

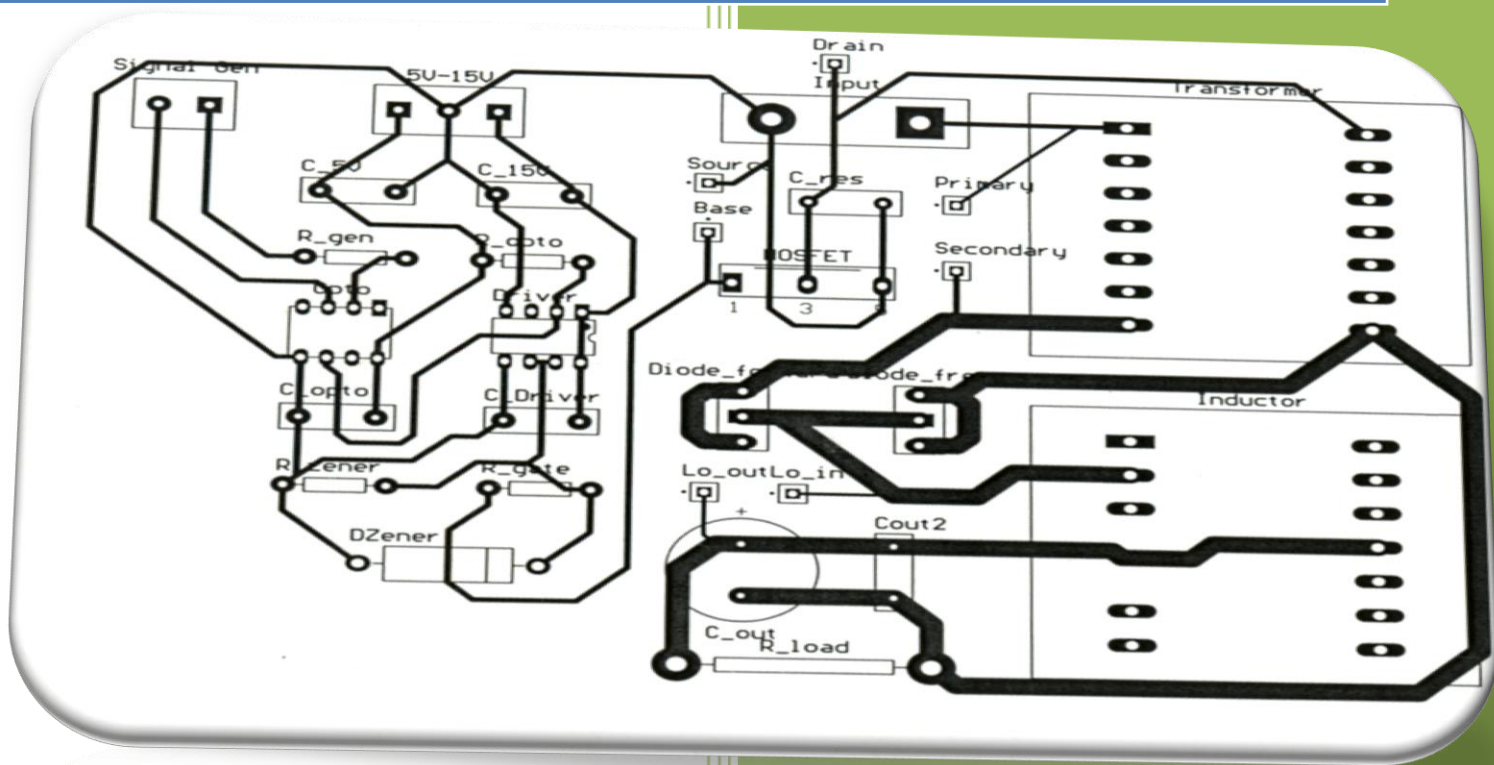


Τ.Ε.Ι. Κρήτης

Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών

Τμήμα Ηλεκτρολογίας

# Ανάλυση και κατασκευή διακοπτικού μετατροπέα *Forward* με την τεχνική *Resonant Reset*.



Ματθαίος – Νικόλαος

Κολλάρος

Εισηγητής : Δρακάκης Εμμανουήλ

Ιούνιος 2012

# Ανάλυση και Κατασκευή Διακοπτικού Μετατροπέα Forward με την Τεχνική Resonant Reset.

---

## Εισαγωγή

Κάθε πτυχιακή εργασία έχει ως σκοπό τη σωστή διατύπωση των γνώσεων που κατέκτησε ο φοιτητής, κατά τη διάρκεια της ακαδημαϊκής του σταδιοδρομίας, στο εκάστοτε εκπαιδευτικό ίδρυμα. Αποτελεί ένα είδος εντριβής σε κάποιο συγκεκριμένο θέμα (π.χ. ένας μετατροπέας συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση, κατασκευή πλατφόρμας για την ανάλυση της πόλωσης των τρανζίστορ κ.τ.λ.) και δίνει την ευκαιρία στο φοιτητή να εμπλουτίσει τόσο την γνώση, όσο και την εμπειρία του, στο σωστά δομημένο τρόπο έρευνας και ανάλυσης του οποιουδήποτε προβλήματος. Αν τα χρόνια που πέρασε ένας φοιτητής στις αίθουσες με τους καθηγητές είναι “η σφύρα και ο άκμονας” που τον “σφυρηλάτησαν” σε έναν επαγγελματία ηλεκτρολόγο, τότε η πτυχιακή εργασία είναι “το ύδωρ που τον ψύχει και τον ατσαλώνει” σε έναν ακέραιο μηχανικό. Ως σωστός μηχανικός πλέον, ο φοιτητής καλείται όχι μόνο να κατανοήσει, αναλύσει και διατυπώσει σωστά το θέμα που ανέλαβε, αλλά και να αναφέρει τα συμπεράσματα και τις παραλήψεις του και πρωτίστως, να δήξει το δρόμο στους συναδέλφους που έπονται, αναφέροντας πιθανούς τρόπους βελτίωσης.

Στη συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία έγινε μία προσπάθεια να αναλυθούν περισσότερα από ένα θέματα (ανάλυση ενός διακοπτικού DC-DC μετατροπέα, χρήση ενός spice προγράμματος για την προσομοίωση ηλεκτρικών/ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και ανάλυση/κατασκευή διαφόρων μαγνητικών στοιχείων), τα οποία στο σύνολό τους αποτέλεσαν έναν ηράκλειο άθλο που για διάφορους λόγους δεν κατέσται δυνατό να ολοκληρωθεί στην πληρότητα του, αφήνοντας κάποια ανολοκλήρωτα σημεία. Το γεγονός αυτό όμως μοναχά κίνητρο αποτελεί. Κίνητρο για βελτίωση και για πρόοδο. Ένα ταξίδι τελείωσε με αυτή τη πτυχιακή εργασία! Χιλιάδες όμως δρόμοι ανοίγονται . . .

