟΧΟΣ ΠΟΥ ΕΚΤΕΛΕΙΤΑΙ ΣΥΝΕΧΩΣ.
        if (flag_entry == 1){
            lcd_gotoxy(1,2);
            printf(lcd_putc,"  %4.2f V ",voltage);
            voltage_sel = voltage;
            flag_entry = 0;
            voltage = 0;
            lcd_gotoxy(1,2);
        }
        yM = (float32)((read_adc()*12.0/1023.0);
        PID();
    }
}
```

```

        input_nub();
        delay_ms(5);
    }
}

```

//ΡΟΥΤΙΝΑ ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ.

```

void init (void){
    set_tris_d(0x00); //Καθορισμός της πόρτας D ως είσοδο.
    set_tris_c(0x00); //Καθορισμός της πόρτας C ως είσοδο.
    set_tris_e(0x00); //Καθορισμός της πόρτας E ως είσοδο.
    counter = 0;
    PORTC = 0; //Αρχικοποίηση της πόρτας C να έχει τιμή 0.
    PORTD = 0; //Αρχικοποίηση της πόρτας D να έχει τιμή 0.
    PORTE = 0; //Αρχικοποίηση της πόρτας E να έχει τιμή 0.
    setup_timer_2(T2_DIV_BY_1,224,1); // Ορισμός της συχνότητας της βαθμίδας
        //PWM στα 50kHz.
    setup_ccp2(CCP_PWM); //Διαμόρφωση του CCP2 σε λειτουργία PWM.
    set_pwm2_duty(80); //Εξ' ορισμού κύκλος λειτουργίας = 10%.

    setup_adc_ports( AN0 | VSS_VDD ); //ADC REF SET UP.
    setup_adc ( ADC_CLOCK_INTERNAL ); //ADC CLOCK SOURCE SELECT.
    set_adc_channel ( 0 ); //ADC CHANNEL SELECT.

}

```

```

void input_nub(void){ //ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΛΗΚΤΡΟΛΟΓΙΟΥ (ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΑΣΗΣ).
    switch(st){
        case 1:
            k = kbd_getc();
            while (k!=0){
                if ((k>=48) && (k<=59)) { //Ακέραιο μέρος.
                    voltage = 10.0 * Voltage + ( k - 48);
                    printf(lcd_putc,"%01c",k);
                    st = 1;
                }
                if (k == 68) { // D
                    lcd_putc(".");
                    st = 2;
                }
                if (k == 35){
                    st = 3;
                }
            }
    }
}

```

```

        break;
    }
    break;
case 2:
    k = kbd_getc();
    while (k!=0){
        if ((k>=48) && (k<=57)){ //Δεκαδικό μέρος.
            df = POW(10.0,-ni);
            voltage = voltage + ((k-
48) * df);

printf(lcd_putc,"%01c",k);

            ni=ni+1.0;
            st = 2;
        }

        if (k == 35){
            st = 3;
        }

        break;
    }

    break;
case 3:
    ni = 1.0;
    flag_entry = 1;
    st = 1;
    break;
}
}

```

```

void PID(void){ //ΕΝΑΡΞΗ ΤΟΥ PID ΕΛΕΓΧΟΥ.
    float tp;
    tp= yM;
    e=4*(voltage_sel-tp);
    u = u_1 + q0*e + q1*e_1 + q2*e_2; //Διακριτός PID ελεγκτής.
    if (u >= 12.0) //Ορισμός ορίων στην επιλογή τιμής τάσης εξόδου.
        u = 12.0;
    if (u <= 0.0)
        u = 0.0;
    control = u*899/12;

    //Επιστροφή στις πραγματικές τιμές.
    e_2 = e_1;
    e_1 = e;
}

```

```
u_1 = u;
```

```
//Μετατροπή των υπολογισμών σε παλμοσειρά PWM.  
set_pwm2_duty(control);  
}
```

```
/*
```

Η συχνότητα του PWM δίδεται από την σχέση

$$F_{pwm} = \frac{\frac{F_{clock}}{4}}{prescale\ TMR2 * (preload\ PR2\ value + 1)} \rightarrow$$

$$\rightarrow PR2 = \left(\frac{F_{clock}}{F_{pwm} * 4 * prescale\ TMR2} \right) - 1 \rightarrow$$

$$\rightarrow PR2 = (48 * 1000000 / (50000 * 4 * 1)) - 1 = 224$$

Η μέγιστη τιμή του DC που πρέπει να φορτωθεί στην συνάρτηση δίδεται ως εξής:

$$DC_{max} = ((preload\ PR2\ value + 1) * 4) - 1 = ((224 + 1) * 4) - 1 = 899$$

*Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε DC = 100%. Άρα η τιμή με την οποία θα πρέπει να αυξάνεται ή να μειώνεται, θα είναι $600 * (\frac{5}{100}) = 30$.*

```
*/
```

```
//Τέλος προγράμματος.
```

```
//ΚΩΔΙΚΑΣ ΤΟΥ ΟΔΗΓΟΥ(DRIVER) flex_lcd.Η ΤΗΣ ΟΘΟΝΗΣ LCD.Δεν χρειάζεται να γραφεί,  
καθώς τον περιλάβαμε με την include <flex_lcd.h>.
```

