

ΑΛΕΞΑΝΔΡΕΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ



**Πτυχιακή Εργασία**

Μοντελοποίηση και Εξομοίωση Μετατροπέα από DC σε DC

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ**  
ΓΡΗΓΟΡΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**  
ΗΛΙΟΥΔΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματεύεται τους μετατροπείς από DC σε DC και συγκεκριμένα την περίπτωση του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης. Οι διατάξεις αυτές χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές και σε συστήματα μικρής και μεγάλης ισχύος. Αρχικά γίνεται μια σύντομη περιγραφή του κύκλου λειτουργίας του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης. Κατόπιν αναπτύσσονται προσομοιώσεις ενός μετατροπέα σε δυο διαφορετικά λογισμικά. Η πρώτη προσομοίωση γίνεται στο πρόγραμμα PSIM και εξάγονται κάποια συμπεράσματα σχετικά με τη διακοπτική συχνότητα λειτουργίας του μετατροπέα καθώς και την ποιότητα της τάσης εξόδου του. Για τη δεύτερη προσομοίωση χρησιμοποιείται το Matlab-Simulink όπου κρίνεται αναγκαία η ύπαρξη ελεγκτή PI για την εξασφάλιση της επιθυμητής τάσης στην έξοδο του μετατροπέα. Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται η κατασκευή του κυκλώματος που προσομοιώθηκε και επιλέγεται το μοντέλο μικροελεγκτή που θα αναλάβει τον έλεγχο της διάταξης αλλά και μια μπαταρία που θα αποτελεί το φορτίο και θα φορτίζει από τη διάταξη. Παρουσιάζονται το λογικό διάγραμμα του κώδικα του μικροελεγκτή καθώς τα αποτελέσματα του ελέγχου του κώδικα με χρήση λογικού αναλυτή. Από τα τελευταία εξάγονται κάποια γραφήματα σχετικά με το χρόνο αγωγής του μετατροπέα συναρτήσει της τάσης της μπαταρίας. Σε αυτά τα γραφήματα γίνεται αντιληπτό και κάποιο τέχνασμα που προστέθηκε στον κώδικα για ταχύρυθμη φόρτιση. Επίσης αναφέρονται κάποιες πληροφορίες σχετικά με τους συσσωρευτές. Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του παλμογράφου από τη λειτουργία του μετατροπέα καθώς και κάποια συμπεράσματα σχετικά με την εργασία συνολικά. Τέλος προτείνονται κάποιες διορθώσεις και προσθήκες οι οποίες θα μπορούσαν να γίνουν.

<b>1</b>	<b>Περιεχόμενα</b>	
1.1	Σχήματα .....	4
1.2	Πίνακες.....	5
<b>2</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>6</b>
2.1	DC-DC Μετατροπέας.....	6
2.2	Κατηγορίες DC-DC Μετατροπέων .....	6
2.3	DC-DC Μετατροπέας Ανύψωσης Τάσης(Boost Converter) .....	7
2.4	DC-DC Μετατροπέας Υποβιβασμού-Ανύψωσης Τάσης (Buck/Boost Converter) .....	7
2.5	DC-DC Μετατροπέας Υποβιβασμού Τάσης (Buck Converter) .....	7
2.6	Περιγραφή Κύκλου Λειτουργίας Buck Converter.....	9
2.7	Έλεγχος Τάσης Εξόδου.....	11
<b>3</b>	<b>ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ.....</b>	<b>13</b>
3.1	Μοντελοποίηση σε PSIM.....	13
3.1.1	Διαμόρφωση με PWM.....	14
3.1.2	Αποτελέσματα σε Χαμηλή Συχνότητα Λειτουργίας.....	14
3.1.3	Αποτελέσματα σε Υψηλή Συχνότητα Λειτουργίας .....	18
3.1.4	Διακοπτική Συχνότητα.....	22
3.2	Μοντελοποίηση σε Matlab-Simulink.....	22
3.2.1	Ανοιχτός βρόχος-Open loop .....	22
3.2.2	Κλειστός βρόχος-Closed loop.....	24
<b>4</b>	<b>DC-DC ΜΕΤΡΟΠΕΑΣ ΓΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ .....</b>	<b>26</b>
4.1	Μικροελεγκτής .....	26
4.2	Timer/Counter 2 .....	26
4.2.1	Καταχωρητής TCCR2A.....	27
4.2.2	Καταχωρητής TCCR2B.....	27
4.2.3	Καταχωρητής OCR2A.....	28
4.3	Διαιρέτης Τάσης .....	28
4.4	Πρόγραμμα .....	29
4.5	Διόρθωση Τάσης.....	29
4.6	Έλεγχος Προγράμματος με Χρήση Λογικού Αναλυτή.....	33
4.6.1	Χαμηλή Συχνότητα Λειτουργίας.....	33
4.6.2	Υψηλή Συχνότητα Λειτουργίας .....	35
4.7	Συσσωρευτές.....	37

4.7.1	Φόρτιση Συσσωρευτών.....	37
4.7.2	Επιλογή Συσσωρευτή .....	38
5	ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ DC-DC ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ .....	39
5.1	Αποτελέσματα .....	39
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	42
7	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΘΗΚΕΣ .....	43
8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	44

## 1.1 Σχήματα

<b>Σχήμα 1:</b>	Μετατροπέας Boost.....	7
<b>Σχήμα 2:</b>	Μετατροπέας Buck/Boost.....	7
<b>Σχήμα 3:</b>	Τυπικό κύκλωμα buck converter (Πολίτης, 2000).....	8
<b>Σχήμα 4:</b>	Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων του μετατροπέα (Γεώργιος Πολίτης, 2000).....	9
<b>Σχήμα 5:</b>	Τρανζίστορ σε κατάσταση ON (Τσιούρβα, 2013).....	10
<b>Σχήμα 6:</b>	Τρανζίστορ σε κατάσταση OFF (Τσιούρβα, 2013) .....	10
<b>Σχήμα 7:</b>	Κυματομορφές τάσης και ρεύματος πηνίου (Forsyth, Mollov, 1998) .....	11
<b>Σχήμα 8:</b>	Κυματομορφή τάσης διακόπτη (Τσιούρβα, 2013) .....	12
<b>Σχήμα 9:</b>	Κυματομορφή τάσης εξόδου (Τσιούρβα, 2013).....	12
<b>Σχήμα 10:</b>	Κύκλωμα προσομοίωσης .....	13
<b>Σχήμα 11:</b>	Κυματομορφές τάσης εξόδου και ρεύματος εξόδου, $f=243.9$ Hz .....	14
<b>Σχήμα 12:</b>	Κυματομορφές τάσης εξόδου και ρεύματος εξόδου, $f=976.56225$ Hz.....	15
<b>Σχήμα 13:</b>	Κυματομορφές τάσης εξόδου και ρεύματος εξόδου, $f=1953.125$ Hz .....	15
<b>Σχήμα 14:</b>	Κυματομορφές τάσης εξόδου και ρεύματος εξόδου, $f=7812.5$ Hz .....	16
<b>Σχήμα 15:</b>	Κυματομορφή τάσης πηνίου, $f=976.5625$ Hz.....	16
<b>Σχήμα 16:</b>	Κυματομορφές παλμού κυκλώματος ελέγχου και ρεύματος εισόδου, $f=243.9$ Hz.....	17
<b>Σχήμα 17:</b>	$I_{out.average}$ -Duty Cycle, $f=243.9$ Hz .....	17
<b>Σχήμα 18:</b>	$V_{out.average}$ -Duty Cycle, $f=243.9$ Hz.....	18
<b>Σχήμα 19:</b>	$P_{out}$ -Duty Cycle, $f=243.9$ Hz .....	18
<b>Σχήμα 20:</b>	Κυματομορφές τάσης εξόδου και ρεύματος εξόδου, $f=62.5$ kHz.....	19
<b>Σχήμα 21:</b>	Κυματομορφή παλμού κυκλώματος ελέγχου, $f=62.5$ kHz.....	19
<b>Σχήμα 22:</b>	$I_{out.average}$ -Duty Cycle, $f=62.5$ kHz .....	20
<b>Σχήμα 23:</b>	$V_{out.average}$ -Duty Cycle, $f=62.5$ kHz.....	20
<b>Σχήμα 24:</b>	$P_{out}$ -Duty Cycle, $f=62.5$ kHz.....	21
<b>Σχήμα 25:</b>	Κυματομορφές τάσης εξόδου και ρεύματος εξόδου, $f=62.5$ kHz, $V_B=5.9$ V .....	21
<b>Σχήμα 26:</b>	Κυματομορφή παλμού κυκλώματος ελέγχου, $f=62.5$ kHz, $V_B=5.9$ V .....	22
<b>Σχήμα 27:</b>	Κύκλωμα ανοιχτού βρόγχου .....	23

<b>Σχήμα 28:</b> Κυματομορφή ρεύματος εξόδου, $f=62.5$ kHz.....	23
<b>Σχήμα 29:</b> Κυματομορφή τάσης εξόδου, $f=62.5$ kHz.....	24
<b>Σχήμα 30:</b> Κύκλωμα κλειστού βρόγχου.....	24
<b>Σχήμα 31:</b> Κυματομορφή τάσης εξόδου, $f=100$ kHz.....	25
<b>Σχήμα 32:</b> Έξοδος ελεγκτή PI.....	25
<b>Σχήμα 33:</b> PWM, $f=100$ kHz.....	25
<b>Σχήμα 34:</b> Fast PWM mode,διάγραμμα χρονισμού (Atmel, 2015).....	26
<b>Σχήμα 35:</b> Καταχωρητής TCCR2A (Atmel, 2015).....	27
<b>Σχήμα 36:</b> Bits 7:6 - COM2A1:2 (Atmel, 2015).....	27
<b>Σχήμα 37:</b> Bits 1:0 – WMG21:20 (Atmel, 2015).....	27
<b>Σχήμα 38:</b> Καταχωρητής TCCR2B (Atmel, 2015).....	28
<b>Σχήμα 39:</b> Bits 2:0 – CS22:20 (Atmel, 2015).....	28
<b>Σχήμα 40:</b> Διαίρετης τάσης.....	29
<b>Σχήμα 41:</b> Διάγραμμα ροής.....	32
<b>Σχήμα 42:</b> $T_{on}(ms)$ -Battery(V), $f=243.9$ Hz.....	34
<b>Σχήμα 43:</b> Κανάλι λογικού αναλυτή, $V=1.85$ V, $f=243.9$ Hz.....	34
<b>Σχήμα 44:</b> Κανάλι λογικού αναλυτή, $V=4.14$ V, $f=243.9$ Hz.....	35
<b>Σχήμα 45:</b> $T_{on}(ms)$ -Battery(V), $f=62.5$ kHz.....	36
<b>Σχήμα 46:</b> Κανάλι λογικού αναλυτή, $V=1.85$ V, $f=243.9$ Hz.....	36
<b>Σχήμα 47:</b> Κανάλι λογικού αναλυτή, $V=5.34$ V, $f=243.9$ Hz.....	37
<b>Σχήμα 48:</b> PWM, $f=62.5$ kHz.....	39
<b>Σχήμα 49:</b> PWM-τάση μπαταρίας, $f=7812.5$ Hz.....	39
<b>Σχήμα 50:</b> Λεπτομέρεια αύξησης τάσης, $f=7812.5$ Hz.....	40
<b>Σχήμα 51:</b> Διόρθωση παλμού.....	40
<b>Σχήμα 52:</b> Σύστημα εργασίας.....	41

## 1.2 Πίνακες

<b>Πίνακας 1:</b> Αντιστοιχίας ψηφιακών-αναλογικών τιμών και σύγκριση διορθωμένων τιμών.....	33
<b>Πίνακας 2:</b> Αντιστοιχία τάσης μπαταρίας-χρόνου αγωγής στη χαμηλή συχνότητα λειτουργίας.....	34
<b>Πίνακας 3:</b> Αντιστοιχία τάσης μπαταρίας-χρόνου αγωγής στη χαμηλή συχνότητα λειτουργίας.....	35

## 2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 2.1 DC-DC Μετατροπείας

Σε πολλές τεχνολογικές εφαρμογές απαιτείται να μετατραπεί μια σταθερή τάση πηγής συνεχούς ρεύματος σε μια μικρότερη ή μεγαλύτερη τάση πηγής συνεχούς ρεύματος. Ένας μετατροπείας δύναται να υποβιβάζει την τάση, να την ανυψώνει ή να υλοποιεί και τις δύο λειτουργίες. Ο μετατροπείας συνεχούς ρεύματος αποτελεί το ισοδύναμο ενός μετασχηματιστή εναλλασσόμενου ρεύματος μιας και το συνεχές δε μπορεί να μεταβληθεί με χρήση μετασχηματιστή. Όπως και σε ένα μετασχηματιστή έτσι και στο μετατροπείας συνεχούς ρεύματος η ισχύς εξόδου προέρχεται από την είσοδο και δεν έχουμε παραγωγή ενέργειας στο εσωτερικό του μετατροπείας. Η ροή ισχύος του μετατροπείας περιγράφεται λοιπόν από την ακόλουθη εξίσωση:

$$P_{\text{εισ}} = P_{\text{εξ}} + P_{\text{ραπ}}$$

Όπου:

$P_{\text{εισ}}$  είναι η ισχύς τροφοδοσίας του μετατροπείας

$P_{\text{εξ}}$  είναι η ισχύς εξόδου

$P_{\text{ραπ}}$  είναι η ισχύς που καταναλώνεται από τα στοιχεία του μετατροπείας ώστε να υποβιβασθεί ή ανυψωθεί η τάση εισόδου

Κεντρικό ρόλο στη λειτουργία των DC-DC μετατροπέων παίζουν τα τρανζίστορ ισχύος π.χ. power MOSFET μιας και αυτά ενεργοποιούνται και απενεργοποιούνται σε μεγάλες συχνότητες οδηγούμενα από βοηθητικά κυκλώματα ελέγχου. Τα βοηθητικά κυκλώματα ελέγχου χρησιμοποιούν την τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών (Power Width Modulation-PWM) για την έναυση και σβέση των τρανζίστορ ισχύος.

Επειδή η μετάβαση της τάσης δε γίνεται από το δίκτυο αλλά με χρήση ημιαγωγών διακοπτικών στοιχείων π.χ. MOSFET, το κύκλωμα του DC-DC μετατροπείας ονομάζεται και αυτοοδηγούμενο κύκλωμα.

Οι DC-DC μετατροπείς χρησιμοποιούνται σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές όπως στον έλεγχο κινητήρων έλξης στην ηλεκτρική αυτοκίνηση, στα τραμ, στα ναυτιλιακά ανυψωτικά, τα περονοφόρα ανυψωτικά και στις μεταφορικές ταινίες ορυχείων.

### 2.2 Κατηγορίες DC-DC Μετατροπέων

Οι DC-DC μετατροπείς λειτουργούν είτε στην περιοχή συνεχούς αγωγής ρεύματος (Continuous Current Mode-CCM) είτε στην περιοχή ασυνεχούς αγωγής ρεύματος (Discontinuous Current Mode-DCM).

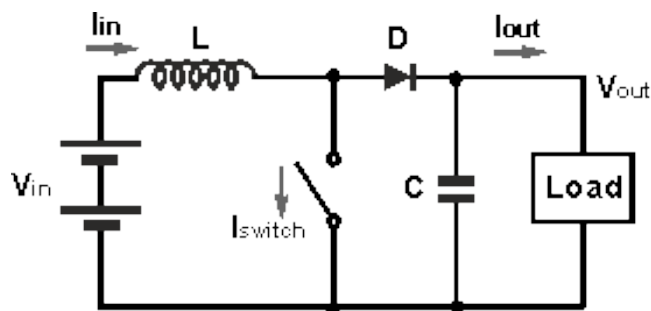
Στη λειτουργία συνεχούς αγωγής η ενέργεια του πηνίου δεν προλαβαίνει να καταναλωθεί από το φορτίο όταν το διακοπτικό στοιχείο δεν άγει οπότε και το ρεύμα δε μηδενίζεται.

Στη λειτουργία ασυνεχούς αγωγής η ενέργεια του πηνίου δεν επαρκεί ώστε να παρέχει ρεύμα στο φορτίο όταν το διακοπτικό στοιχείο δεν άγει.

Οι DC-DC μετατροπείς χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες.

### 2.3 DC-DC Μετατροπέας Ανύψωσης Τάσης(Boost Converter)

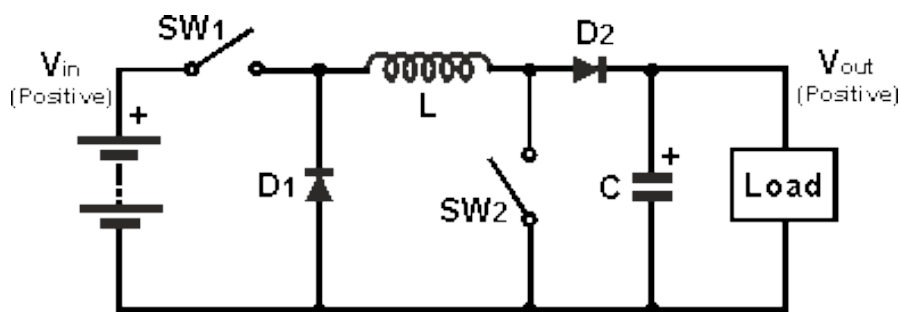
Η τάση εξόδου αυτού του μετατροπέα είναι μεγαλύτερη από την τάση στην είσοδό του.



Σχήμα 1: Μετατροπέας Boost

### 2.4 DC-DC Μετατροπέας Υποβιβασμού-Ανύψωσης Τάσης (Buck/Boost Converter)

Η τάση εξόδου αυτού του μετατροπέα μπορεί να είναι είτε μεγαλύτερη είτε μικρότερη από την τάση εισόδου.