*Utopie'n Future !*

# Κεφάλαιο 1

## Ανασκόπηση Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων

---

### Εισαγωγή

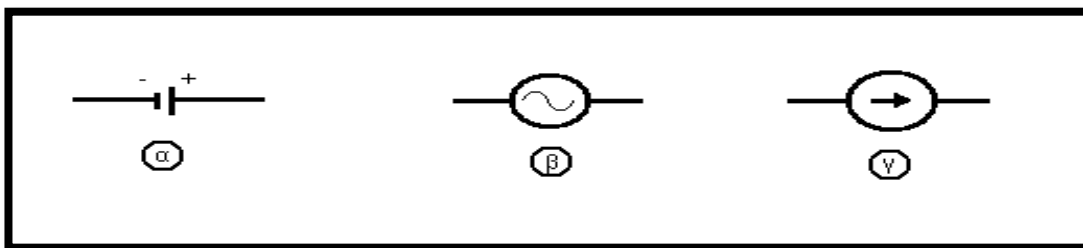
Από τα αρχαία χρόνια, ο άνθρωπος χρειάζεται ενέργεια. Ενέργεια για να ζεσταθεί, για να μαγειρέψει, για να μετακινηθεί. Στις μέρες μας, χρησιμοποιούμε την πιο εξευγενισμένη μορφή ενέργειας που έχουμε ανακαλύψει, την ηλεκτρική ενέργεια. Οι απαιτήσεις μας όμως, αυξάνονται καθημερινά μαζί με τον πληθυσμό της γης, την ποιότητα ζωής των ανθρώπων, την ανάγκη για έρευνα κτλ. Λόγω των παραπάνω έχουμε διαφόρων ειδών φορτία, που απαιτούν διαφορετικές τροφοδοσίες (όπως AC και DC τάση, τριφασικά και μονοφασικά φορτία) διαφορετικών τιμών (5, -5, 12 Vdc, 230, 110 Vac κτλ.) τις οποίες πρέπει να προσφέρουμε στον καταναλωτή. Συνοψίζοντας τα παραπάνω, είναι φανερό ότι τόσο η μεταφορά όσο και η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να γίνεται με όσο το δυνατόν λιγότερες απώλειες έτσι ώστε να εκμεταλλευόμαστε στο έπακρο τις δυνατότητες παραγωγής. Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι, μια γενική ανασκόπηση κάποιων βασικών ορισμών και εννοιών της θεωρίας των ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Θα εξηγηθούν πράγματα όπως τα παθητικά στοιχεία των κυκλωμάτων, οι διαφορές μεταξύ συνεχούς και εναλλασσομένου ρεύματος και η ανάλυση Fourier. Επίσης, θα εξηγηθούν συνοπτικά οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ηλεκτρικής ενέργειας.

## 1.1 - Βασικές Έννοιες Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων

### 1.1.1 - AC/DC

#### 1.1.1.α - Πηγές

Υπάρχουν δύο είδη πηγών ηλεκτρικής ενέργειας, οι πηγές τάσης και οι πηγές ρεύματος. Κάθε μια από αυτές μπορεί να προσφέρει εναλλασσόμενη ή σταθερή ηλεκτρική ενέργεια στο κύκλωμα. Όταν λέμε ότι ένα μέγεθος είναι σταθερό εννοούμε ότι διατηρεί την τιμή του σταθερή σε σχέση με το χρόνο, ενώ όταν λέμε ότι ένα μέγεθος είναι εναλλασσόμενο, εννοούμε ότι η τιμή του μεταβάλλεται με το χρόνο με κάποιο συγκεκριμένο τρόπο. Παρακάτω φαίνονται τα κυκλωματικά σύμβολα διαφόρων πηγών.



Εικόνα 1-1 α) Σύμβολο πηγής συνεχούς τάσης, β) σύμβολο πηγής εναλλασσόμενης τάσης, γ) Σύμβολο πηγής συνεχούς ρεύματος.

#### 1.1.1.β - Μέση και RMS τιμή Κυματομορφής

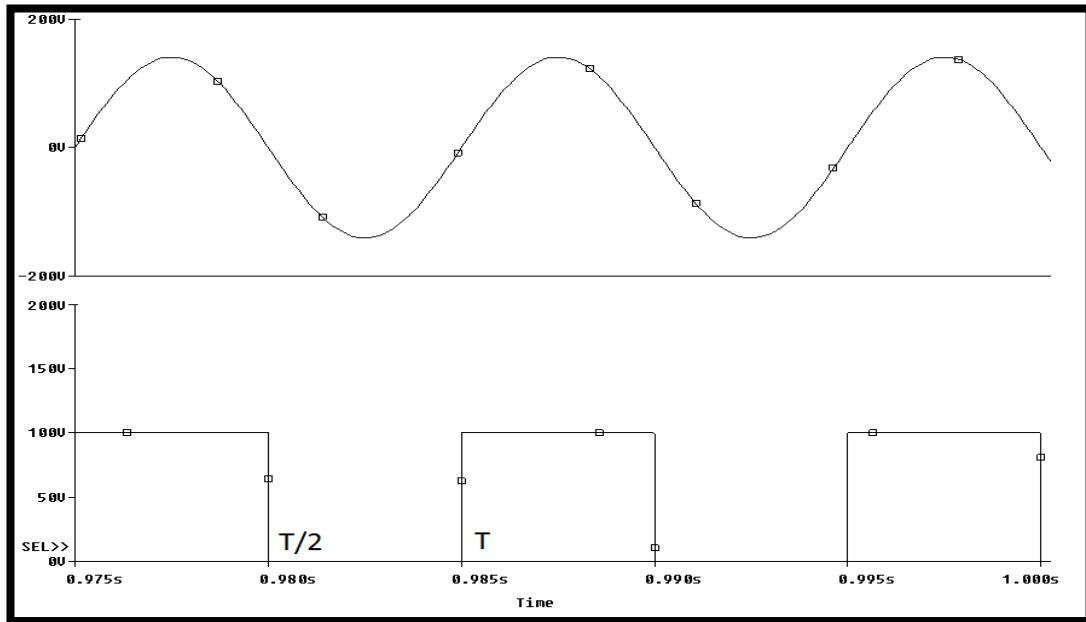
Όταν ασχολούμαστε με σταθερά μεγέθη για να υπολογίσουμε τις διάφορες τιμές ρεύματος και τάσης σε ένα κύκλωμα, χρησιμοποιούμε τις τιμές των πηγών αυτές καθ'αυτές διότι είναι σταθερές και αμετάβλητες στο χρόνο. Στην περίπτωση όμως της ανάλυσης ενός κυκλώματος με εναλλασσόμενα μεγέθη, δεν μπορούμε να πραγματοποιήσουμε την ίδια διαδικασία διότι οι τιμές μεταβάλλονται. Για αυτό ακριβώς το λόγο δημιουργήσαμε τους όρους *μέση τιμή* και *RMS τιμή* κυματομορφής.