```
#define LCD_DB4 PIN_D4
```

```
#define LCD_DB5 PIN_D5
```

```
#define LCD_DB6 PIN_D6
```

```
#define LCD_DB7 PIN_D7
```

```
#define LCD_E PIN_D3
```

```
#define LCD_RS PIN_D2
```

```
#define LCD_RW PIN_D1
```

```
#define lcd_type 2 //0=5x7, 1=5x10, 2=2 lines.
```

```
#define lcd_line_two 0x40 //LCD RAM address for the 2nd line.
```

```
int8 const LCD_INIT_STRING[4] =  
{  
  0x20 | (lcd_type << 2), //Func set: 4-bit, 2 lines, 5x8 dots.  
  0xc,                    //Display on.  
  1,                      //Clear display.  
  6                       //Increment cursor.  
};
```

```
void lcd_send_nibble(int8 nibble);  
void lcd_send_byte(int8 address, int8 n);  
void lcd_init(void);  
void lcd_gotoxy(int8 x, int8 y);  
void lcd_putc(char c);
```

```
void lcd_send_nibble(int8 nibble)  
{ //Converts an integer expression to a boolean (1 or 0).
```

```
  output_bit(LCD_DB4, !(nibble & 1));  
  output_bit(LCD_DB5, !(nibble & 2));  
  output_bit(LCD_DB6, !(nibble & 4));  
  output_bit(LCD_DB7, !(nibble & 8));  
  delay_cycles(20);  
  output_high(LCD_E);  
  delay_us(50);  
  output_low(LCD_E);
```

```
}
```

```
void lcd_send_byte(int8 address, int8 n)
```

```
{  
  
  output_low(LCD_RS);  
  if(address)  
    output_high(LCD_RS);  
  else  
    output_low(LCD_RS);  
  delay_cycles(10);  
  output_low(LCD_E);  
  lcd_send_nibble(n >> 4);  
  lcd_send_nibble(n & 0xf);
```

```
}
```

```
void lcd_init(void)
```

```
{
```

```
    int8 i;
```

```
    output_low(LCD_RS);
```

```
    output_low(LCD_E);
```

```
    delay_ms(200);
```

```
    for(i=0 ;i < 3; i++){
```

```
        lcd_send_nibble(0x03);
```

```
        delay_ms(10);
```

```
    }
```

```
    lcd_send_nibble(0x02);
```

```
    for(i=0; i < sizeof(LCD_INIT_STRING); i++){
```

```
        lcd_send_byte(0, LCD_INIT_STRING[i]);
```

```
        delay_ms(10);
```

```
    }
```

```
}
```

```
void lcd_gotoxy(int8 x, int8 y)
```

```
{
```

```
    int8 address;
```

```
    if(y != 1)
```

```
        address = lcd_line_two;
```

```
    else
```

```
        address=0;
```

```
    address += x-1;
```

```
    lcd_send_byte(0, 0x80 | address);
```

```
}
```

```
void lcd_putc(char c)
```

```
{
```

```
    switch(c){
```

```
        case '\f':
```

```
            lcd_send_byte(0,1);
```

```
            delay_ms(4);
```

```
            break;
```

```

        case '\n':
            lcd_gotoxy(1,2);
            break;
        case '\b':
            lcd_send_byte(0,0x10);
            break;
        default:
            lcd_send_byte(1,c);
            break;
    }
}

```

//ΤΕΛΟΣ ΠΟΥΤΙΝΑΣ flex_lcd.

//ΚΩΔΙΚΑΣ ΤΗΣ ΠΟΥΤΙΝΑΣ keypad.h.

//ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΟΥ ΠΛΗΚΤΡΟΛΟΓΙΟΥ.

```

#define row0 PIN_B4
#define row1 PIN_B5
#define row2 PIN_B6
#define row3 PIN_B7
#define col0 PIN_B0
#define col1 PIN_B1
#define col2 PIN_B2
#define col3 PIN_B3

```

// ΔΗΛΩΣΕΙΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ.

```

char const KEYS[4][4] =
{
    {'1','2','3','A'}, {'4','5','6','B'}, {'7','8','9','C'}, {'*','0','#','D'}
};

```

```

#define KBD_DEBOUNCE_FACTOR 100

```

//ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ.

```

short int ALL_ROWS (void);
void kbd_init(void);
char kbd_getc(void);

```

```

void kbd_init(void)
{

    set_tris_b(0xF0);
    output_b(0x0F);

}

short int ALL_ROWS (void)
{

    if(input (row0) & input (row1) & input (row2) & input (row3))
        return (0);
    else
        return (1);

}

char kbd_getc(void)
{

    static byte kbd_call_count;
    static short int kbd_down;
    static char last_key;
    static byte col;
    byte kchar;
    byte row;
    kchar='\0';
    if(++kbd_call_count>KBD_DEBOUNCE_FACTOR){
        switch (col){
            case 0:
                output_low(col0);
                output_high(col1);
                output_high(col2);
                output_high(col3);
                break;
            case 1:
                output_high(col0);
                output_low(col1);
                output_high(col2);
                output_high(col3);
                break;
            case 2:
                output_high(col0);
                output_high(col1);

```

```

        output_low(col2);
        output_high(col3);
        break;
    case 3:
        output_high(col0);
        output_high(col1);
        output_high(col2);
        output_low(col3);
        break;
    }

if(kbd_down){
    if(!ALL_ROWS()){
        kbd_down=false;
        kchar=last_key;
        last_key='\0';
    }
}
else{
    if(ALL_ROWS()){
        if(!input (row0))
            row=0;
        else if(!input (row1))
            row=1;
        else if(!input (row2))
            row=2;
        else if(!input (row3))
            row=3;
        last_key =KEYS[row][col];
        kbd_down = true;
    }
    else{
        ++col;
        if(col==4)
            col=0;
    }
}
kbd_call_count=0;
}
return(kchar);
}

```

//ΤΕΛΟΣ ΡΟΥΤΙΝΑΣ keypad.h.