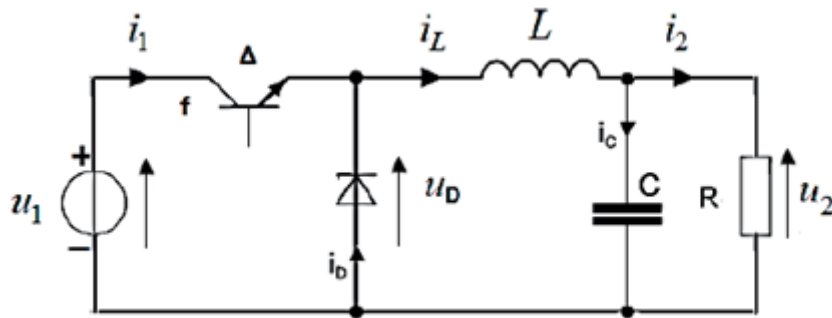
Σχήμα 2: Μετατροπέας Buck/Boost

Στα δύο παραπάνω σχήματα τα τρανζίστορ έχουν αντικατασταθεί από διακόπτες. Αναφορά στον τρόπο λειτουργίας των δύο αυτών μετατροπέων δε θα γίνει μιας και η εργασία αυτή αφορά των μετατροπέα υποβιβασμού τάσης(buck converter).

### 2.5 DC-DC Μετατροπέας Υποβιβασμού Τάσης (Buck Converter)

Ο μετατροπέας υποβιβασμού είναι το κύκλωμα όπου η τάση εξόδου είναι μικρότερη από την τάση στην είσοδο του.

Η λειτουργία του μετατροπέα βασίζεται στην γρήγορη εναλλαγή των καταστάσεων του τρανζίστορ το οποίο συνεχώς εναλλάσσεται από τον κόρο στην αποκοπή.



**Σχήμα 3:**Τυπικό κύκλωμα buck converter (Πολίτης, 2000)

Το κύκλωμα ενός τυπικού buck converter αποτελείται από :

$\Delta$  = NPN-τρανζίστορ, το οποίο λειτουργεί σαν διακόπτης, μπορεί να είναι MOSFET, IGBT κλπ

D = Δίοδος, διακοπτικό στοιχείο

L = Πηνίο, που λειτουργεί σαν αποθήκη ενέργειας και διατηρεί το ρεύμα  $i$  σταθερό

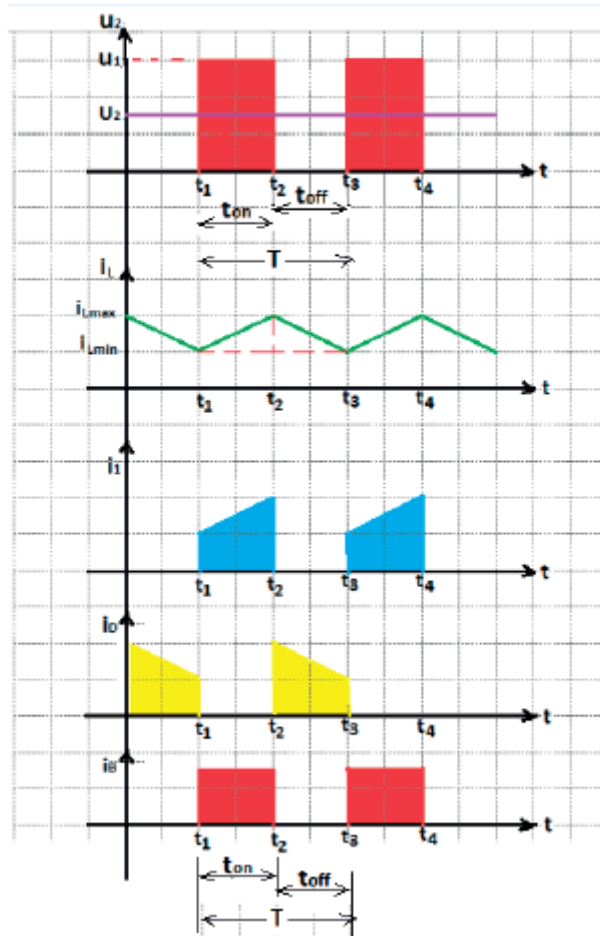
C = Πυκνωτής εξομάλυνσης, διατηρεί την τάση εξόδου σταθερή. Θεωρητικά θα μπορούσε να παραληφθεί.

R = Ωμικό φορτίο, θα μπορούσε να είναι μια μπαταρία

$u_1$ =τάση εισόδου

$u_2$ =τάση εξόδου



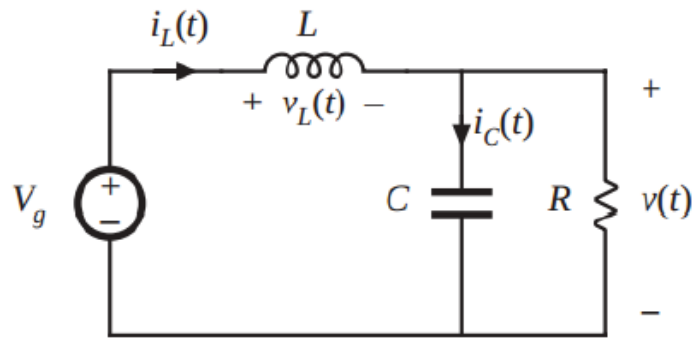


**Σχήμα 4:**Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων του μετατροπέα (Γεώργιος Πολίτης, 2000)

## 2.6 Περιγραφή Κύκλου Λειτουργίας Buck Converter

### Χρονική στιγμή $t_1$

Το τρανζίστορ βρίσκεται στον κόρο το ρεύμα ρέει από την πηγή μέσω του τρανζίστορ, του πηνίου L και ακολούθως μέσω του C και του R.H δίοδος είναι ανάστροφα πολωμένη οπότε και δεν άγει. Δεδομένου ότι υπάρχει μεταβολή ρεύματος έχουμε μεταβολή του μαγνητικού πεδίου του πηνίου και μεταβολή της μαγνητικής ροής που περνάει μέσα από τις σπείρες. Συνεπώς στα άκρα του πηνίου εμφανίζεται τάση από αυτεπαγωγή με πολικότητα που τείνει να αντισταθεί στο φαινόμενο που την προκαλεί. Το πηνίο ξεκινά να αποθηκεύει ενέργεια σε μορφή μαγνητικού πεδίου ενώ ο πυκνωτής φορτίζεται.



**Σχήμα 5:** Τρανζίστορ σε κατάσταση ON (Τσιούρβα, 2013)

Ισχύουν οι σχέσεις:

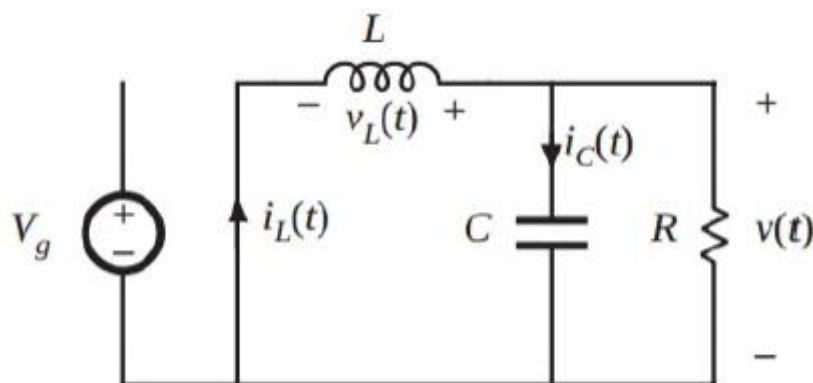
$$V_L = V_g - v(t)$$

$$L \frac{\Delta i}{\Delta t} = V_g - v(t)$$

$i_L = \frac{V_g - v(t)}{L} t$ , που είναι της μορφής  $y = ax$  και παριστάνεται γραφικά με ευθεία

Χρονική στιγμή  $t_2$

Το τρανζίστορ βρίσκεται στην αποκοπή, η πηγή τάσης βγαίνει εκτός κυκλώματος και το ρεύμα θα αρχίσει να μειώνεται. Η αλλαγή αυτή του ρεύματος δημιουργεί μεταβολή του μαγνητικού πεδίου του πηνίου και μεταβολή της μαγνητικής ροής που περνάει μέσα από τις σπείρες. Συνεπώς στα άκρα του πηνίου εμφανίζεται τάση από αυτεπαγωγή με πολικότητα που τείνει να αντισταθεί στο φαινόμενο που την προκαλεί. Λόγω αυτής της πολικότητας η διόδος ξεκινά να άγει ενώ έτσι προστατεύεται και το drain του τρανζίστορ από υπερτάσεις. Το πηνίο μετατρέπεται σε πηγή ρεύματος και τροφοδοτεί το κύκλωμα.



**Σχήμα 6:** Τρανζίστορ σε κατάσταση OFF (Τσιούρβα, 2013)

Ισχύουν οι σχέσεις:

$$U_L + v(t) = 0$$

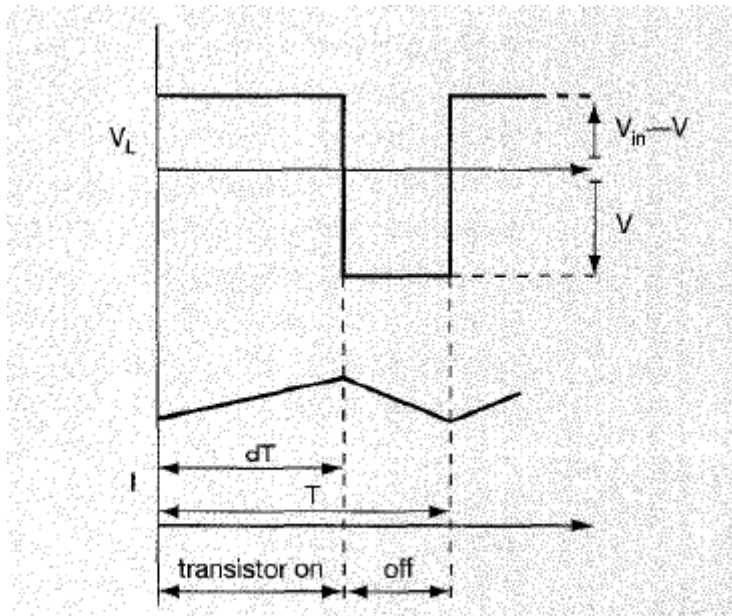
$$UL = -v(t) \Rightarrow iL = \frac{-v(t)}{L}t ,$$

που είναι της μορφής  $y = -ax$  και παριστάνεται γραφικά με ευθεία με αρνητική κλίση

Προσθέτοντας τις κλίσεις των ρευμάτων του πηνίου εξάγεται το συνολικό του ρεύμα. Για συνεχή αγωγή ρεύματος (Continuous Current Mode-CCM), που είναι και το ζητούμενο γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι το ρεύμα κατά τη δεύτερη φάση λειτουργίας δεν πρέπει να αγγίξει τον άξονα του χρόνου. Συνεπώς χρειάζεται πηνίο με μεγάλη αυτεπαγωγή.

## 2.7 Έλεγχος Τάσης Εξόδου

Ο έλεγχος της τάσης εξόδου επιτυγχάνεται ανοιγοκλείνοντας το τρανζίστορ σε έναν καθορισμένο ρυθμό.



**Σχήμα 7:**Κυματομορφές τάσης και ρεύματος πηνίου (Forsyth, Mollon, 1998)

Οι παραπάνω κυματομορφές είναι ιδανικές και απεικονίζουν την τάση και το ρεύμα του πηνίου. Το τρανζίστορ λειτουργεί με μια συγκεκριμένη περίοδο και με έναν κύκλο εργασίας  $d$ . Το ρεύμα του πηνίου δε μηδενίζεται. Η σχέση μεταξύ τάσης εξόδου στην σταθερή κατάσταση και κύκλου εργασίας δίνεται εάν:

$$(V_{in} - V)dT = V(1 - d)T \Rightarrow V = dV_{in}$$

Η τάση εξόδου του διακόπτη ισούται με την τάση εισόδου όταν αυτός άγει ενώ μηδενίζεται όταν αυτός δεν άγει.

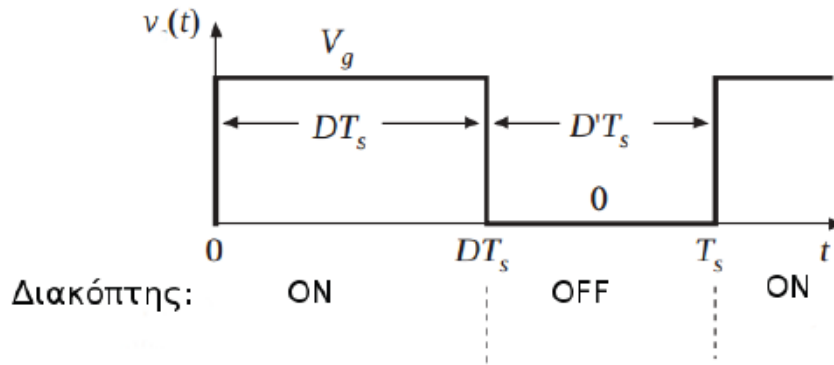
Το  $d$  παίρνει τις τιμές  $0 \leq d \leq 1$  ενώ η διακοπτική συχνότητα ισούται με  $\frac{1}{T}$

Η μεταβολή του κύκλου εργασίας επιτυγχάνεται:

εάν μεταβληθεί ο χρόνος αγωγής του τρανζίστορ και διατηρηθεί η περίοδος σταθερή(Διαμόρφωση Εύρους Παλμών-Pulse Width Modulation).

Εάν μεταβληθεί η περίοδος του παλμού και διατηρηθεί ο χρόνος αγωγής του τρανζίστορ σταθερός(Διαμόρφωση Συχνότητας-Frequency Modulation).

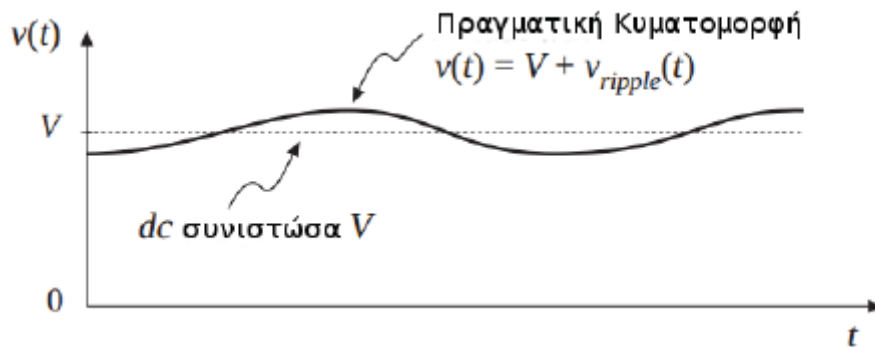
Με χρήση ελεγκτή δύο θέσεων(Two Position Control).



Σχήμα 8:Κυματομορφή τάσης διακόπτη (Τσιούρβα, 2013)

Σύμφωνα με την ανάλυση Fourier η DC συνιστώσα της παραπάνω κυματομορφής δίνεται από τη μέση τιμή της. Συνεπώς έχουμε:

$$V = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v(t) dt = DV_g$$



Σχήμα 9:Κυματομορφή τάσης εξόδου (Τσιούρβα, 2013)

Στην παραπάνω κυματομορφή γίνεται αντιληπτό ότι υπάρχει και κάποια κυμάτωση στην τάση εξόδου. Για τον περιορισμό αυτού του φαινομένου πρέπει να γίνει καλή επιλογή ζεύγους πηνίου-πυκνωτή. Το ζεύγος αυτό δρα ως χαμηλοπερατό φίλτρο με συχνότητα αποκοπής:

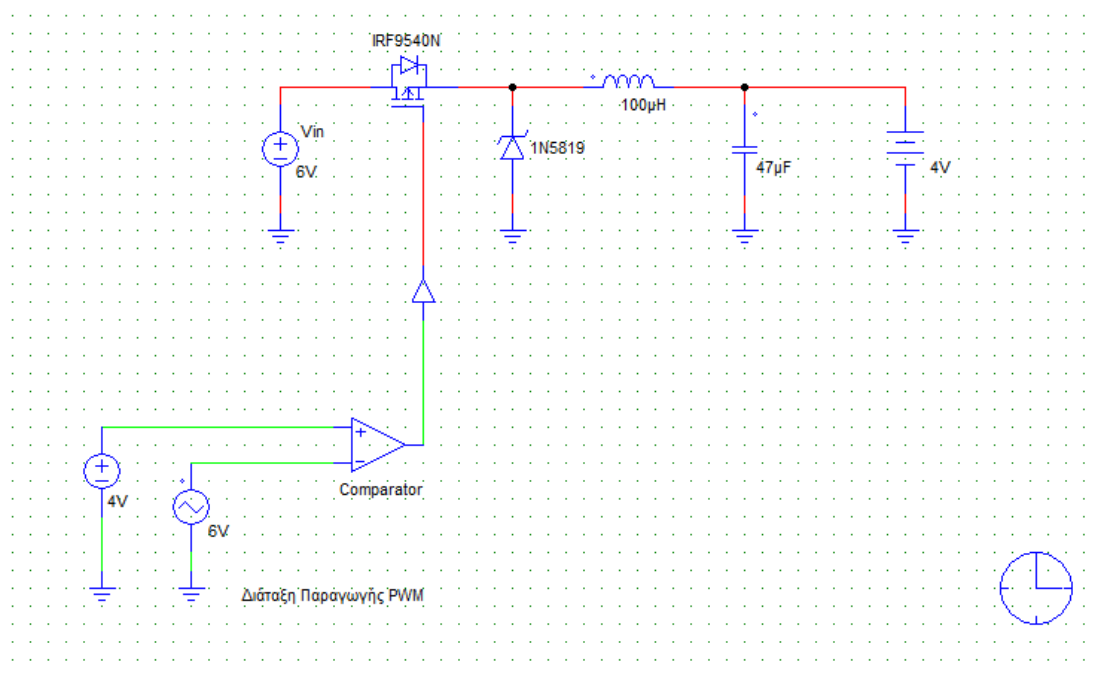
$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

### 3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

#### 3.1 Μοντελοποίηση σε PSIM

Το πρώτο σκέλος της προσομοίωσης έγινε με το πρόγραμμα PSIM που είναι ειδικά σχεδιασμένο για ηλεκτρονικά ισχύος και έλεγχο κινητήρων.