Σε μια εναλλασσόμενη κυματομορφή ορίζουμε, ως μέση τιμή το ολοκλήρωμα της εξίσωσης της κυματομορφής αυτής διαιρεμένο με την περίοδο της. Ουσιαστικά βρίσκουμε τον “μέσο όρο” των τιμών που παίρνει. Υπάρχουν ορισμένα μεγέθη τα οποία έχουν μηδενική μέση τιμή. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι οι ημιτονοειδείς κυματομορφές. Για αυτές τις περιπτώσεις έχουμε ορίσει την RMS τιμή μιας Κυματομορφής. Το ακρώνυμο προέρχεται από τις αγγλικές λέξεις *Root-Mean-Square* η ελληνιστή *Ρίζα-Μέσου-Τετραγώνου*, όπως ακριβώς λέει το όνομα, βρίσκουμε την τετραγωνική ρίζα της μέσης τιμής των τετραγώνων των τιμών μιας κυματομορφής, μέγεθος το οποίο εξορισμού (τετράγωνο) είναι ένας θετικός αριθμός για όλα τα εναλλασσόμενα μεγέθη.

## Κεφάλαιο 1 Ανασκόπηση Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων.

Στη διεθνή βιβλιογραφία η μέση τιμή συμβολίζεται με μια παύλα πάνω από το μέγεθος ( $\bar{V}$ ,  $\bar{I}$  κτλ ...) ενώ η RMS τιμή με τον αντίστοιχο δείκτη ( $V_{RMS}$ ,  $I_{RMS}$  κτλ ...).

$$\bar{X} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt, \quad X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x(t)^2 dt}$$



Εικόνα 1-2 Ημιτονοειδής (πάνω) και τετραγωνική (κάτω) κυματομορφή.

Έστω οι κυματομορφές της εικόνας 1-2, μια ημιτονοειδής κυματομορφή  $V_{\eta\mu}$  (συχνότητα 100Hz, πλάτος 141.4V) και μια τετραγωνική κυματομορφή  $V_{\tau\epsilon\tau}$  (συχνότητα 100Hz, πλάτος 100V).

$$\begin{aligned} \bar{V}_{\eta\mu} &= \frac{1}{T} \int_0^T v_{\eta\mu(t)} dt \Rightarrow \bar{V}_{\eta\mu} = \frac{1}{T} \int_0^T 141,4 \eta\mu(\omega t) dt \Rightarrow \\ &\Rightarrow \bar{V}_{\eta\mu} = \frac{141,4}{T} [-\sigma\upsilon\nu(\omega t)]_0^T \Rightarrow \\ \Rightarrow \bar{V}_{\eta\mu} &= \frac{141,4}{0,01} [-\sigma\upsilon\nu(\omega * T)^1 + \sigma\upsilon\nu(\omega * 0)^1] \Rightarrow \bar{V}_{\eta\mu} = 1,414 * 0 \Rightarrow \boxed{\bar{V}_{\eta\mu} = 0V} \\ \bar{V}_{\tau\epsilon\tau} &= \frac{1}{T} \int_0^T v_{\tau\epsilon\tau(t)} dt \Rightarrow \bar{V}_{\tau\epsilon\tau} = \frac{1}{T} \left( \int_0^{\frac{T}{2}} 100 dt + \int_{\frac{T}{2}}^T 0 dt \right) \Rightarrow \\ \Rightarrow \bar{V}_{\tau\epsilon\tau} &= \frac{100}{T} \left( [t]_0^{\frac{T}{2}} + 0 \right) \Rightarrow \bar{V}_{\tau\epsilon\tau} = \frac{100}{T} \left( \frac{T}{2} - 0 \right) \Rightarrow \bar{V}_{\tau\epsilon\tau} = \frac{100}{T} * \frac{T}{2} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \boxed{\bar{V}_{\tau\epsilon\tau} = 50V} \end{aligned}$$

## Κεφάλαιο 1 Ανασκόπηση Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων.

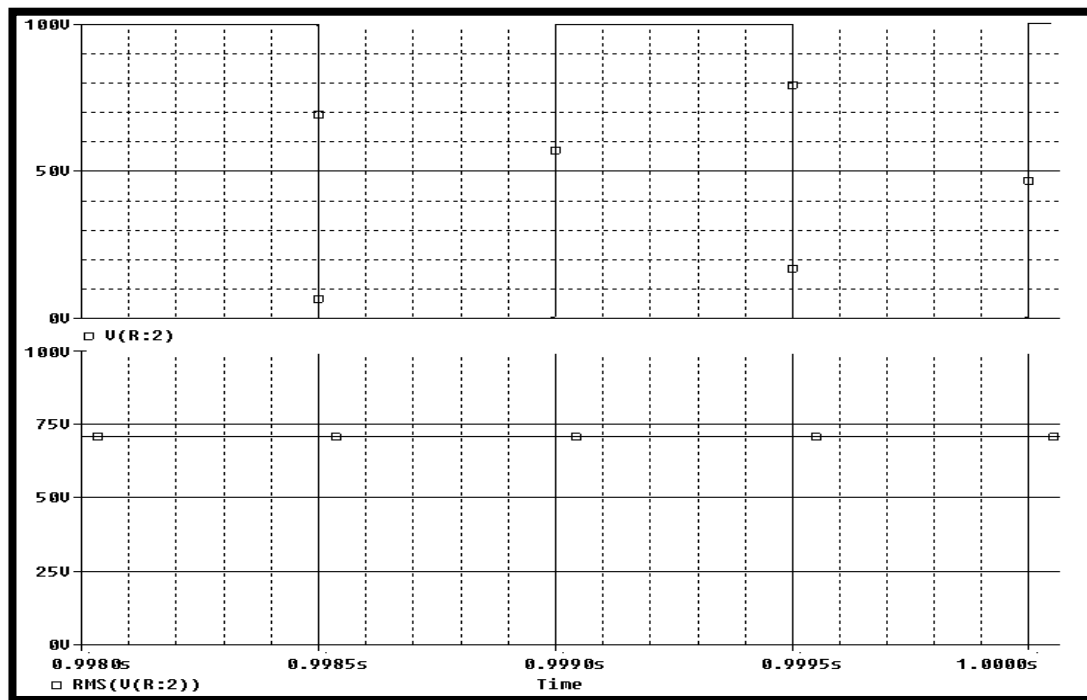
Από τους παραπάνω υπολογισμούς, είναι προφανές ότι η έννοια της μέσης τιμής δεν βοήθα σε κάποιες περιπτώσεις. Συγκεκριμένα στο παράδειγμα με την ημιτονοειδή κυματομορφή, εφόσον η μέση τιμή είναι ένας “μέσος όρος” και αφετέρου επειδή το ημίτονο λαμβάνει τόσες θετικές τιμές όσες και αρνητικές είναι λογικό το αποτέλεσμα να είναι μηδέν. Η έννοια της RMS τιμής όπως δείχνεται παρακάτω δεν έχει τέτοιους περιορισμούς.