Το κύκλωμα της προσομοίωσης είναι το παρακάτω:



**Σχήμα 10:**Κύκλωμα προσομοίωσης

Μιας και δεν υπήρχε τρόπος να προσομοιωθεί ο μικροελεγκτής για τον έλεγχο του τρανζίστορ χρησιμοποιήθηκε η παραπάνω διάταξη.

Το κύκλωμα ελέγχου είναι ένας συγκριτής που έχει είσοδο μια DC πηγή και μια πηγή τριγώνου ( $V_{pp}=6\text{ V}$ ,  $\text{Frequency}=243,9\text{ Hz}$ ). Η συχνότητα της πηγής τριγώνου είναι και η συχνότητα λειτουργίας του MOSFET.

Τα δύο σήματα οδηγούνται σε έναν συγκριτή. Η έξοδος του συγκριτή είναι 1 όταν η μη ανάστροφη είσοδος ( $V_{dc}$ ) είναι μεγαλύτερη από την ανάστροφη είσοδο ( $V_{tri}$ ). Όταν η μη ανάστροφη είσοδος είναι μικρότερη η έξοδος είναι 0.

Το MOSFET το οποίο χρησιμοποιήθηκε είναι το IRF9540N. Είναι ένα P-Channel MOSFET συνεπώς για να άγει πρέπει να δει στο GATE του 0. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι ο παλμός μικραίνει όσο η μη ανάστροφη είσοδος του συγκριτή είναι μικρότερη από την ανάστροφη. Το MOSFET έχει μικρή αντίσταση  $R_{ds(ON)}=0.117\ \Omega$ .

Το ζεύγος πυκνωτή-πηνίου στα 47µF-100µH που επιλέχθηκε πληροί τις προδιαγραφές μιας και η κυμάτωση που εμφανίζεται στην τάση εξόδου για τη

συχνότητα που μας ενδιαφέρει είναι απειροελάχιστη. Επίσης τα υλικά αυτά στις συγκεκριμένες τιμές είναι πολύ διαδεδομένα στην αγορά.

Η διόδος είναι μια Zener με πολύ μικρή αντίσταση όταν πολωθεί ορθά και πάρα πολύ μικρή τάση κατωφλιού.

Η τάση της πηγής είναι στα 6 V.

Η αντίσταση της μπαταρίας είναι αμελητέα.

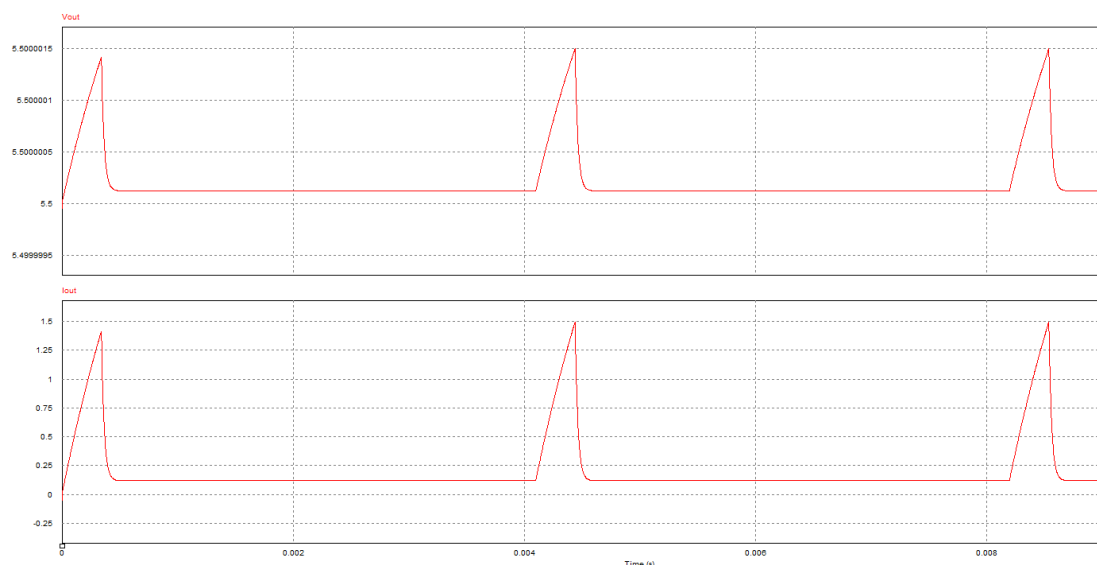
### 3.1.1 Διαμόρφωση με PWM

Η μέθοδος της Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών προσφέρει τη δυνατότητα ελέγχου της τάσης εξόδου της διάταξης. Η εν λόγω τεχνική παράγει μια παλμοσειρά μεταβλητού πλάτους η οποία εάν αυξομειωθεί μεταβάλλει την ποσότητα της ισχύος που φτάνει στο φορτίο που στην προκειμένη περίπτωση είναι μια μπαταρία. Δεδομένου ότι η μεταβολή της ισχύος γίνεται χωρίς ωμικές αντιστάσεις αποφεύγονται οι ωμικές απώλειες. Για την παραγωγή υψηλής συχνότητας PWM γίνεται χρήση ημιαγωγών διακοπτικών στοιχείων ενώ η κατάσταση τους είναι διακριτή, είτε ON(με λογικό 1) είτε OFF(με λογικό 0).Ο κύκλος λειτουργίας  $d$  ορίζεται ως το πηλίκο του χρόνου αγωγής  $t_{on}$  προς το χρόνο περιόδου  $T$ :

$$d = \frac{t}{T}$$

### 3.1.2 Αποτελέσματα σε Χαμηλή Συχνότητα Λειτουργίας

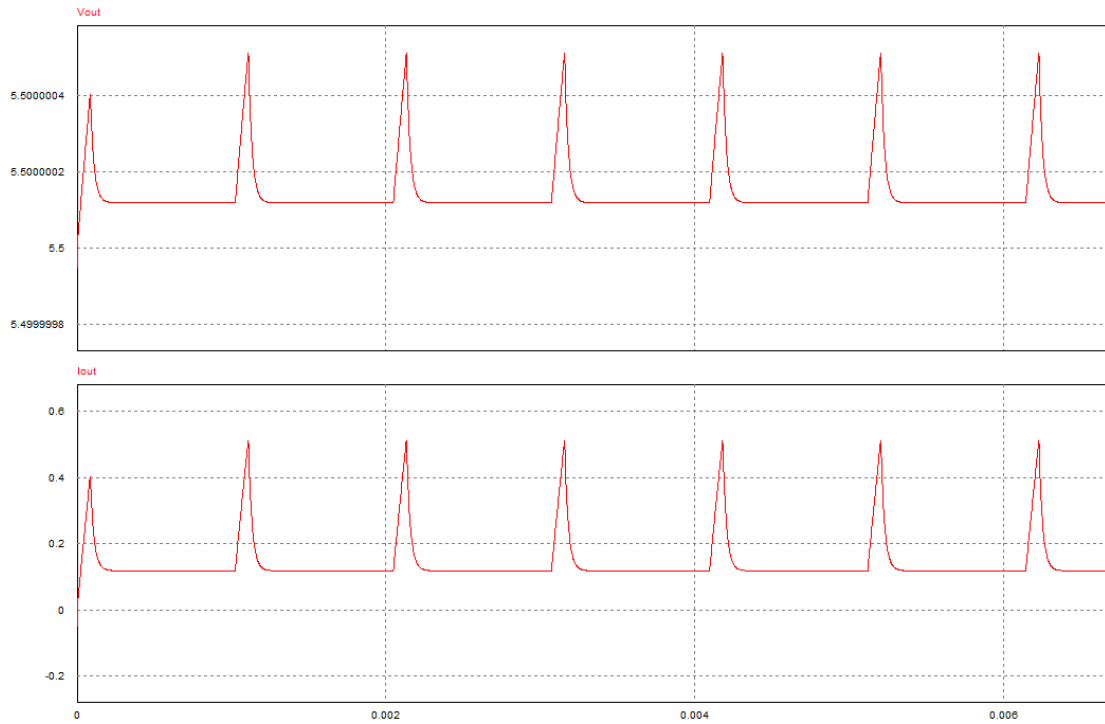
Με την τάση της DC πηγής του κυκλώματος ελέγχου στα 5.5V και αντίστοιχα την τάση της μπαταρίας στα 5.5V φαίνεται η επίδραση της τάσης εισόδου στην μπαταρία.



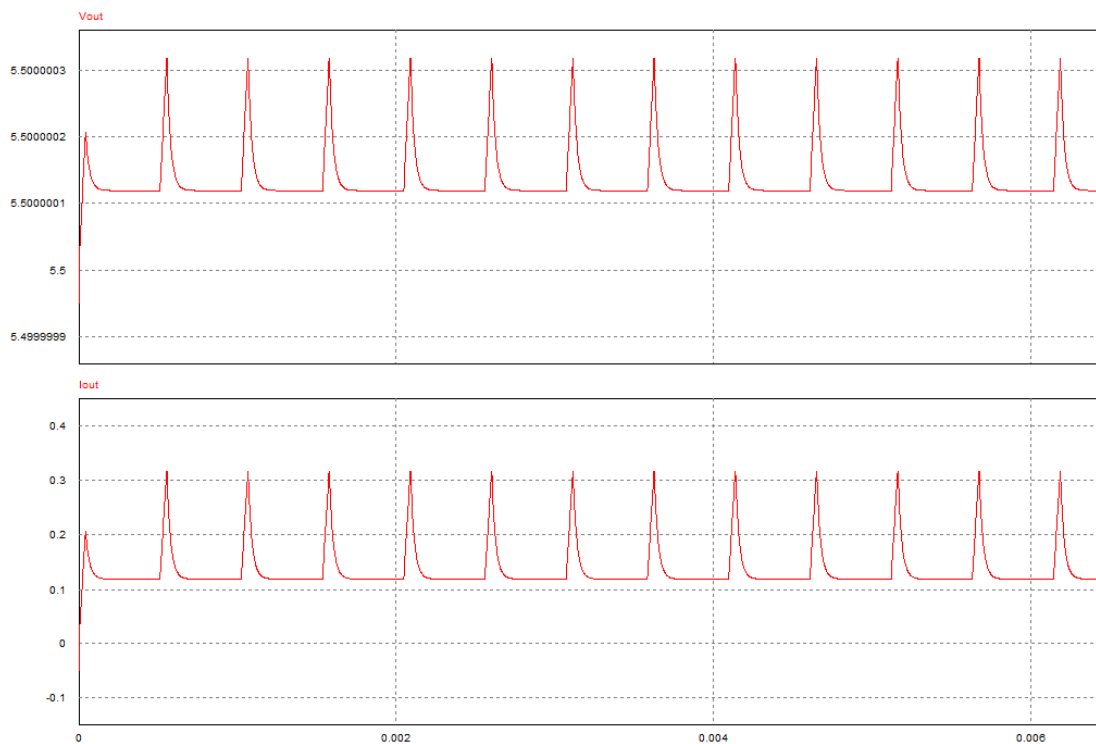
**Σχήμα 11:**Κυματομορφές τάσης εξόδου και ρεύματος εξόδου,  $f=243.9$  Hz

Αυτά τα voltage spikes είναι της τάξης των nanoVolt και συνεπώς ακίνδυνα για την μπαταρία. Γίνεται εύκολα αντιληπτό όμως ότι το ρεύμα δεν έχει σταθερή τιμή. Αυτό σημαίνει ότι η ενέργεια που μαζεύει το πηνίο δεν επαρκεί να διατηρήσει την τιμή του ρεύματος σταθερή.

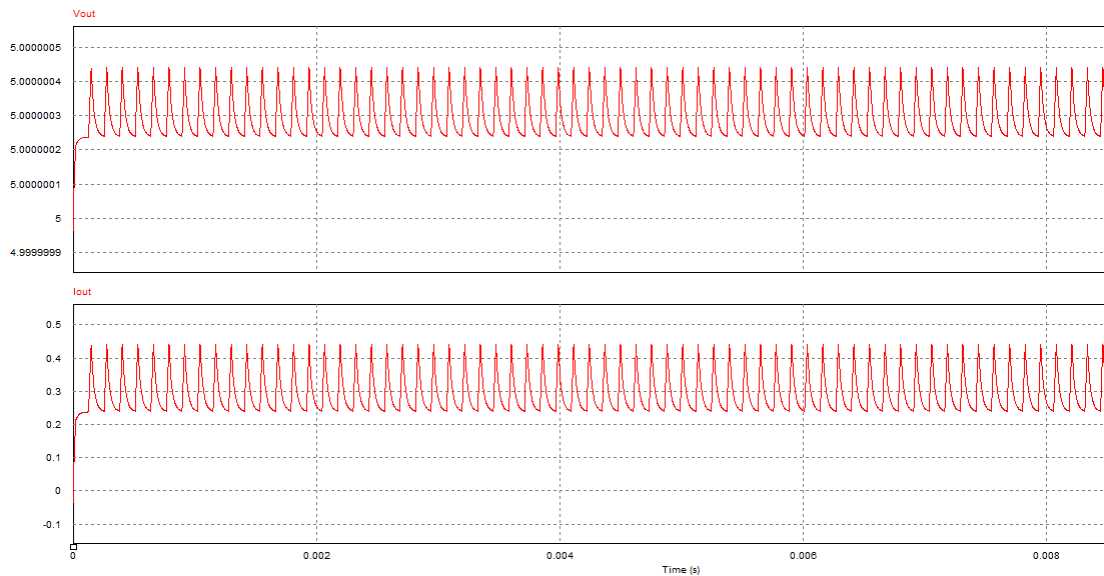
Εάν αυξηθεί η συχνότητα φαίνεται πως το πρόβλημα σταδιακά αποκαθίσταται.



**Σχήμα 12:**Κυματομορφές τάσης εξόδου και ρεύματος εξόδου,  $f=976.56225$  Hz



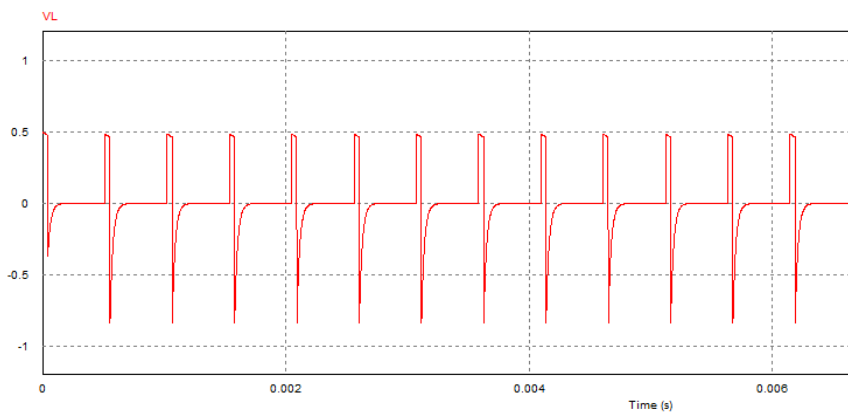
**Σχήμα 13:**Κυματομορφές τάσης εξόδου και ρεύματος εξόδου,  $f=1953.125$  Hz



**Σχήμα 14:**Κυματομορφές τάσης εξόδου και ρεύματος εξόδου,  $f=7812.5$  Hz

Οι συχνότητες που παρουσιάστηκαν συμβαδίζουν με τις πιθανές τιμές του prescaler του χρονιστή για την υλοποίηση της PWM.

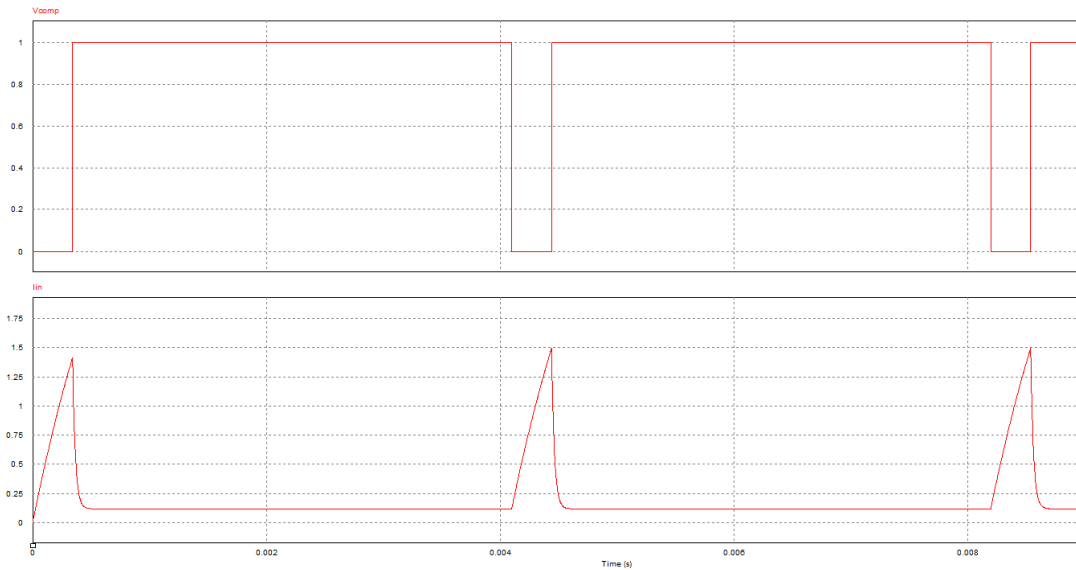
Παρακάτω φαίνεται η αλλαγή στην πολικότητα της τάσης του πηνίου.



**Σχήμα 15:**Κυματομορφή τάσης πηνίου,  $f=976.5625$  Hz

Παρακάτω φαίνεται ο ρυθμός με τον οποίο τροφοφείται το κύκλωμα. Όπως ειπώθηκε νωρίτερα το τρανζίστορ ισχύος που χρησιμοποιήθηκε είναι P-Channel και κατά συνέπεια άγει όταν «βλέπει» 0 στο GATE του.

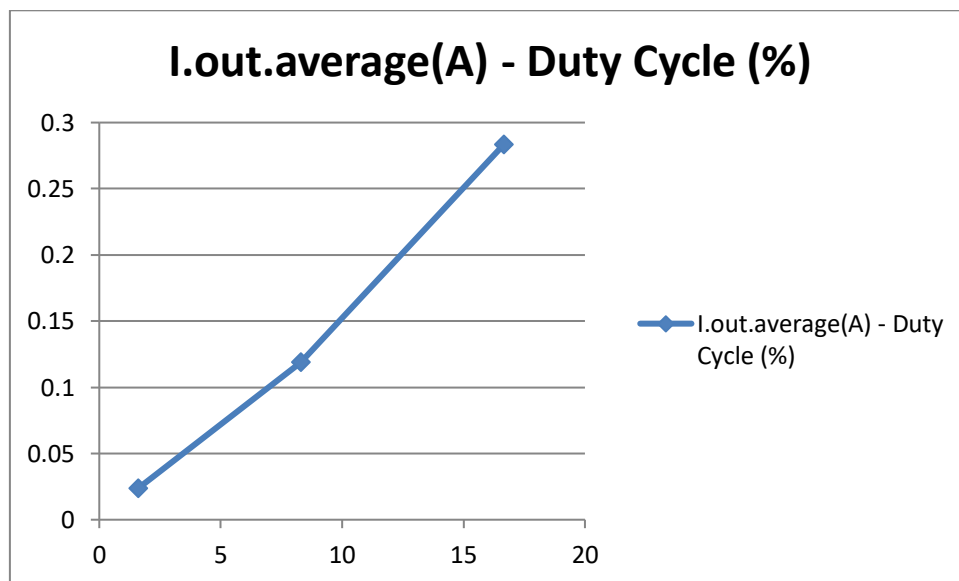




**Σχήμα 16:**Κυματομορφές παλμού κυκλώματος ελέγχου και ρεύματος εισόδου,  $f=243.9$  Hz

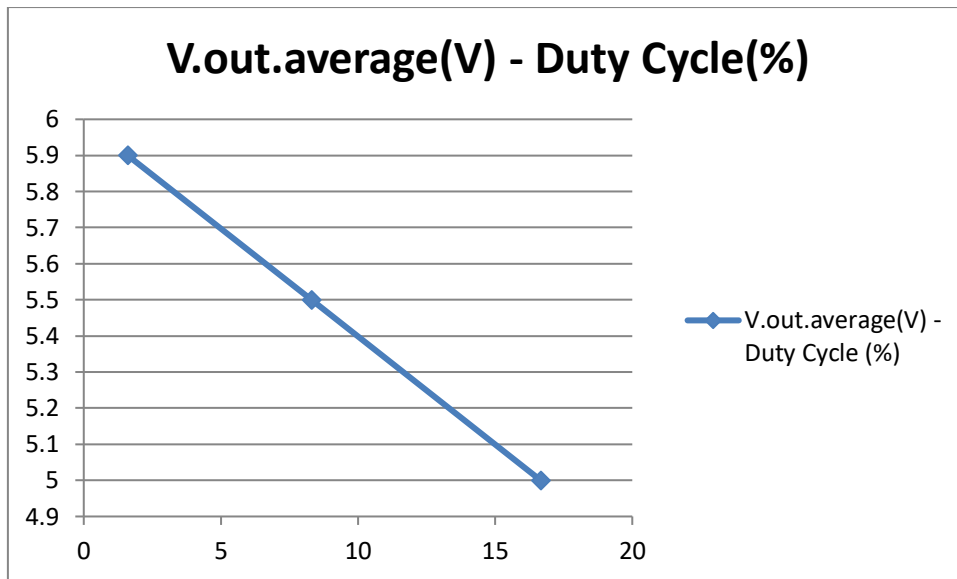
Ο κύκλος λειτουργίας είναι  $D=(1 - \frac{V_{dc}}{V_{tri}}) * 100$  %

Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται το μέσο ρεύμα συναρτήσει του κύκλου εργασίας.



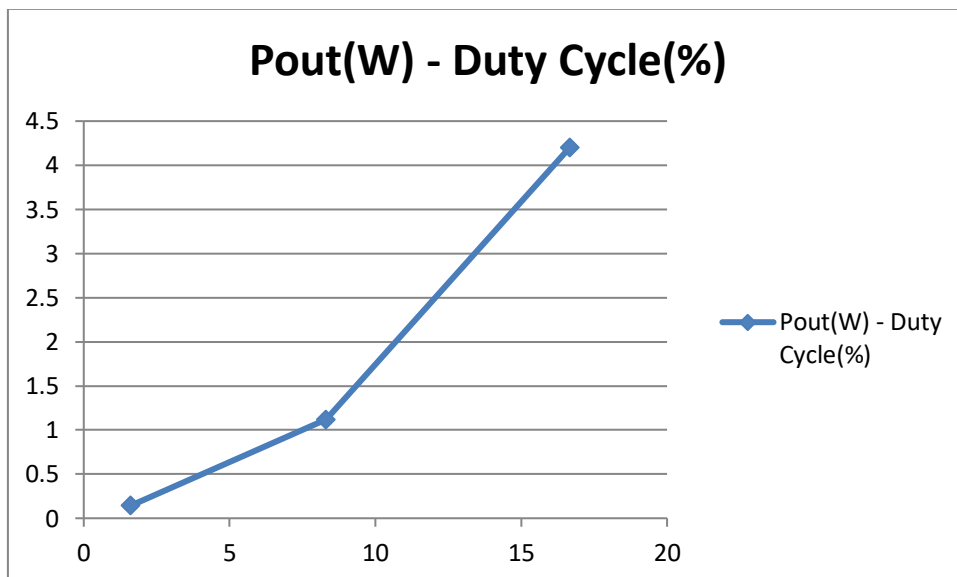
**Σχήμα 17:**I.out.average-Duty Cycle,  $f=243.9$  Hz

Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται η μέση τάση συναρτήσει του κύκλου εργασίας.



**Σχήμα 18:** V.out.average-Duty Cycle,  $f=243.9$  Hz

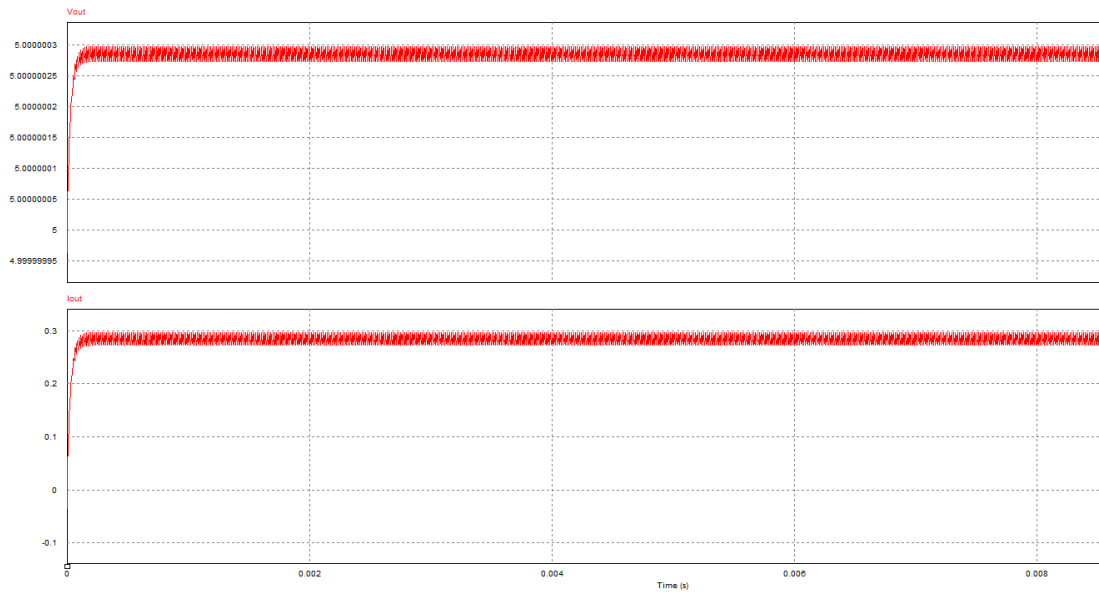
Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται η ισχύς εξόδου συναρτήσει του κύκλου εργασίας.



**Σχήμα 19:** Pout -Duty Cycle,  $f=243.9$  Hz

### 3.1.3 Αποτελέσματα σε Υψηλή Συχνότητα Λειτουργίας

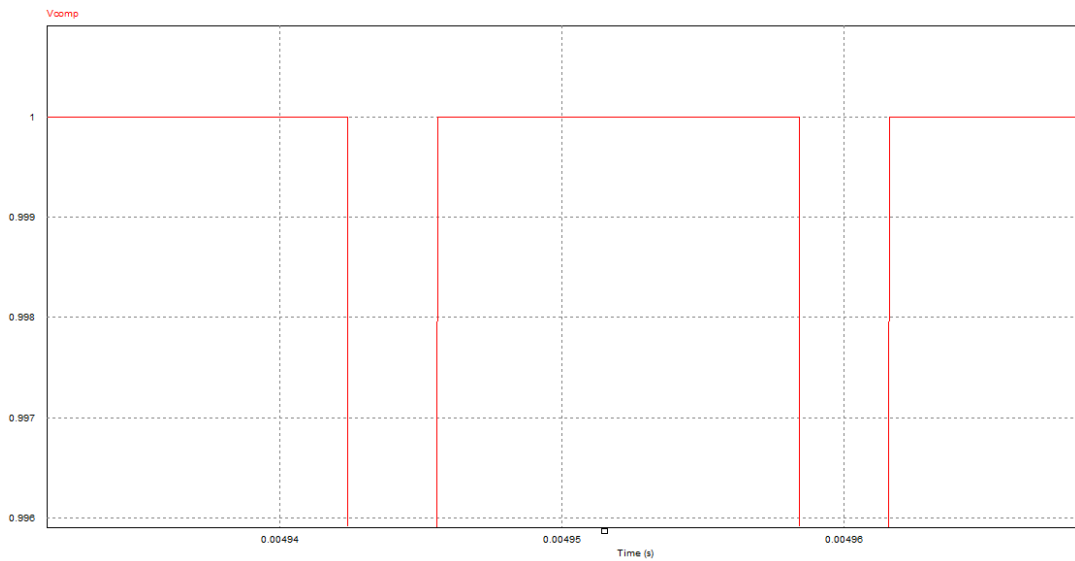
Για να αποφευχθεί η παραπάνω κατάσταση όπου η έξοδος δεν είναι σταθερή θα μπορούσε να αυξηθεί η συχνότητα. Έτσι το ρεύμα του πηνίου δε θα προλαβαίνει να μηδενίσει. Επιλέγεται η συχνότητα των 62.5 kHz.



**Σχήμα 20:**Κυματομορφές τάσης εξόδου και ρεύματος εξόδου,  $f=62.5$  kHz

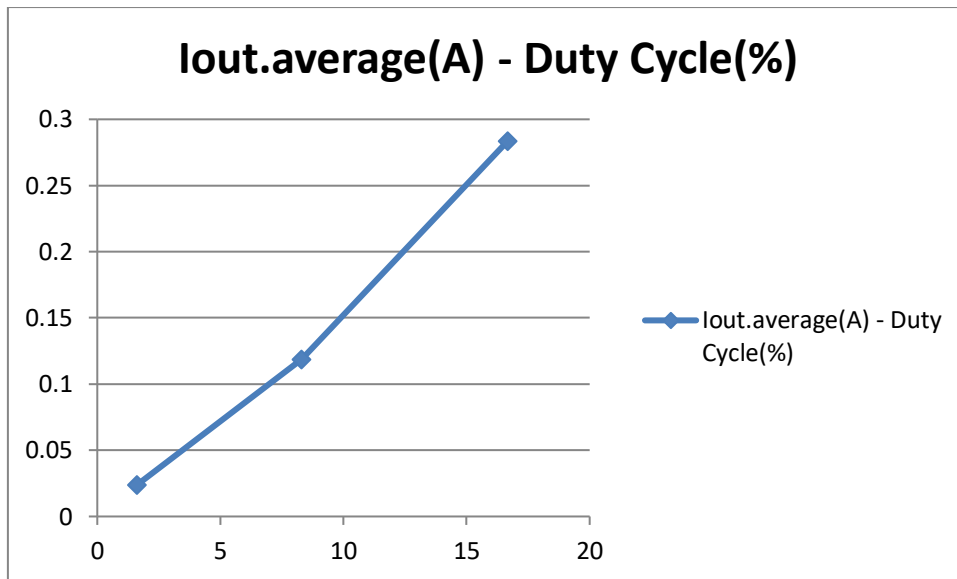
Για μεγαλύτερη συχνότητα λειτουργίας φαίνεται ότι τα voltage spikes μειώνονται όπως και το ρεύμα σταθεροποιείται γύρω από κάποια τιμή.

Αντίστοιχα ο παλμός στο GATE του τρανζίστορ:



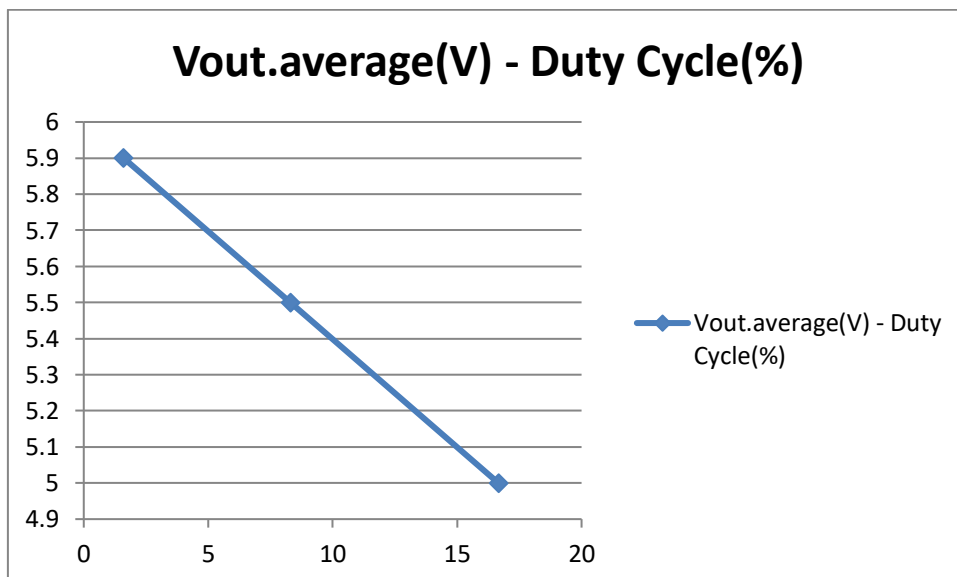
**Σχήμα 21:**Κυματομορφή παλμού κυκλώματος ελέγχου,  $f=62.5$  kHz

Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται το μέσο ρεύμα συναρτήσεως του κύκλου εργασίας.



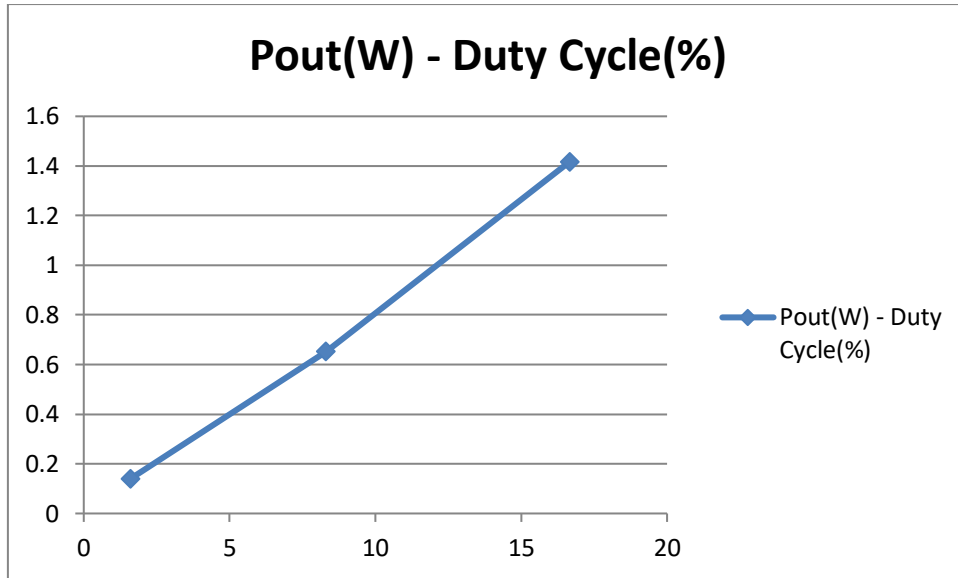
**Σχήμα 22:** Iout.average-Duty Cycle,  $f=62.5$  kHz

Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται η μέση τάση συναρτήσει του κύκλου εργασίας.