$$\begin{aligned}
 V_{\eta\mu\text{RMS}} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_{\eta\mu(t)}^2 dt} \Rightarrow V_{\eta\mu\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (141,4 \eta\mu(\omega t))^2 dt} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow V_{\eta\mu\text{RMS}} = \sqrt{\frac{141,4^2}{T} \int_0^T (\eta\mu(\omega t))^2 dt} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow V_{\eta\mu\text{RMS}} = \sqrt{\frac{141,4^2}{2T} [\chi - \eta\mu(\omega t) \sigma\upsilon\nu(\omega t)]_0^T} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow V_{\eta\mu\text{RMS}} = \sqrt{\frac{141,4^2}{2T} [(T - \eta\mu(\omega T)^0 \sigma\upsilon\nu(\omega T)^1) - (0 - \eta\mu(\omega 0)^0 \sigma\upsilon\nu(\omega 0)^1)]} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow V_{\eta\mu\text{RMS}} = \frac{\sqrt[2]{141,4^2}}{\sqrt{2\sqrt{T}}} \sqrt{T} \Rightarrow V_{\eta\mu\text{RMS}} = \frac{141,4}{1,414} \dots \Rightarrow \\
 &\Rightarrow \boxed{V_{\eta\mu\text{RMS}} \approx 100\text{V}}
 \end{aligned}$$

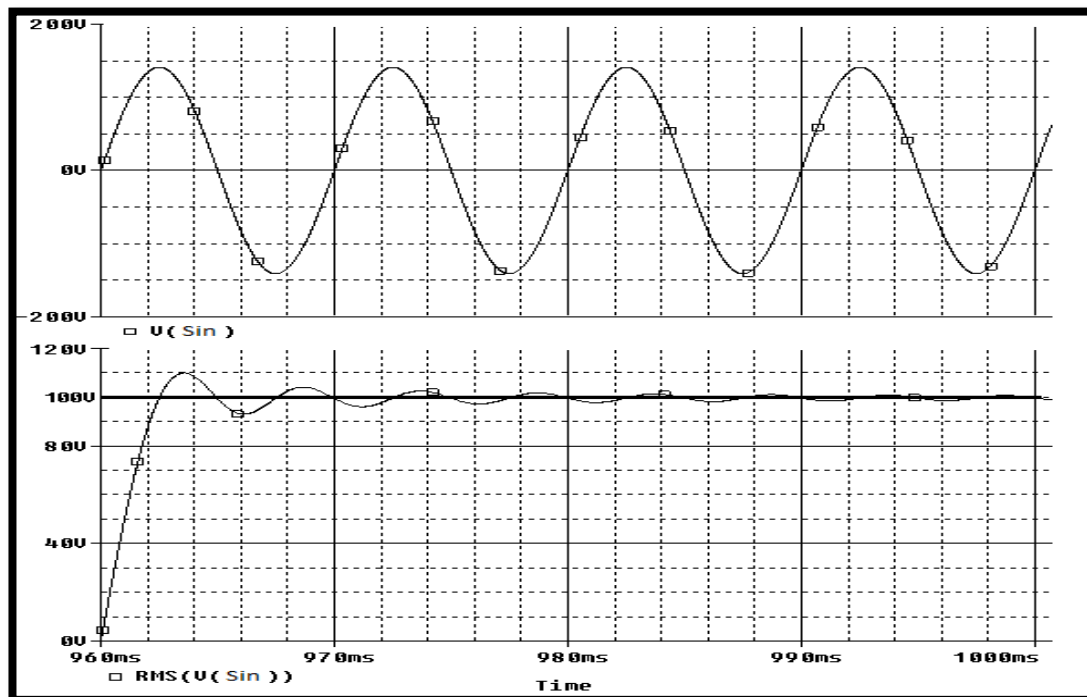
$$\begin{aligned}
 V_{\tau\epsilon\tau\text{RMS}} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_{\tau\epsilon\tau(t)}^2 dt} \Rightarrow V_{\tau\epsilon\tau\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \left( \int_0^{\frac{T}{2}} 100^2 dt + \int_{\frac{T}{2}}^T 0^2 dt \right)} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow V_{\tau\epsilon\tau\text{RMS}} = \sqrt{\frac{100^2}{T} [t]_0^{\frac{T}{2}}} \Rightarrow V_{\tau\epsilon\tau\text{RMS}} = \sqrt{\frac{100^2 T}{T} \frac{1}{2}} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow \boxed{V_{\tau\epsilon\tau\text{RMS}} = \frac{100}{\sqrt{2}} \text{V}}
 \end{aligned}$$

## Κεφάλαιο 1 Ανασκόπηση Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων.

Οι παραπάνω υπολογισμοί επιβεβαιώνονται από τις εικόνες 1-3~4



Εικόνα 1-3 Ημιτονοειδής κυματομορφή (Πάνω) και RMS τιμή αυτής (Κάτω).

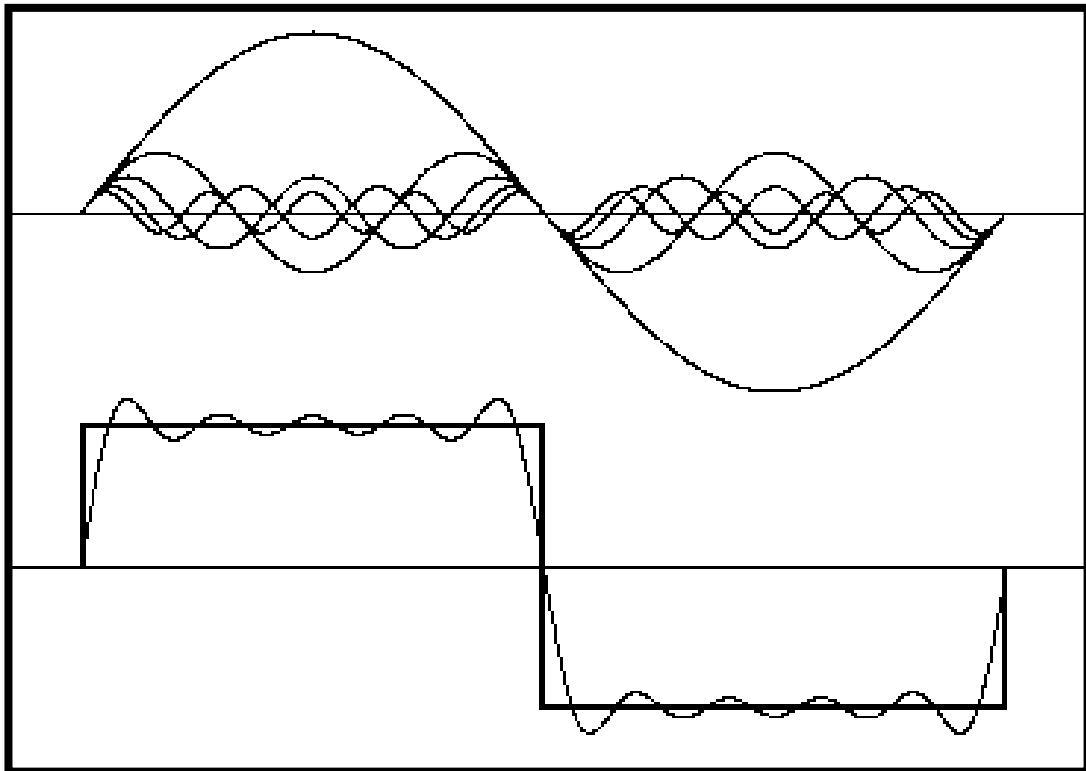


Εικόνα 1-4 Τετραγωνική κυματομορφή (Πάνω) και RMS τιμή αυτής (Κάτω).



### 1.1.1.γ - Ανάλυση Fourier

Κάθε μη ημιτονοειδής κυματομορφή συγκεκριμένης συχνότητας  $F$ , μπορεί να εκφραστεί σαν ένα πλήθος ημιτονικών και συνημιτονικών συντελεστών, διαφορετικής συχνότητας και πλάτους από την αρχική κυματομορφή. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι, στο κύκλωμα μας μπορούμε να θεωρήσουμε όχι τη μια αρχική κυματομορφή αλλά τις διάφορες αρμονικές της (ημιτονικοί και συνημιτονικοί συντελεστές). Περαιτέρω εξήγηση της ανάλυσης Fourier, είναι πέρα από τους στόχους αυτής της πτυχιακής εργασίας.



Εικόνα 1-5 Παράδειγμα κατασκευής τετραγωνικού παλμού από διάφορες ημιτονοειδείς συνιστώσες.

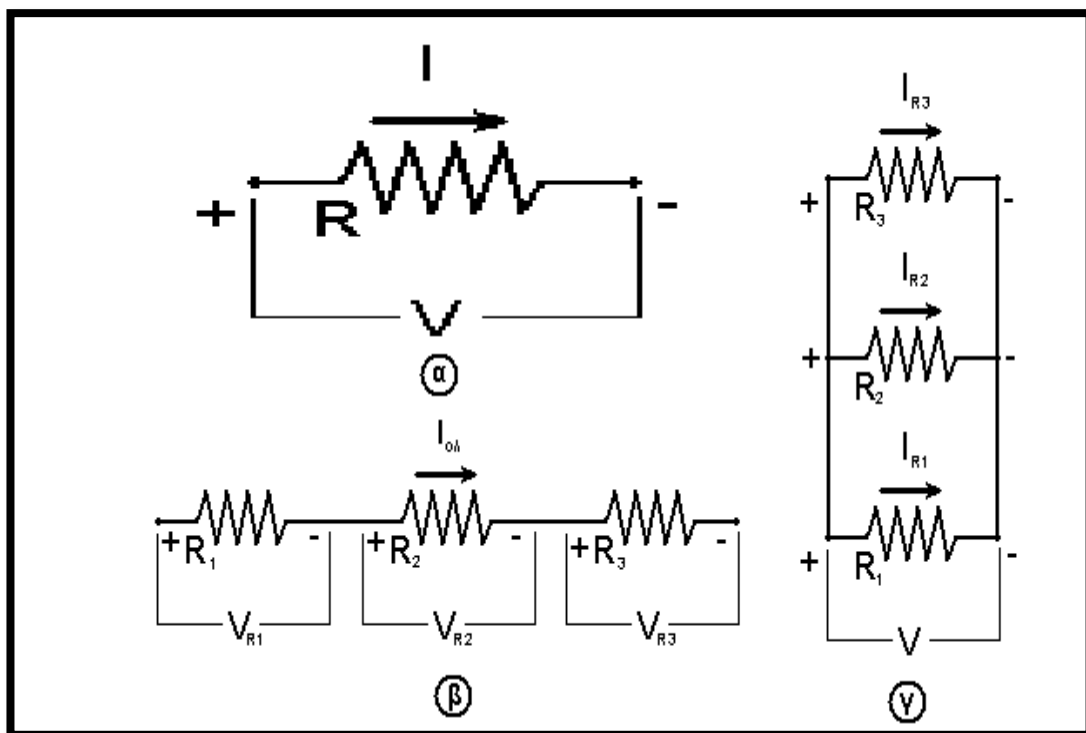
### 1.1.2 - Αντίσταση

Η αντίσταση είναι ένα στοιχείο του κυκλώματος, το οποίο καταναλώνει ενέργεια και για αυτόν ακριβώς το λόγο ανήκει στα παθητικά στοιχεία, μαζί με το πηνίο και τον πυκνωτή. Εφαρμόζοντας τάση στα άκρα μιας αντίστασης ένα ηλεκτρικό ρεύμα αρχίζει να τη διαρρέει, η τιμή του οποίου υπολογίζεται από τον νόμο του Ohm.