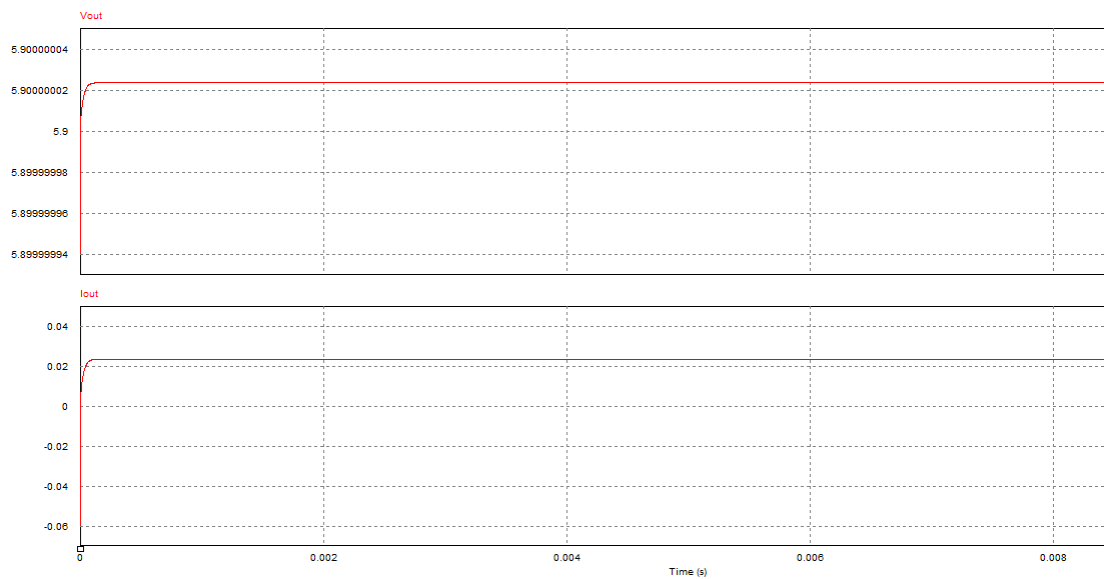
**Σχήμα 23:** Vout.average-Duty Cycle,  $f=62.5$  kHz

Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται η ισχύς εξόδου συναρτήσει του κύκλου εργασίας.



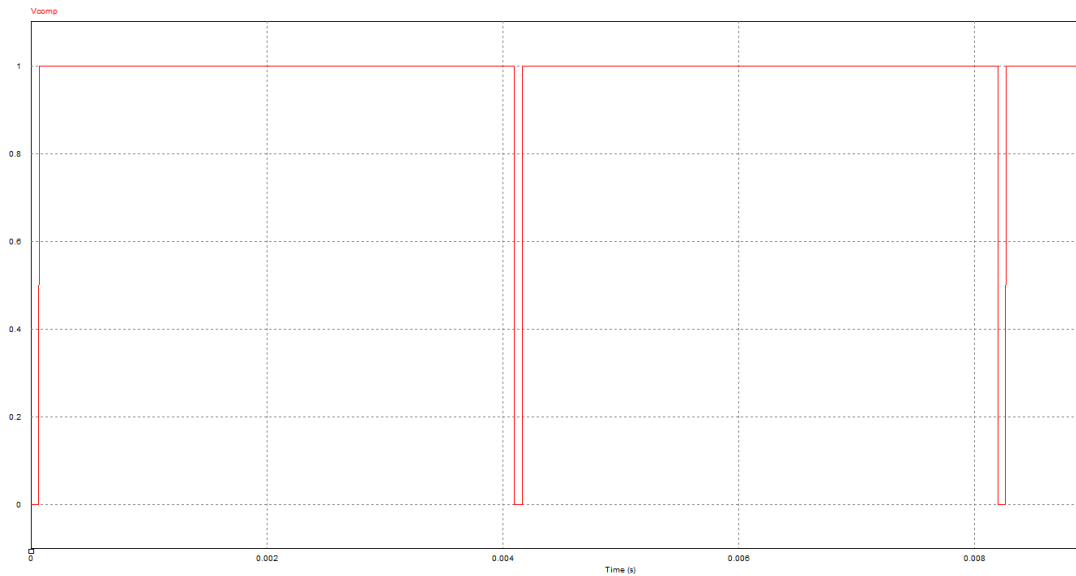
**Σχήμα 24:** Pout -Duty Cycle,  $f=62.5$  kHz

Εάν τώρα στην συχνότητα των 62,5 kHz προσομοιωθεί το σύστημα με την τάση της μπαταρίας στα 5.9 V, φαίνεται ότι το ρεύμα που ρέει προς την μπαταρία έχει μειωθεί κατά πολύ. Θεωρητικά η μπαταρία βρίσκεται πολύ κοντά στο να φορτιστεί πλήρως.



**Σχήμα 25:** Κυματομορφές τάσης εξόδου και ρεύματος εξόδου,  $f=62.5$  kHz,  $V_B=5.9$  V

Όπως είναι προφανές και ο παλμός  $t_{on}$  του τρανζίστορ έχει μειωθεί και αυτός κατά πολύ.



**Σχήμα 26:**Κυματομορφή παλμού κυκλώματος ελέγχου,  $f=62.5$  kHz,  $V_B=5.9V$

### 3.1.4 Διακοπτική Συχνότητα

Όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα, στις υψηλότερες συχνότητες το ρεύμα φόρτισης γίνεται πιο σταθερό. Σε αυτό έπαιξε ρόλο το ρεύμα του πηνίου το οποίο δεν προλαβαίνει να μηδενίσει κατά τη μεταγωγή. Αυτό βοηθάει και στην προστασία του φορτίου ειδικά όταν πρόκειται για ηλεκτρονικά όπου και μια κυμάτωση μπορεί να τα κάψει.

Βέβαια, σε όσο μεγαλύτερη συχνότητα γίνεται η μεταγωγή τόσο μεγαλύτερες οι απώλειες της μεταγωγής. Αυτό συμβαίνει διότι το MOSFET έχει απώλειες κάθε φορά που αλλάζει κατάσταση. Συνεπώς στις χαμηλότερες συχνότητες ο μετατροπέας είναι πιο αποδοτικός.

Από την άλλη όμως στις υψηλές συχνότητες υπάρχει η δυνατότητα να γίνει επιλογή πηνίου και πυκνωτή εξομάλυνσης σε μικρότερες τιμές. Κατά αυτόν τον τρόπο ο μετατροπέας γίνεται πιο οικονομικός. Επίσης μικραίνει και από άποψη χώρου.

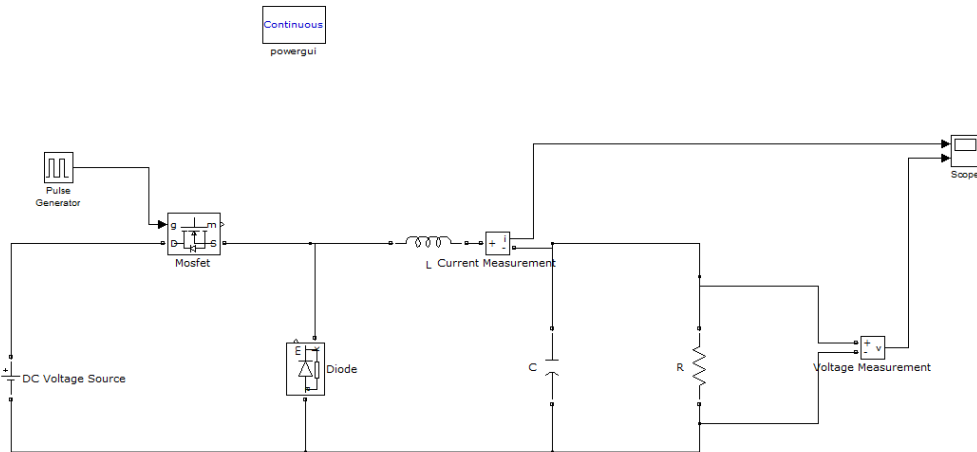
Συνεπώς θα έλεγε κανείς ότι οι υψηλές συχνότητες αποτελούν ιδανικότερη επιλογή.

## 3.2 Μοντελοποίηση σε Matlab-Simulink

### 3.2.1 Ανοιχτός βρόχος-Open loop

Το δεύτερο σκέλος της προσομοίωσης έγινε με το πρόγραμμα Simulink που περιέχει βιβλιοθήκες ειδικά σχεδιασμένες για ηλεκτρονικά ισχύος και αυτόματο έλεγχο.

Το κύκλωμα της προσομοίωσης είναι το παρακάτω:



**Σχήμα 27:**Κύκλωμα ανοιχτού βρόγχου

Για μπαταρία χρησιμοποιήθηκε μια πολύ μικρή αντίσταση.

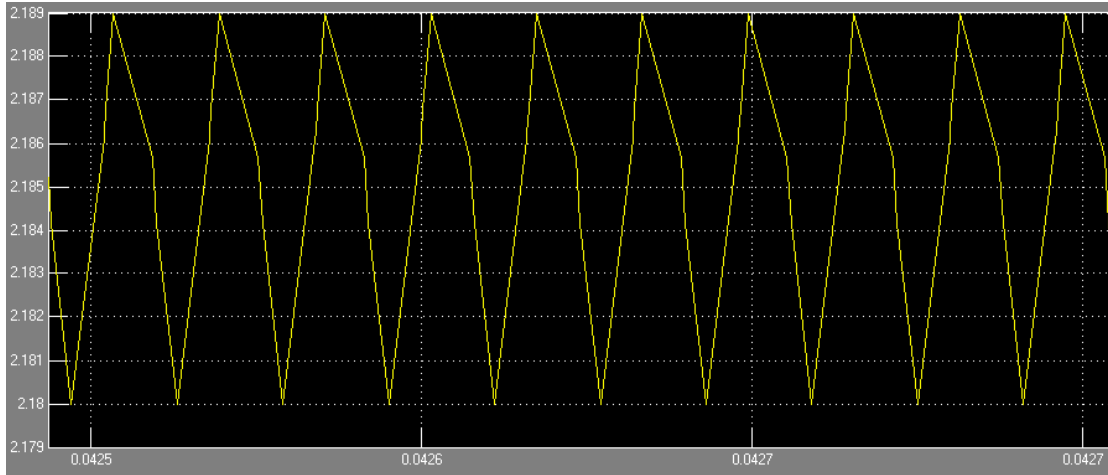
Ο έλεγχος του MOSFET γίνεται με μια γεννήτρια παλμών.

Τα χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων είναι τα ίδια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίηση με PSIM στην προηγούμενη ενότητα.

Ο κύκλος λειτουργίας ρυθμίζεται στο 50%. Παρακάτω φαίνονται οι κυματομορφές της τάσης εξόδου και του ρεύματος εξόδου:



**Σχήμα 28:**Κυματομορφή ρεύματος εξόδου,  $f=62.5$  kHz



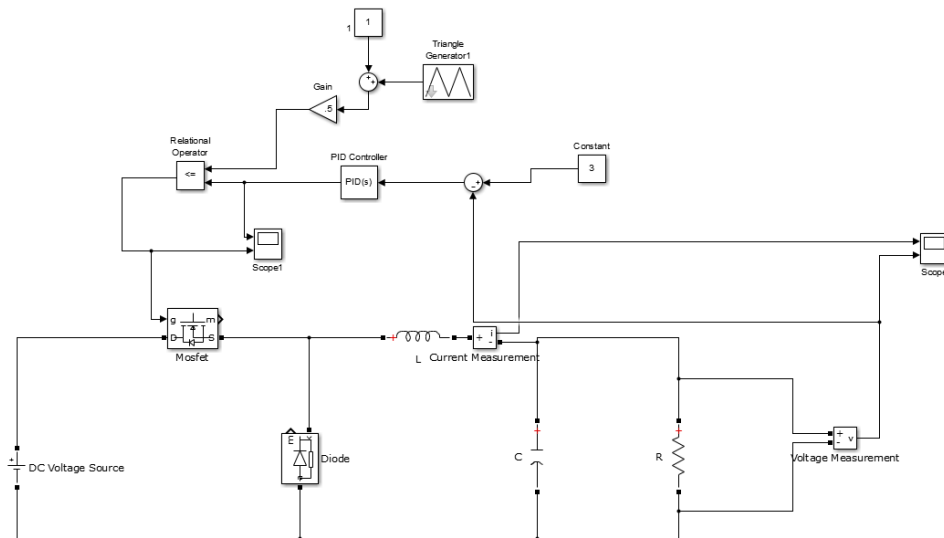
**Σχήμα 29:**Κυματομορφή τάσης εξόδου,  $f=62.5$  kHz

Στην κυματομορφή της τάσης εξόδου γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι υπάρχει μια απόκλιση από την τιμή των 3 V που θεωρητικά θα έπρεπε να δείξει η έξοδος για κύκλο λειτουργίας ίσο με 50%. Αυτό συμβαίνει λόγω της μεγάλης πτώσης τάσης στην αντίσταση του MOSFET.

### 3.2.2 Κλειστός βρόγχος-Closed loop

Για τον έλεγχο της τάσης εξόδου προστέθηκε μια διάταξη ελέγχου στο κύκλωμα του buck converter.

Το κύκλωμα της προσομοίωσης είναι το παρακάτω:



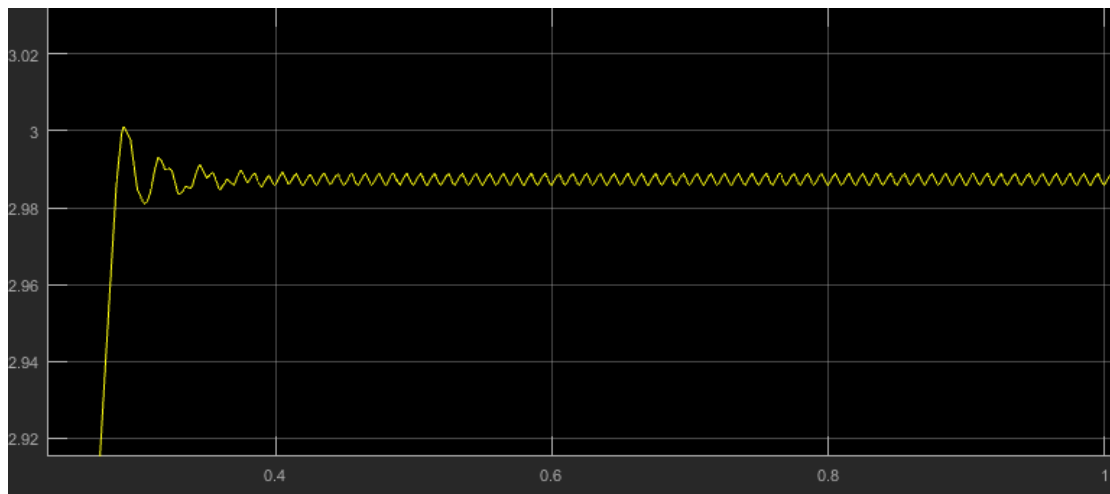
**Σχήμα 30:**Κύκλωμα κλειστού βρόγχου

Η παραπάνω διάταξη λειτουργεί ως εξής:

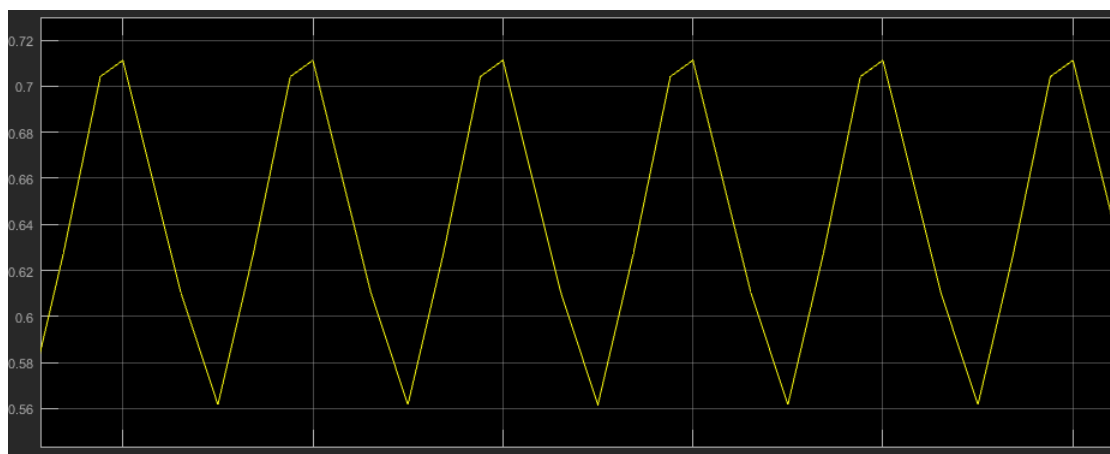
Δίνεται μια τιμή αναφοράς και συγκρίνεται με την πραγματική τιμή της τάσης που μετρείται στο φορτίο. Κατόπιν περνάει από έναν ελεγκτή PID και εξάγεται ένα φέρων σήμα. Το σήμα αυτό συγκρίνεται με έναν ειδικά διαμορφωμένο τριγωνικό παλμό και λαμβάνονται οι παλμοί για το Gate του MOSFET. Κατά αυτόν τον τρόπο η τιμή της



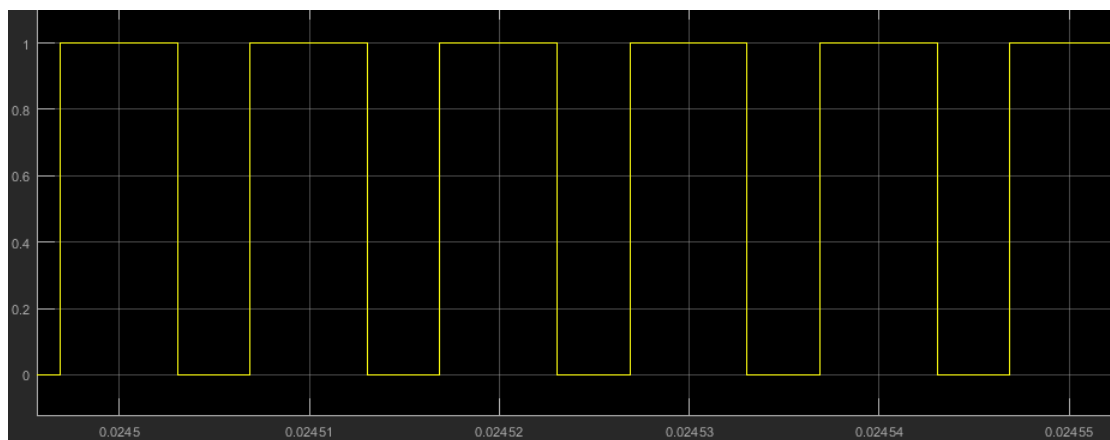
τάσης εξόδου παραμένει σταθερή. Στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω η τιμή αναφοράς τέθηκε στα 3 V.