Ο νόμος του Ohm και οι παράγωγοι τύποι του  $V = I * R, \quad I = \frac{V}{R}, \quad R = \frac{V}{I}$

Όπου  $V$  η διαφορά δυναμικού σε **Volt**

$I$  η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος σε **Ampere** και  $R$  η αντίσταση σε **Ohm**



Εικόνα 1-6 α) σύμβολο αντίστασης, β) αντιστάσεις σε σειρά και γ) παράλληλα.

Επίσης, πρέπει να αναφερθεί ότι υπάρχουν ουσιαστικά δύο τρόποι σύνδεσης αντιστάσεων. Σύνδεση εν σειρά και σύνδεση παράλληλα όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.7 Όταν οι αντιστάσεις συνδέονται σε σειρά τότε η συνολική ισοδύναμη αντίσταση είναι το άθροισμα των επιμέρους αντιστάσεων

$$R_{ολ} = R_1 + R_2 + R_3$$

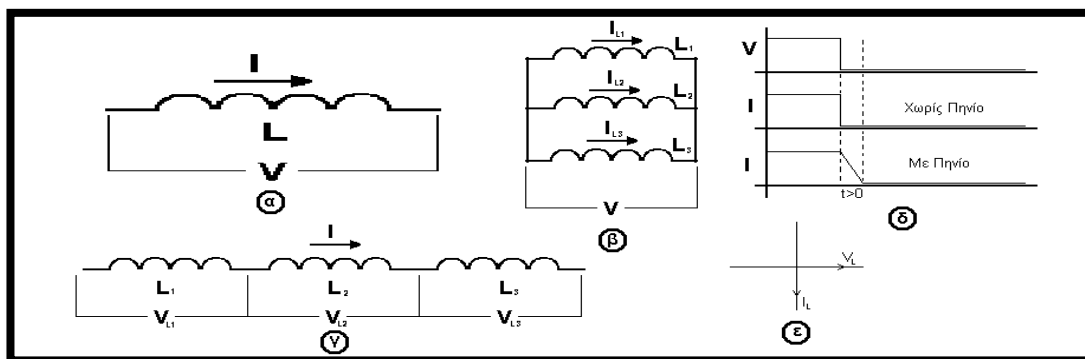
στην αντίθετη περίπτωση, η συνολική ισοδύναμη αντίσταση υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο

$$\frac{1}{R_{ολ}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

### 1.1.3 - Πηνίο

Το πηνίο είναι ένα παθητικό στοιχείο το οποίο, έχει τη θεμελιώδη ιδιότητα να μεταβάλει την τάση στα άκρα του ώστε να διατηρήσει σταθερό το ρεύμα που το διαρρέει. Το φαινόμενο αυτό το εκμεταλλευόμαστε σε διάφορες εφαρμογές, όπως τα φίλτρα εξομάλυνσης, τα χαμηλοπερατά φίλτρα και άλλα. Βασικό μέγεθος του πηνίου είναι η αυτεπαγωγή  $L$ , η οποία καθορίζεται από κατασκευαστικά χαρακτηριστικά όπως το υλικό του μαγνητικού πυρήνα, οι περιελίξεις και άλλα. Στο συνεχές ρεύμα το πηνίο αποτελεί ένα βραχυκύκλωμα, ενώ στο εναλλασσόμενο ρεύμα ισοδυναμεί με μια αντίσταση  $X_L$  της οποίας η τιμή εξαρτάται από τη συχνότητα της πηγής και την αυτεπαγωγή  $L$  του πηνίου.

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}, \quad X_L = 2\pi fL$$

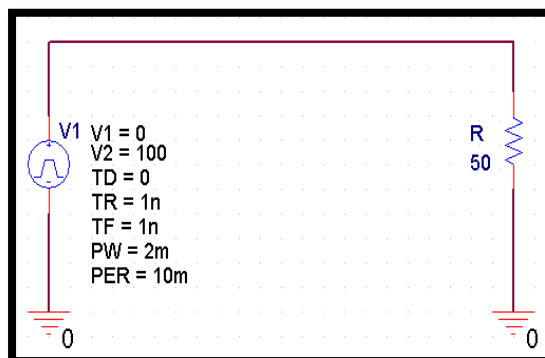


Εικόνα 1-7 α) Σύμβολο πηνίου, β) πηνία παράλληλα, γ) σε σειρά, δ) κυματομορφές μεταβολής ρεύματος με και χωρίς πηνίο, ε) στρεφόμενα διανύσματα.

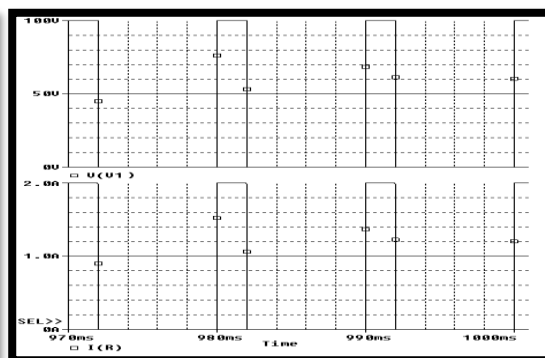
Τα πηνία αθροίζονται σε σειρά και παράλληλα όπως, οι αντιστάσεις δηλαδή

$$L_{\text{ολ}} = L_1 + L_2 + L_3 \text{ Σε Σειρά,} \quad \frac{1}{L_{\text{ολ}}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} \text{ Παράλληλα}$$

Παρακάτω φαίνονται δύο κυκλώματα, το πρώτο αποτελείται από μια πηγή τετραγωνικών παλμών και μια αντίσταση ενώ στο δεύτερο, προστίθεται ένα πηνίο. Με τη βοήθεια του Pspice προσομοιώνουμε τα δύο αυτά κυκλώματα και παρατηρούμε στο πρώτο ότι, το ρεύμα μεταβάλλεται στιγμιαία με τις βηματικές αλλαγές της πηγής.