**Σχήμα 31:**Κυματομορφή τάσης εξόδου,  $f=100$  kHz



**Σχήμα 32:**Έξοδος ελεγκτή PI



**Σχήμα 33:**PWM,  $f=100$ kHz

Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι με χρήση ενός ελεγκτή PID προσεγγίζει η έξοδος την επιθυμητή τιμή παρά τις όποιες απώλειες ισχύος στο κύκλωμα.

## 4 DC-DC ΜΕΤΡΟΠΕΑΣ ΓΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ

### 4.1 Μικροελεγκτής

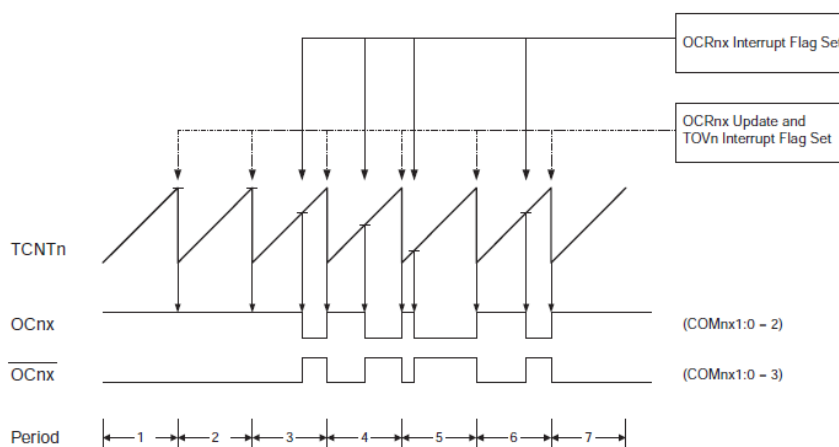
Για τη λειτουργία του buck converter που προσομοιώθηκε στη 3<sup>η</sup> Ενότητα χρησιμοποιήθηκε η αναπτυξιακή πλατφόρμα Arduino Uno. Ο Uno είναι βασισμένος στο μικροελεγκτή ATmega328P της Atmel και ανήκει στην οικογένεια megaAVR.

Έχει 14 ψηφιακές εισόδους/εξόδους, 6 από τις οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως έξοδοι PWM. Επίσης διαθέτει 6 αναλογικές εισόδους, κρύσταλλο χαλαζία 16MHz, 3 timers/counters, βύσμα USB, ένα power jack, έναν ICPS header και έναν διακόπτη για reset.

### 4.2 Timer/Counter 2

Η παραγωγή της PWM για τη λειτουργία του buck converter έγινε με χρήση του χρονιστή/μετρητή T2. Ο χρονιστής αυτός είναι 8 bit και διαθέτει 4 τρόπους λειτουργίας: Normal Mode, fast PWM mode, CTC mode και phase correct PWM mode. Ο τρόπος λειτουργίας που επιλέχθηκε είναι ο fast PWM.

Στην λειτουργία αυτή έχουμε την παραγωγή μιας PWM σε υψηλή συχνότητα. Ο μετρητής μετράει από την χαμηλότερη τιμή μέχρι την υψηλότερη και στην υπερχείλιση ξεκινάει από την χαμηλότερη. Η τιμή σύγκρισης δίνεται στον καταχωρητή OCR2x ενώ η κυματομορφή παράγεται στο pin OC2x.



**Σχήμα 34:**Fast PWM mode, διάγραμμα χρονισμού (Atmel, 2015)

Η συχνότητα της PWM μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$f_{pwm} = \frac{f_{clk}}{N * 256}$$

όπου N είναι η μεταβλητή του prescaler (1,8,32,64,128,256 ή 1024).

#### 4.2.1 Καταχωρητής TCCR2A

Για την επιθυμητή λειτουργία απαιτείται ρύθμιση με 1 στα κατάλληλα bits του καταχωρητή TCCR2A.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
(0xB0)	COM2A1	COM2A0	COM2B1	COM2B0	–	–	WGM21	WGM20	TCCR2A
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R	R	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

**Σχήμα 35:**Καταχωρητής TCCR2A (Atmel, 2015)

Στην προκειμένη περίπτωση είναι επιθυμητή μια PWM στο pin OC2A η οποία να είναι 1 στην χαμηλότερη τιμή και να μηδενίζεται σε επιτυχή σύγκριση. Η χαμηλότερη τιμή να είναι το 0 και η υψηλότερη το 255. Η σημαία του Overflow του μετρητή(TOV2) να γίνεται 1 στην υψηλότερη τιμή.

$$TCCR2A = ((1 \ll \text{COM2A1}) | (1 \ll \text{WGM21}) | (1 \ll \text{WGM20}));$$

COM2A1	COM2A0	Description
0	0	Normal port operation, OC2A disconnected.
0	1	WGM22 = 0: Normal Port Operation, OC0A Disconnected. WGM22 = 1: Toggle OC2A on Compare Match.
1	0	Clear OC2A on Compare Match, set OC2A at BOTTOM, (non-inverting mode).
1	1	Set OC2A on Compare Match, clear OC2A at BOTTOM, (inverting mode).

**Σχήμα 36:**Bits 7:6 - COM2A1:2 (Atmel, 2015)

Mode	WGM22	WGM21	WGM20	Timer/Counter Mode of Operation	TOP	Update of OCRx at	TOV Flag Set on <sup>(1)(2)</sup>
0	0	0	0	Normal	0xFF	Immediate	MAX
1	0	0	1	PWM, Phase Correct	0xFF	TOP	BOTTOM
2	0	1	0	CTC	OCRA	Immediate	MAX
3	0	1	1	Fast PWM	0xFF	BOTTOM	MAX
4	1	0	0	Reserved	–	–	–
5	1	0	1	PWM, Phase Correct	OCRA	TOP	BOTTOM
6	1	1	0	Reserved	–	–	–
7	1	1	1	Fast PWM	OCRA	BOTTOM	TOP

Notes: 1. MAX= 0xFF  
2. BOTTOM= 0x00

**Σχήμα 37:**Bits 1:0 – WMG21:20 (Atmel, 2015)

#### 4.2.2 Καταχωρητής TCCR2B

Για την επιθυμητή λειτουργία απαιτείται ρύθμιση με 1 στα bits του καταχωρητή TCCR2B.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
(0xB1)	FOC2A	FOC2B	-	-	WGM22	CS22	CS21	CS20	TCCR2B
Read/Write	W	W	R	R	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

**Σχήμα 38:**Καταχωρητής TCCR2B (Atmel, 2015)

Με τον καταχωρητή αυτό στην επιθυμητή λειτουργία γίνεται εγγραφή στα 2:0 bits για τη ρύθμιση της συχνότητας. Στην πράξη είναι ο διακόπτης που ρυθμίζει και ξεκινάει τον χρονιστή. Η συχνότητα στην οποία θα λειτουργήσει ο χρονιστής είναι τα 62.5 kHz. Συνεπώς δε θα χρησιμοποιηθεί κάποιος prescaler.

$$TCCR2B = (1 \ll CS20);$$

CS22	CS21	CS20	Description
0	0	0	No clock source (Timer/Counter stopped).
0	0	1	$clk_{T2S}/(\text{No prescaling})$
0	1	0	$clk_{T2S}/8$ (From prescaler)
0	1	1	$clk_{T2S}/32$ (From prescaler)
1	0	0	$clk_{T2S}/64$ (From prescaler)

CS22	CS21	CS20	Description
1	0	1	$clk_{T2S}/128$ (From prescaler)
1	1	0	$clk_{T2S}/256$ (From prescaler)
1	1	1	$clk_{T2S}/1024$ (From prescaler)

**Σχήμα 39:**Bits 2:0 – CS22:20 (Atmel, 2015)

#### 4.2.3 Καταχωρητής OCR2A

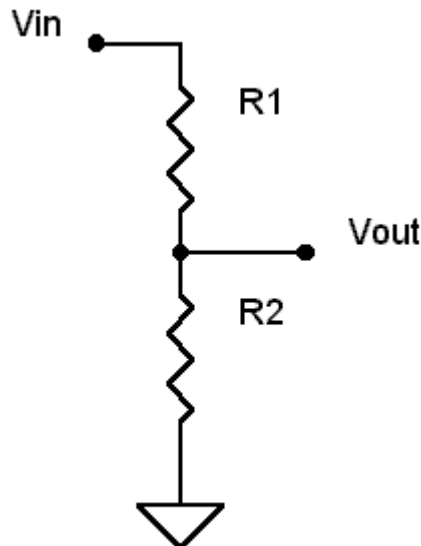
Η τιμή σύγκρισης που δίνεται στον καταχωρητή OCR2A προκύπτει από τη μέτρηση της τάσης της μπαταρίας.

#### 4.3 Διαιρέτης Τάσης

Η μπαταρία που χρησιμοποιήθηκε για τη φόρτιση έχει χαρακτηριστικά 6 V - 2.8 AH.

Οι αναλογικές θύρες εισόδου του Arduino Uno δέχονται τάση από 0 έως 5 V. Οποιαδήποτε τιμή πάνω από αυτά τα όρια μπορεί να προκαλέσει ζημία. Συνεπώς χρειάστηκε να γίνει υλοποίηση ενός διαιρέτη τάσης για την ανάγνωση της τάσης της μπαταρίας.

Χρησιμοποιήθηκε μια αντίσταση των 20kΩ και μια των 100kΩ ώστε να γίνεται ανάγνωση της μέγιστης δυνατής τάσης της μπαταρίας.



**Σχήμα 40:** Διαιρέτης τάσης

όπου  $R1=20k\Omega$ ,  $R2=100k\Omega$  και  $V_{in}=6\text{ V}$ .

Η ανάγνωση της τάσης έγινε με χρήση της συνάρτησης `analogRead()`. Κατόπιν χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση `map()` για τη μετατροπή του αποτελέσματος από τα 10-Bits στα 8-Bits που λειτουργεί ο μετρητής μας.

```
value=analogRead(meas);
value=map(value, 0, 1023, 0, 255);
```

#### 4.4 Πρόγραμμα

Το πρόγραμμα λειτουργίας αποτελείται από δυο ενωμένα αρχεία. Στο πρώτο βρίσκεται το κυρίως πρόγραμμα ενώ στο δεύτερο βρίσκεται η συνάρτηση υπολογισμού της PWM.

Η συνάρτηση καλείται για πρώτη φορά στην αρχικοποίηση και στη συνέχεια σε όλη τη διάρκεια λειτουργίας.

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όσο η τάση της μπαταρίας είναι κάτω από 6 V.

Εάν η τάση γίνει ίση με 6 V γράφουμε 1 στο pin της PWM και το τρανζίστορ σταματά να άγει.

#### 4.5 Διόρθωση Τάσης

Για αποδοτικότερη λειτουργία και ταχεία φόρτιση χρησιμοποιήθηκε το εξής τέχνασμα:

-όταν η τάση της μπαταρίας είναι πάνω από 4.5 V έως 5 V αυξάνεται το  $t_{on}$  κατά 7 bits.

-όταν η τάση της μπαταρίας είναι από 5 V έως 5.5 V αυξάνεται το  $t_{on}$  κατά 5 bits.

-όταν η τάση της μπαταρίας είναι πάνω από 5.5 V αυξάνεται το  $t_{on}$  κατά 3 bits.

Κατά αυτόν τον τρόπο μειώνεται ο χρόνος φόρτισης σε αυτές τις περιοχές όπου ο παλμός του  $t_{on}$  ελαττώνεται αρκετά.

```
#define mea A0
#define pwmpin 11

int value;

void setup()
{
  pinMode(mea, INPUT);
  pinMode(pwmpin, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);

  CalculatePWM();

  TCCR2A = ((1<<COM2A1) | (1<<WGM21) | (1<<WGM20));

  TCCR2B = (1<<CS20);
}

void loop()
{
  CalculatePWM();
  Serial.println(value);
}
```

Κυρίως πρόγραμμα

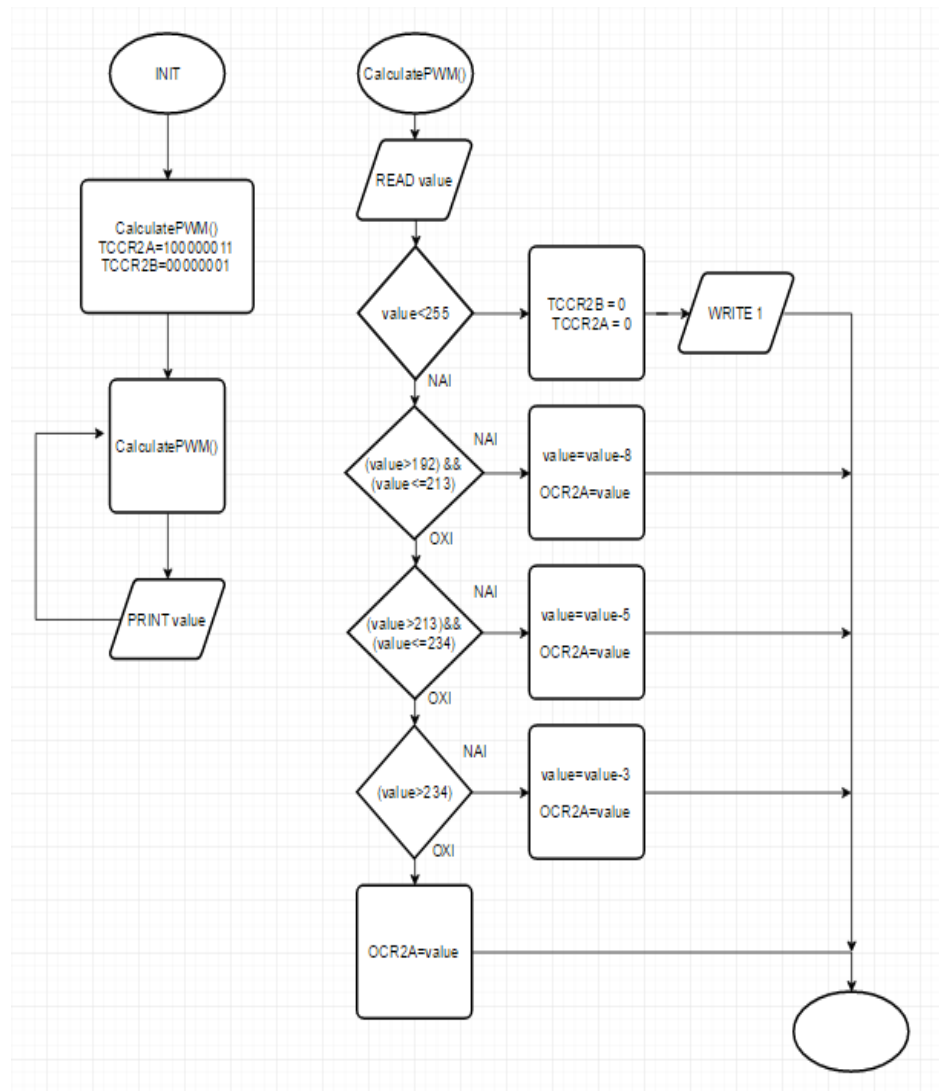
```

void CalculatePWM()
{
  value=analogRead(mea);
  value=map(value,0,1023,0,255);

  if(value<255)
  {
    if((value>192) && (value<=213))
    {
      value=value-8;
      OCR2A=value;
    }
    else if((value>213) && (value<=234))
    {
      value=value-5;
      OCR2A=value;
    }
    else if(value>234)
    {
      value=value-3;
      OCR2A=value;
    }
    else
    {
      OCR2A=value;
    }
  }
  else
  {
    TCCR2B = 0;
    TCCR2A = 0;
    digitalWrite(pwmpin,HIGH);
  }
}

```

Συνάρτηση υπολογισμού PWM



Σχήμα 41: Διάγραμμα ροής



## 4.6 Έλεγχος Προγράμματος με Χρήση Λογικού Αναλυτή

Το παραγόμενο PWM από τον μικροελεγκτή επαληθεύτηκε με χρήση Λογικού αναλυτή. Χρησιμοποιήθηκε ένα ποτενσιόμετρο για ρύθμισης της τάσης που λαμβάνεται από τη μέτρησης της μπαταρίας. Έγινε λήψη 20 τιμών από το 0 μέχρι το 255 δηλαδή από τα 0 μέχρι τα 6V.Οι τιμές από τα 4.5V και μετά δέχονται διόρθωση για ταχύρυθμη φόρτιση. Η αντιστοιχία των ψηφιακών με τις αναλογικές τιμές φαίνεται παρακάτω.

Digital Value	Analog Value	Διόρθωση(Digital)	Διόρθωση(Analog)
0	0 V	-	-
16	0,375 V	-	-
36	0,84375 V	-	-
62	1,453125 V	-	-
79	1,8515 V	-	-
102	2,39 V	-	-
126	2,953 V	-	-
146	3,421 V	-	-
160	3,75 V	-	-
177	4,148 V	-	-
189	4,429 V	-	-
195	4,57 V	187	4,382 V
204	4,781 V	196	4,593 V
210	4,921 V	202	4,734 V
217	5,085 V	212	4,968 V
228	5,343 V	223	5,226 V
234	5,484 V	229	5,367 V
241	5,648 V	238	5,578 V
252	5,906 V	249	5,835 V
255	6 V	-	-

**Πίνακας 1:**Αντιστοιχία ψηφιακών-αναλογικών τιμών και σύγκριση διορθωμένων τιμών

### 4.6.1 Χαμηλή Συχνότητα Λειτουργίας

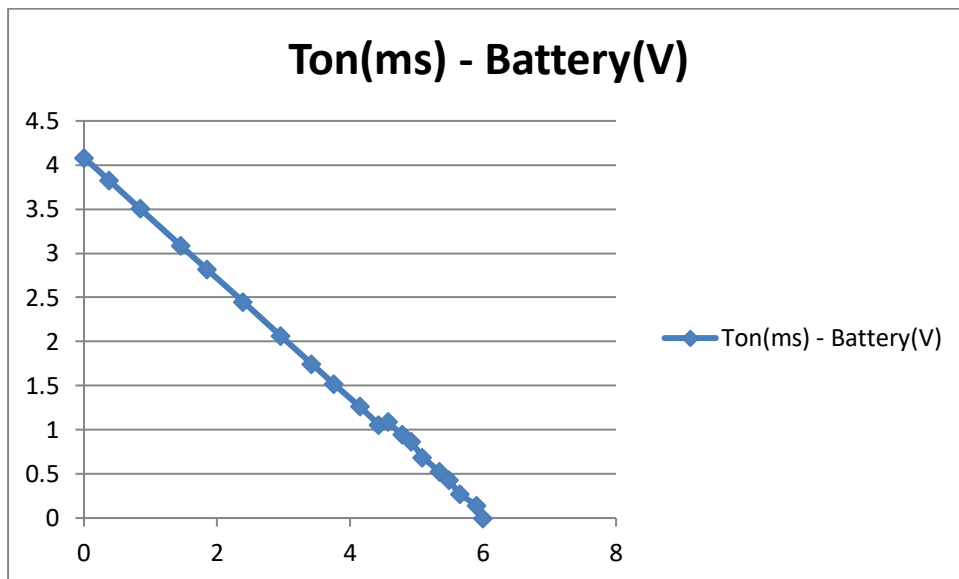
Για την παρακάτω συχνότητα λειτουργίας(243,9 Hz) χρησιμοποιήθηκε ο prescaler 256.

A/A	Value	f	T	t <sub>ON</sub>	t <sub>OFF</sub>	DutyCycle	Διόρθωση
1	0	243,9Hz	4,1ms	4,084ms	0,016ms	99,61%	-
2	16	243,9Hz	4,1ms	3,828ms	0,2723ms	93,36%	-
3	36	243,9Hz	4,1ms	3,508ms	0,5927ms	85,55%	-
4	62	243,9Hz	4,1ms	3,091ms	1,009ms	75,39%	-
5	79	243,9Hz	4,1ms	2,819ms	1,281ms	68,75%	-
6	102	243,9Hz	4,1ms	2,451ms	1,65ms	59,76%	-
7	126	243,9Hz	4,1ms	2,066ms	2,034ms	50,39%	-
8	146	243,9Hz	4,1ms	1,746ms	2,354ms	42,58%	-
9	160	243,9Hz	4,1ms	1,522ms	2,579ms	37,11%	-
10	177	243,9Hz	4,1ms	1,265ms	2,835ms	30,86%	-
11	189	243,9Hz	4,1ms	1,057ms	3,043ms	25,78%	-
12	195	243,9Hz	4,1ms	1,089ms	3,011ms	26,56%	187
13	204	243,9Hz	4,1ms	0,945ms	3,155ms	23,05%	196
14	210	243,9Hz	4,1ms	0,8649ms	3,235ms	21,09%	202
15	217	243,9Hz	4,1ms	0,6888ms	3,412ms	16,8%	212

A/A	Value	f	T	t <sub>ON</sub>	t <sub>OFF</sub>	DutyCycle	Διόρθωση
16	228	243,9Hz	4,1ms	0,5285ms	3,572ms	12,89%	223
17	234	243,9Hz	4,1ms	0,4325ms	3,668ms	10,55%	229
18	241	243,9Hz	4,1ms	0,2723ms	3,828ms	6,64%	238
19	252	243,9Hz	4,1ms	0,1442ms	3,965ms	3,52%	249
20	255	243,9Hz	4,1ms	0	4,1ms	0%	-

**Πίνακας 2:** Αντιστοιχία τάσης μπαταρίας-χρόνου αγωγής στη χαμηλή συχνότητα λειτουργίας

Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται η μεταβολή του χρόνου t<sub>on</sub> συναρτήσει της τάσης της μπαταρίας.



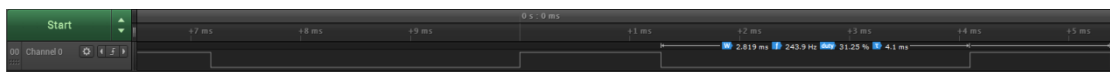
**Σχήμα 42:** T<sub>on</sub>(ms)-Battery(V), f=243.9 Hz

Στο κομμάτι από 4.5V έως 6 V φαίνεται η διόρθωση που κάνουμε.

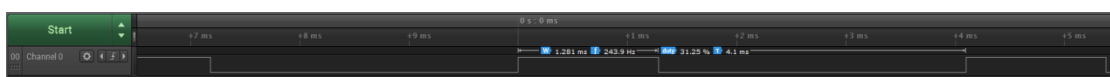
Η έξοδος του λογικού αναλυτή για τιμή μπαταρίας 1,8515 V (digital 79) και κύκλο εργασίας 100%-31,25%=68,75%

Υπενθυμίζεται ότι το τρανζίστορ άγει με 0.

**Χρόνος ON:**



**Χρόνος OFF:**

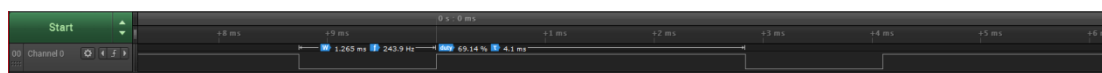


**Σχήμα 43:** Κανάλι λογικού αναλυτή, V=1.85 V, f=243.9 Hz

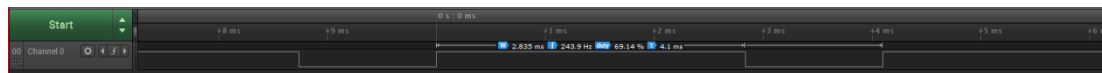
Η έξοδος του λογικού αναλυτή για τιμή μπαταρίας 4,148 V (digital 177) και κύκλο εργασίας 100%-69,14%=30,86%

Υπενθυμίζεται ότι το τρανζίστορ άγει με 0.

**Χρόνος ON:**



**Χρόνος OFF:**



**Σχήμα 44:**Κανάλι λογικού αναλυτή,  $V=4.14\text{ V}$ ,  $f=243.9\text{ Hz}$

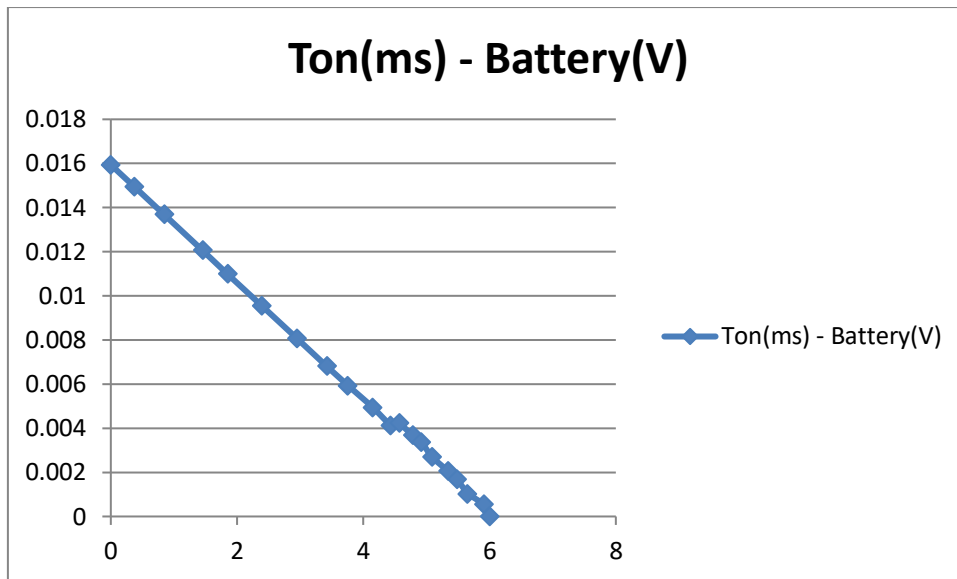
#### 4.6.2 Υψηλή Συχνότητα Λειτουργίας

Για την παρακάτω συχνότητα λειτουργίας(62,5 Hz) δε χρησιμοποιήθηκε κάποιος prescaler.

A/A	Value	f	T	t <sub>ON</sub>	t <sub>OFF</sub>	DutyCycle	Διόρθωση
1	0	62,5kHz	0,016ms	0,015938ms	6,24E-05	99,61%	-
2	16	62,5kHz	0,016ms	0,014938ms	0,001062ms	93,36%	-
3	36	62,5kHz	0,016ms	0,013688ms	0,002312ms	85,55%	-
4	62	62,5kHz	0,016ms	0,012062ms	0,003938ms	75,39%	-
5	79	62,5kHz	0,016ms	0,011ms	0,005ms	68,75%	-
6	102	62,5kHz	0,016ms	0,009562ms	0,006438ms	59,76%	-
7	126	62,5kHz	0,016ms	0,008062ms	0,007938ms	50,39%	-
8	146	62,5kHz	0,016ms	0,006813ms	0,009187ms	42,58%	-
9	160	62,5kHz	0,016ms	0,005938ms	0,010062ms	37,11%	-
10	177	62,5kHz	0,016ms	0,004938ms	0,011062ms	30,86%	-
11	189	62,5kHz	0,016ms	0,004125ms	0,011875ms	25,78%	-
12	195	62,5kHz	0,016ms	0,00425ms	0,01175ms	26,56%	187
13	204	62,5kHz	0,016ms	0,003688ms	0,012312ms	23,05%	196
14	210	62,5kHz	0,016ms	0,003374ms	0,012626ms	21,09%	202
15	217	62,5kHz	0,016ms	0,002688ms	0,013312ms	16,8%	212
16	228	62,5kHz	0,016ms	0,002062ms	0,013938ms	12,89%	223
17	234	62,5kHz	0,016ms	0,001688ms	0,014312ms	10,55%	229
18	241	62,5kHz	0,016ms	0,001024ms	0,014976ms	6,64%	238
19	252	62,5kHz	0,016ms	0,000563ms	0,015437ms	3,52%	249
20	255	62,5kHz	0,016ms	0	4,1ms	0%	-

**Πίνακας 3:** Αντιστοιχία τάσης μπαταρίας-χρόνου αγωγής στη χαμηλή συχνότητα λειτουργίας

Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται η μεταβολή του χρόνου t<sub>on</sub> συναρτήσει της τάσης της μπαταρίας.



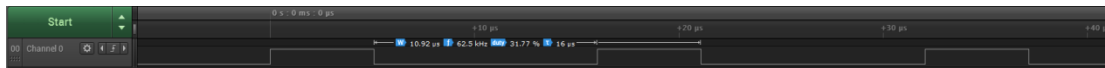
**Σχήμα 45:** Ton(ms)-Battery(V),  $f=62.5$  kHz

Στο κομμάτι από 4.5V έως 6 V φαίνεται η διόρθωση που κάνουμε.

Η έξοδος του λογικού αναλυτή για τιμή μπαταρίας 1,8515 V (digital 79) και κύκλο εργασίας 100%-31,77%=68,23%

Υπενθυμίζεται ότι το τρανζίστορ άγει με 0.

#### Χρόνος ON:



#### Χρόνος OFF:



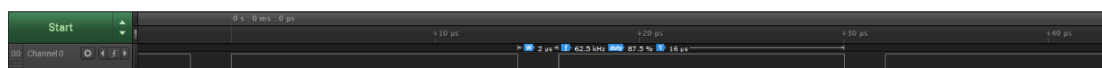
**Σχήμα 46:**Κανάλι λογικού αναλυτή,  $V=1.85$  V,  $f=243.9$  Hz

Η έξοδος του λογικού αναλυτή για τιμή μπαταρίας 5,343 V (digital 228) και κύκλο εργασίας 100%-87,5%=12,5%.

Η τάση αυτή έχει υποστεί διόρθωση από τον αλγόριθμο και το διάστημα αγωγής που δίνει ο μικροελεγκτής είναι για τάση 5,226 V.

Υπενθυμίζεται ότι το τρανζίστορ άγει με 0.

## Χρόνος ON:



## Χρόνος OFF:



Σχήμα 47:Κανάλι λογικού αναλυτή,  $V=5.34\text{ V}$ ,  $f=243.9\text{ Hz}$

## 4.7 Συσσωρευτές

### 4.7.1 Φόρτιση Συσσωρευτών

Για την φόρτιση συσσωρευτών απαιτείται η σύνδεση τους σε μια ηλεκτρική πηγή. Ο θετικός πόλος συνδέεται με το θετικό πόλο της μπαταρίας ενώ ο αρνητικός πόλος με τον αρνητικό. Η τάση της πηγής πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την τάση του φορτίου που στην περίπτωση μας είναι μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία ή κοινώς μια μπαταρία μολύβδου.

Η φόρτιση γίνεται πάντα με συνεχές ρεύμα DC.Φόρτιση με εναλλασσόμενο ρεύμα δεν υφίσταται.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι φόρτισης:

-με σταθερή τάση-φθίνουσα ένταση. Συναντάται συνήθως στους συσσωρευτές μολύβδου.

-με σταθερή ένταση. Συναντάται συνήθως στους συσσωρευτές τύπου Ni-Cd και Ni-MH.

-με σταθερή τάση και ελεγχόμενη ως προς το μέγιστο ένταση. Συναντάται στη φόρτιση μπαταριών λιθίου.

-με μεταβαλλόμενη τάση-μεταβαλλόμενη ένταση. Συναντάται στη γρήγορη φόρτιση μπαταριών Ni-Cd.Στην αρχή της φόρτισης η ένταση είναι μεγάλη και σταδιακά μειώνεται.

-με σταθερή ένταση σε δόσεις. Είναι το ονομαζόμενο tickle charging όπου γίνεται συντήρηση του φορτίου μιας ήδη φορτισμένης μπαταρίας.

-με παλμούς. Ένας διακόπτης ανοιγοκλείνει συνεχώς και το ρεύμα περνάει με παλμούς.

-με τη μέθοδο "reflex".Σε αυτή τη μέθοδο ο φορτιστής στέλνει μια θετική παλμοσειρά και παρεμβάλλει κάθε τόσο έναν αρνητικό παλμό. Με τον τρόπο αυτό διαλύει τις φουσαλίδες που κάθονται στα ηλεκτρόδια.

Σημαντικό ρόλο στη φόρτιση παίζουν η ένταση και ο χρόνος. Ο συνδυασμός των δυο αυτών παραμέτρων μας δίνει την κλασσική φόρτιση, την «γρήγορη» φόρτιση και την «ταχεία» φόρτιση.

Η «κλασσική» φόρτιση(C/10 Rate Charge) επιτυγχάνεται με ένταση ίση με το ένα δέκατο της ονομαστικής τιμής της χωρητικότητας C. Για παράδειγμα μια μπαταρία των 400 mAh φορτίζεται με ένταση 40 mA.Ο χρόνος της κλασσικής φόρτισης είναι 14-16 ώρες. Λόγω θερμικών απωλειών μόνο το 60% της έντασης που παρέχει ο φορτιστής μένει στη μπαταρία. Για το λόγο αυτό δίνεται ένα χρονικό περιθώριο της τάξης του 40-60% στη φόρτιση.

Η «γρήγορη» φόρτιση(Quick Charge) επιτυγχάνεται ένταση ίση με το ένα πέμπτο της ονομαστικής τιμής της χωρητικότητας C,δηλαδή με ένταση διπλάσια από την ένταση της κλασσικής φόρτισης. Η φόρτιση αυτή αφορά συσσωρευτές τύπου Ni-Cd και Ni-MH.

Η «ταχεία» φόρτιση (Fast Charge) επιτυγχάνεται με τη φόρτιση της μπαταρίας σε λιγότερο από μία ώρα χρησιμοποιώντας εντάσεις από C έως 3C.Η φόρτιση αυτή αφορά ειδικά κατασκευασμένες μπαταρίες που φέρουν την ανάλογη ένδειξη. Απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί ο φορτιστής να έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύει το τέλος της φόρτισης και να τη διακόπτει αυτόματα. Η διακοπή αυτή γίνεται συνήθως με ανιχνευτή της κορυφής Δ, με αισθητήρα θερμοκρασίας ή με χρονοδιακόπτη.

#### 4.7.2 Επιλογή Συσσωρευτή

Ο συσσωρευτής που επιλέχθηκε είναι μια μπαταρία μόλυβδου της εταιρίας Yes. Τα χαρακτηριστικά της είναι 6 V – 2.8 Ah και η αντίσταση πάρα πολύ μικρή. Ο τύπος φόρτισης που υλοποιήθηκε είναι pulsed charging με σταθερή τάση και φθίνουσα ένταση και για το λόγο αυτό είναι και αρκετά ασφαλής μιας και το μέσο ρεύμα μειώνεται με την αύξηση της τάσης της μπαταρίας. Η διακοπή της φόρτισης γίνεται μέσα από το πρόγραμμα του μικροελεγκτή.