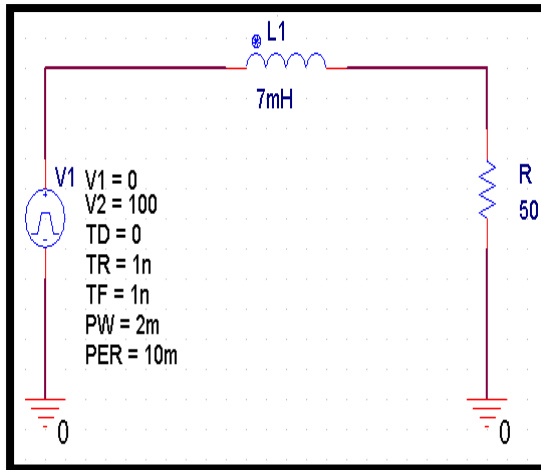


Εικόνα 1-8 Κύκλωμα σε Pspice με πηγή τετραγωνικών παλμών και αντίσταση.

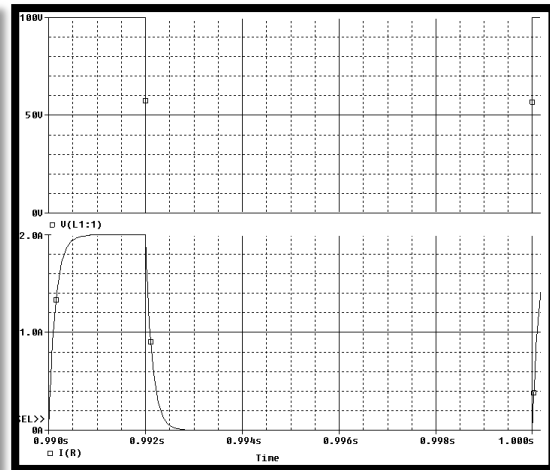


Εικόνα 1-9 Κυματομορφές τάσης (Πάνω) και ρεύματος (Κάτω).

## Κεφάλαιο 1 Ανασκόπηση Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων.



Εικόνα 1-10 Κύκλωμα Εικόνας 1.8 με προσθήκη πηνίου.

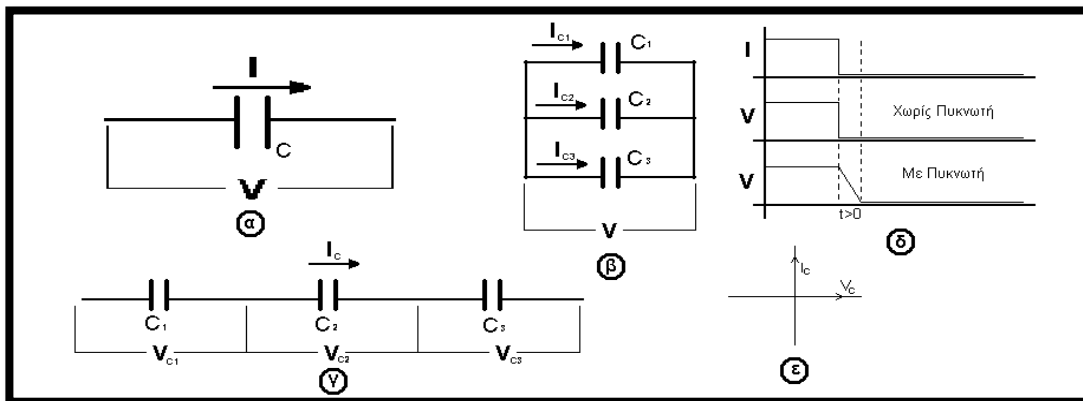


Εικόνα 1-11 Κυματομορφές τάσης (Πάνω) και ρεύματος (Κάτω).

Αντίθετα στο δεύτερο κύκλωμα, το πηνίο απαγορεύει στο ρεύμα να μεταβληθεί στιγμιαία.

### 1.1.4 - Πυκνωτής

Ο Πυκνωτής είναι ένα παθητικό στοιχείο, το οποίο έχει τη θεμελιώδη ιδιότητα να μεταβάλλει το ρεύμα που τον διαρρέει, ώστε να διατηρήσει σταθερή την τάση στα άκρα του.



Εικόνα 1-12 α) Σύμβολο πυκνωτή, β) πυκνωτές παράλληλα, γ) σε σειρά, δ) κυματομορφές μεταβολής τάσης με και χωρίς πυκνωτή, ε) στρεφόμενα διανύσματα.

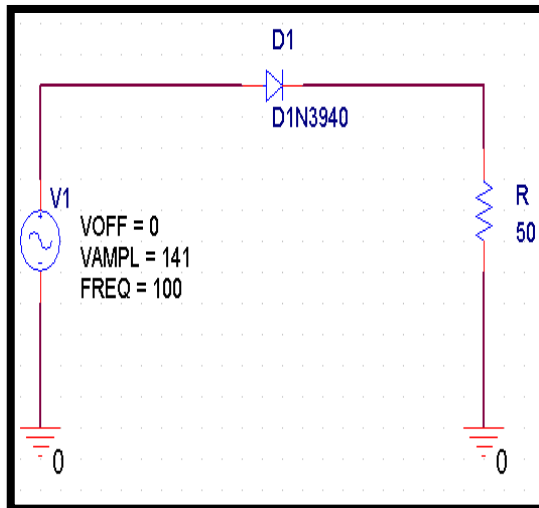
Το φαινόμενο αυτό το εκμεταλλευόμαστε σε διάφορες εφαρμογές, όπως τα φίλτρα. Η χωρητικότητα  $C$  συμβολίζει το ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί, η τιμή της είναι συνάρτηση διαφόρων κατασκευαστικών μεγεθών όπως, είναι η γεωμετρία των οπλισμών, η μεταξύ τους απόσταση, το διηλεκτρικό υλικό που υπάρχει ανάμεσά τους και άλλα. Στο συνεχές ρεύμα, ο πυκνωτής είναι ένα ανοιχτοκύκλωμα ενώ στο εναλλασσόμενο ισοδυναμεί με μια αντίσταση  $X_C$  της οποίας, η τιμή εξαρτάται από τη συχνότητα της πηγής του κυκλώματος και τη χωρητικότητα  $C$  του πυκνωτή.