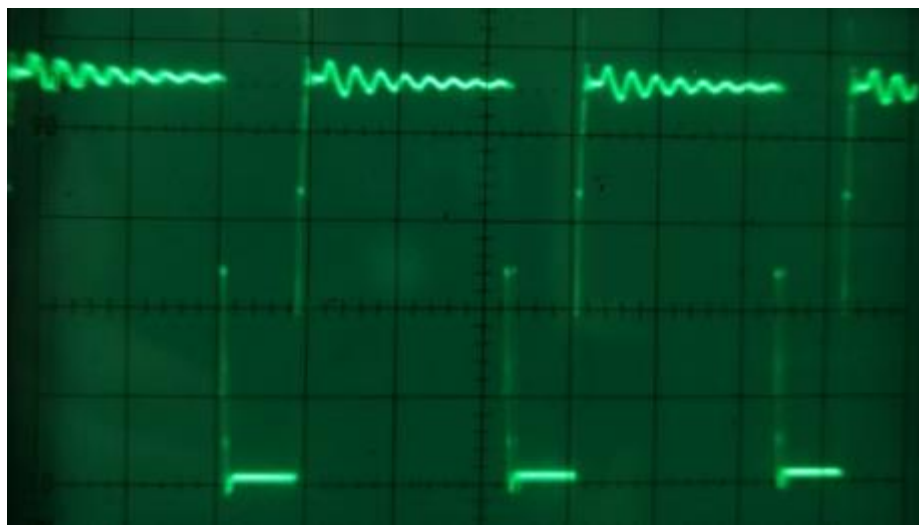
## 5 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ DC-DC ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ

### 5.1 Αποτελέσματα

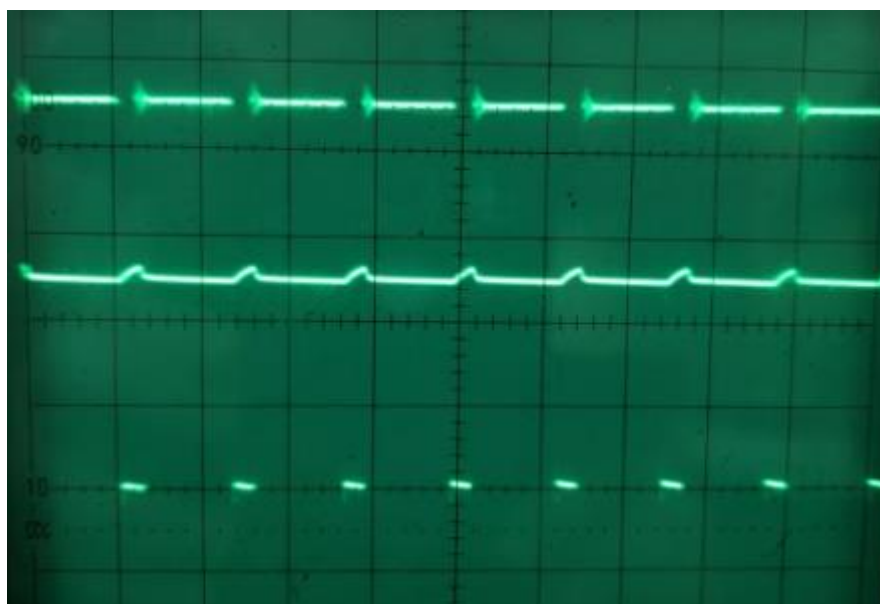
Στο σημείο αυτό εφόσον έχουν ελεγχθεί μεμονωμένα η λειτουργία των επιμέρους κομματιών της εργασίας μπορεί να γίνει η σύνδεση και να προχωρήσει η υλοποίηση.

Για τον έλεγχο της της PWM χρησιμοποιήθηκε το πρώτο κανάλι του παλμογράφου ενώ για τον έλεγχο της τάσης το δεύτερο.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η παλμοσειρά της PWM για συχνότητα ίση με 62,5 kHz. Λόγω της ταλάντωσης του κυκλώματος παρουσιάζει κάποιο «παίξιμο» το σύστημα. Επίσης η συχνότητα είναι πολύ υψηλή.

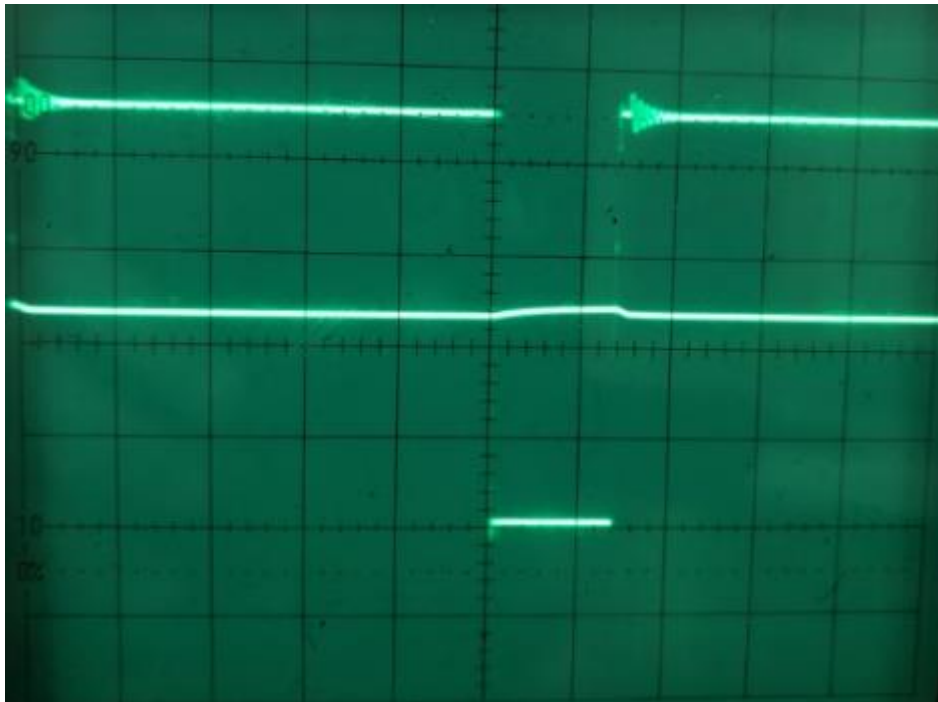


**Σχήμα 48:** PWM,  $f=62.5$  kHz

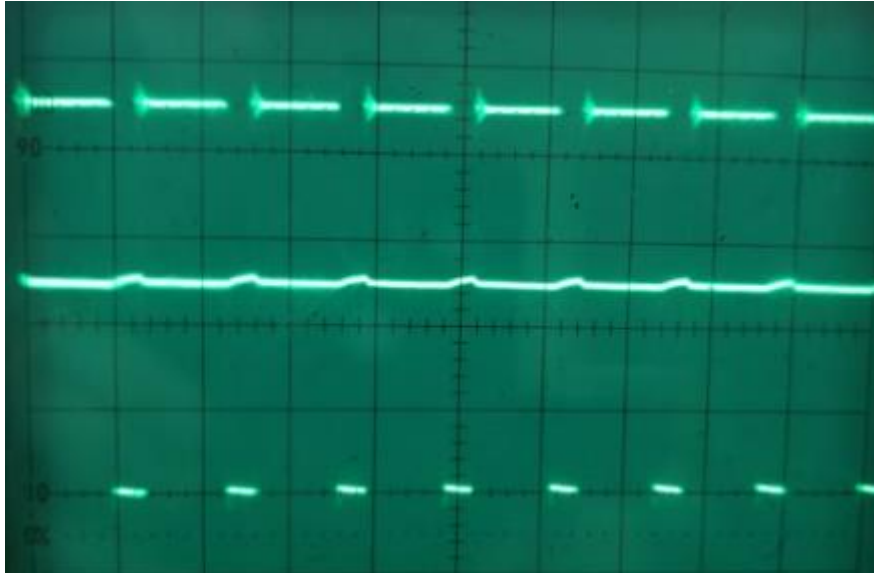


**Σχήμα 49:** PWM-τάση μπαταρίας,  $f=7812.5$  Hz

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται η PWM και η τάση της μπαταρίας που αυξάνεται στιγμιαία κάθε φορά που το τρανζίστορ άγει. Υπενθυμίζεται πώς το τρανζίστορ άγει με 0. ( $T=0.128\text{ ms}$ ,  $t_{on}=0.25\text{ms}$  κατά προσέγγιση)



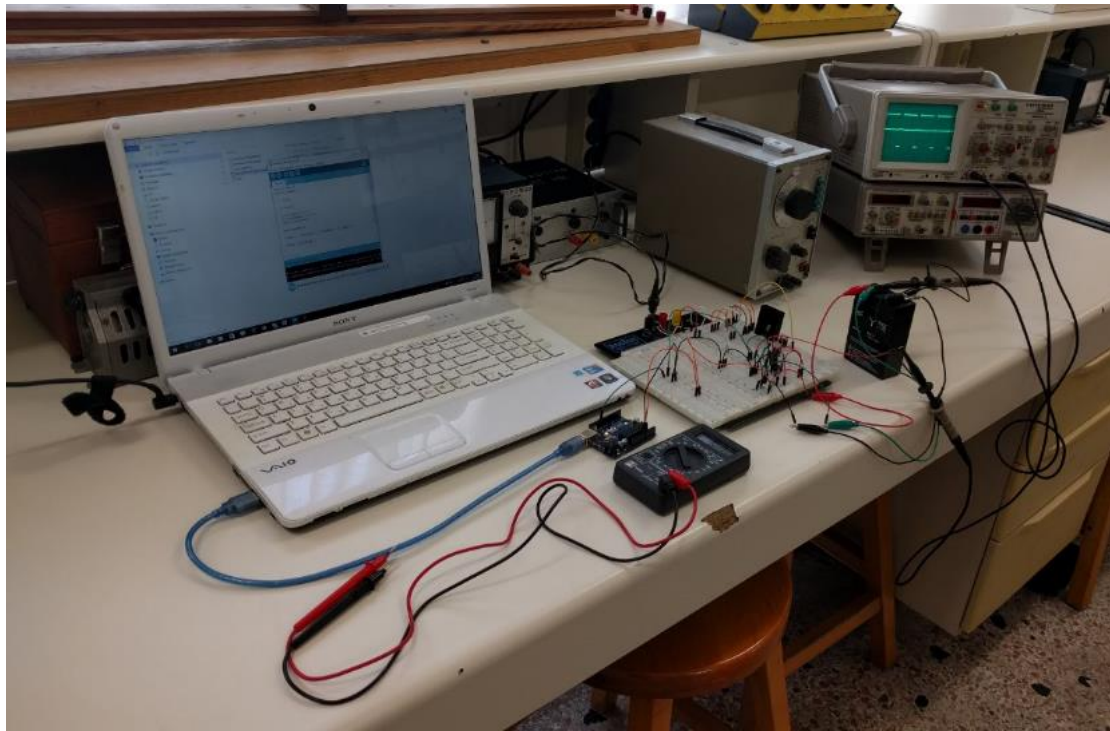
**Σχήμα 50:**Λεπτομέρεια αύξησης τάσης,  $f=7812.5\text{ Hz}$



**Σχήμα 51:**Διόρθωση παλμού

Στο παραπάνω σχήμα γίνεται αύξηση του διαστήματος αγωγής. Για καλύτερη εποπτεία μπορεί να γίνει και σύγκριση με το σχήμα 40.





**Σχήμα 52:** Σύστημα εργασίας

## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο κύριος άξονας της εργασίας αυτής ήτανε μοντελοποίηση ενός μετατροπέα για τη φόρτιση μπαταριών τάσης 6 V. Στην προσομοίωση στο πρόγραμμα PSIM ο μετατροπέας δοκιμάστηκε σε χαμηλές και υψηλές συχνότητες λειτουργίας. Παρατηρήθηκε ότι σε υψηλότερες συχνότητες λειτουργίας το ρεύμα φόρτισης σταθεροποιείται γύρω από κάποια τιμή. Το ρεύμα του πηνίου δεν προλαβαίνει να μηδενιστεί και σε συνδυασμό με τον πυκνωτή εξομάλυνσης μας δίνει την επιθυμητή σταθερή έξοδο. Το MOSFET ισχύος που χρησιμοποιήθηκε μπόρεσε να ανταπεξέλθει σε αυτές τις συχνότητες λειτουργίας. Στην προσομοίωση στο πρόγραμμα Matlab-Simulink έγινε αντιληπτό ότι λόγω των απωλειών ισχύος στο κύκλωμα η έξοδος παρουσιάζει κάποια απόκλιση από την επιθυμητή τιμή και για την ομαλή λειτουργία απαιτείται ρύθμιση PI.

Για την ανάγνωση της τάσης της μπαταρίας από τον μικροελεγκτή ATmega328P με ασφάλεια και μικρές απώλειες ισχύος υλοποιήθηκε ένας διαιρέτης τάσης. Η παραγωγή της PWM έγινε με χρήση ενός μετρητή/χρονιστή των 8 bits. Μοναδικό πταίσμα αποτέλεσε ότι έπρεπε να χρησιμοποιηθεί μια συνάρτηση μετατροπής της μέτρησης σε τιμή των 8 bits. Χρονικά αυτό δεν αποτέλεσε ιδιαίτερο πρόβλημα. Το παραγόμενο PWM επαληθεύτηκε με χρήση λογικού αναλυτή.

Κατά την υλοποίηση παρατηρήθηκε ότι το κύριο χαρακτηριστικό στη φόρτιση αυτού του τύπου είναι πώς προστατεύεται η μπαταρία καθώς το ρεύμα φόρτισης μειώνεται όσο η τάση της μπαταρίας προσεγγίζει την τάση αναφοράς. Αυτό βεβαίως έχει ως συνέπεια την πιο αργή φόρτιση της μπαταρίας. Για να ξεπεραστεί το εμπόδιο αυτό καθώς το πρόβλημα των απωλειών του κυκλώματος τροποποιήθηκε ο κώδικας έτσι ώστε όταν η τάση της μπαταρίας βρίσκεται στο διάστημα 4,5-6V ο μικροελεγκτής να αυξάνει το χρόνο αγωγής του τρανζίστορ ισχύος με αποτέλεσμα μια γρηγορότερη φόρτιση. Επίσης, η διακοπή της φόρτισης μέσω του μικροελεγκτή αποτελεί οικονομικότερη λύση έναντι αισθητηρίου θερμοκρασίας ή χρονοδιακόπτη.

Συμπερασματικά θα έλεγε κανείς ότι με την υλοποίηση που έγινε μπορούν να φορτιστούν μπαταρίες με ασφάλεια χρησιμοποιώντας απλά υλικά και χωρίς ιδιαίτερο κόστος.

## 7 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΘΗΚΕΣ

Κατά την μοντελοποίηση και εξομοίωση των DC-DC μετατροπέων υπάρχουν κάποιες βελτιώσεις και προσθήκες οι οποίες θα μπορούσαν να γίνουν. Αυτές περιγράφονται συνοπτικά στις επόμενες παραγράφους.

Θα μπορούσε να γίνει μια εξέλιξη του αλγορίθμου ώστε κατά τη δειγματοληψία να μην “τρέχει” ο αλγόριθμος. Το ADC για τη μέτρηση θα γίνεται όταν είναι ενεργοποιημένο το συγκεκριμένο Sleep Mode. Η διακοπή ολοκλήρωσης μετατροπής ADC θα ξεκινάει τον αλγόριθμο. Το κέρδος από αυτή τη διαδικασία θα είναι η μείωση του θορύβου στις γραμμές του μικροελεγκτή κατά τη μέτρηση της τάσης της μπαταρίας.

Στην ίδια κατεύθυνση θα μπορούσαν να καλυφθούν τα εξαρτήματα με barriers ώστε να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα του θορύβου από τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.

Επίσης, όταν η μπαταρία είναι σε λειτουργία εκφόρτισης θα μπορούσε να προστεθεί ένα Real Time Clock (RTC) σε συνδυασμό με ένα data logger και να γίνει μια καταγραφή του ρυθμού φόρτισης της μπαταρίας για τα διαστήματα που μας ενδιαφέρουν. Κατόπιν με τα αποτελέσματα θα μπορούσε να γίνει κάποιο διάγραμμα χρόνου-τάσης. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορούσε κάποιος εκ των προτέρων να γνωρίζει πόσο χρόνο θα χρειαστεί ώστε να φορτίσει η μπαταρία του.

## 8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Muhammad H. Rashid (2010). Power Electronics. Circuits, Devices and Applications (Third Edition).
2. Albert Malvino, David J. Bates (2006). Electronic Principles (Seventh Edition).
3. Atmel (2015). 8-bit Microcontroller with 4/8/16/32Kbytes In-System Programmable Flash.
4. A.J. Forsyth, S.V. Mollov (1998). Modelling and Control of DC-DC Converters.
5. B. Echardt, A. Hofmann, S. Zeltner, M. Maerz (2005). Automotive Powertrain DC/DC Converter with 25 kW/dm<sup>3</sup> by Using SiC Diodes.
6. Christophe Batard, Frederic Poitiers, Christophe Millet and Nicolas Ginot (2012). Simulation of Power Converters Using Matlab-Simulink.
7. Φώτιος Στεργιόπουλος (2015). Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Ισχύος.
8. Ιορδάνης Κιοσκερίδης (2008). Ηλεκτρονικά Ισχύος.
9. Νίκος Κολλιόπουλος, Ηλίας Λόης (2004). Ηλεκτροτεχνία 1 (6<sup>η</sup> έκδοση).
10. Stephen J. Chapman (1985). Electric Machinery Fundamentals.
11. Νίκος Ι. Μάργαρης (1996). Ηλεκτρονικά Ισχύος.
12. Zheng Zhang (2012). Design of a 22V~32V-to-15V DC/DC Power Converter under Input and Load Variations.
13. Μαρία-Ευσταθία Τσιούρβα (2013). Αρμονικές και Ποιότητα Ισχύος.
14. Γεώργιος Πολίτης (2000). Ηλεκτρονικά Ισχύος Γ' ΕΠΑΛ.
15. Arduino <http://www.arduino.cc/en/Tutorial/HomePage>
16. Powersim Software <http://www.powersim.com>
17. Matlab-Simulink <http://www.mathworks.com/products/simulink/>