## Κεφάλαιο 1 Ανασκόπηση Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων.

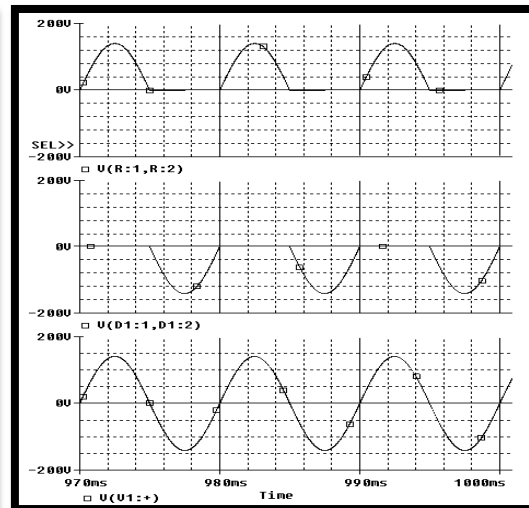
Ο πυκνωτής λειτουργεί αντίθετα από το πηνίο και την αντίσταση όταν συνδέεται σε σειρά και παράλληλα δηλαδή:

$$\frac{1}{C_{ολ}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \text{ Σε Σειρά,} \quad C_{ολ} = C_1 + C_2 + C_3 \text{ Παράλληλα}$$

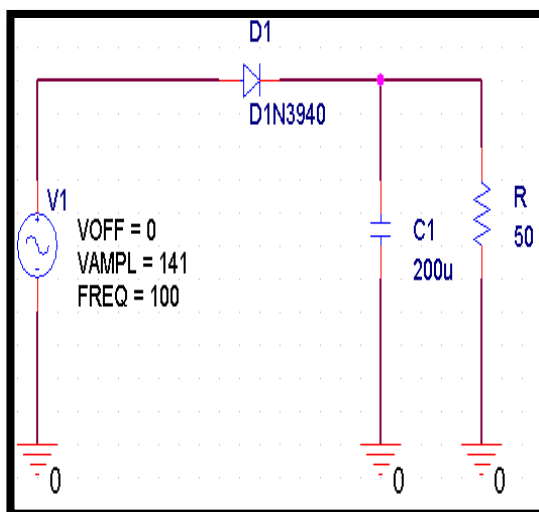
Πρώτα θα αναλυθεί με το Pspice ένα κύκλωμα ημιανόρθωσης.



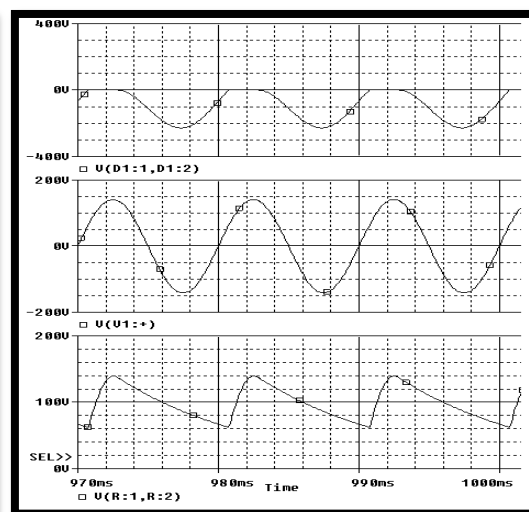
Εικόνα 1-13 Κύκλωμα ανορθωτή ημίσεως κύματος σε Pspice.



Εικόνα 1-14 Κυματομορφές τάσης του διπλανού κυκλώματος.



Εικόνα 1-15 Ανορθωτής Εικόνας 1.13 με προσθήκη πυκνωτή για εξομάλυνση της τάσης.



Εικόνα 1-16 Κυματομορφές τάσης του διπλανού κυκλώματος.

Όπως είναι φανερό από τις κυματομορφές, η τάση στο φορτίο είναι η μία ημιπερίοδος του ημιτόνου, κατά την οποία η δίοδος άγει. Προσθέτοντας όμως ένα πυκνωτή στο κύκλωμα παρατηρούμε ότι, η τάση δεν ακολουθεί την ημιπερίοδο του ημιτόνου της πηγής αλλά μια άλλη καμπύλη όπως ορίζεται από τον πυκνωτή.

### 1.1.5 - Φίλτρα

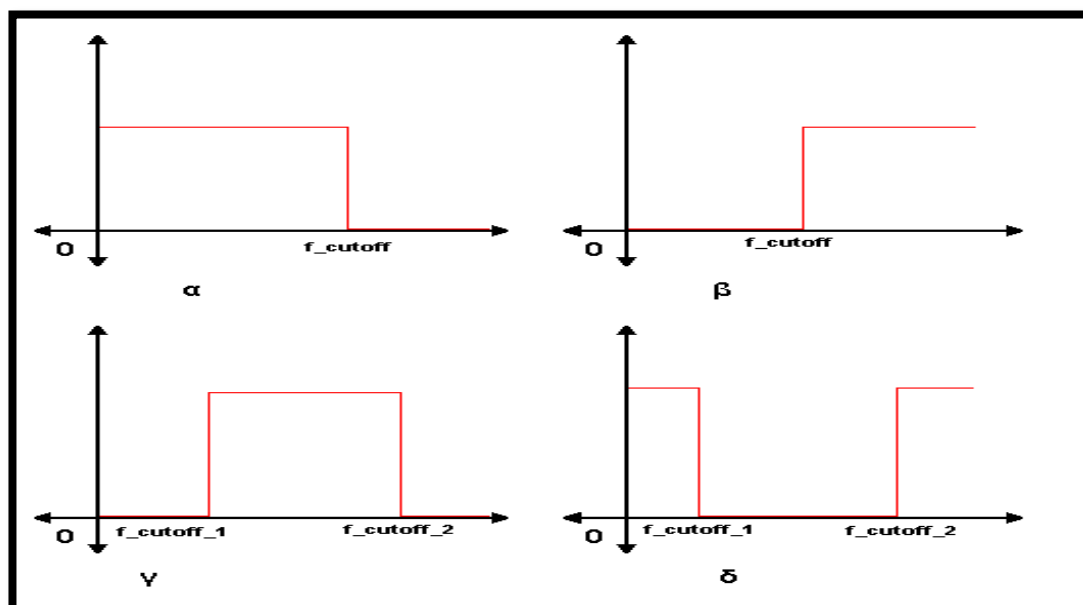
Τα φίλτρα είναι ηλεκτρονικά/ηλεκτρικά κυκλώματα που διαχωρίζουν, παρεμποδίζουν (μείωση θορύβου, διαχωρισμός σημάτων κτλ), ενισχύουν, εξομαλύνουν και γενικά μεταβάλλουν τα σήματα με κάποιο επιθυμητό τρόπο. Διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες τα παθητικά φίλτρα και τα ενεργά φίλτρα.

#### 1.1.5.a - Παθητικά φίλτρα

Τα παθητικά φίλτρα αποτελούνται από πυκνωτές, πηνία και αντιστάσεις ενώ δεν παρουσιάζουν κέρδος ισχύος.

Ανάλογα με την απόκριση συχνότητας ενός φίλτρου, τα διαχωρίζουμε στις παρακάτω κατηγορίες.

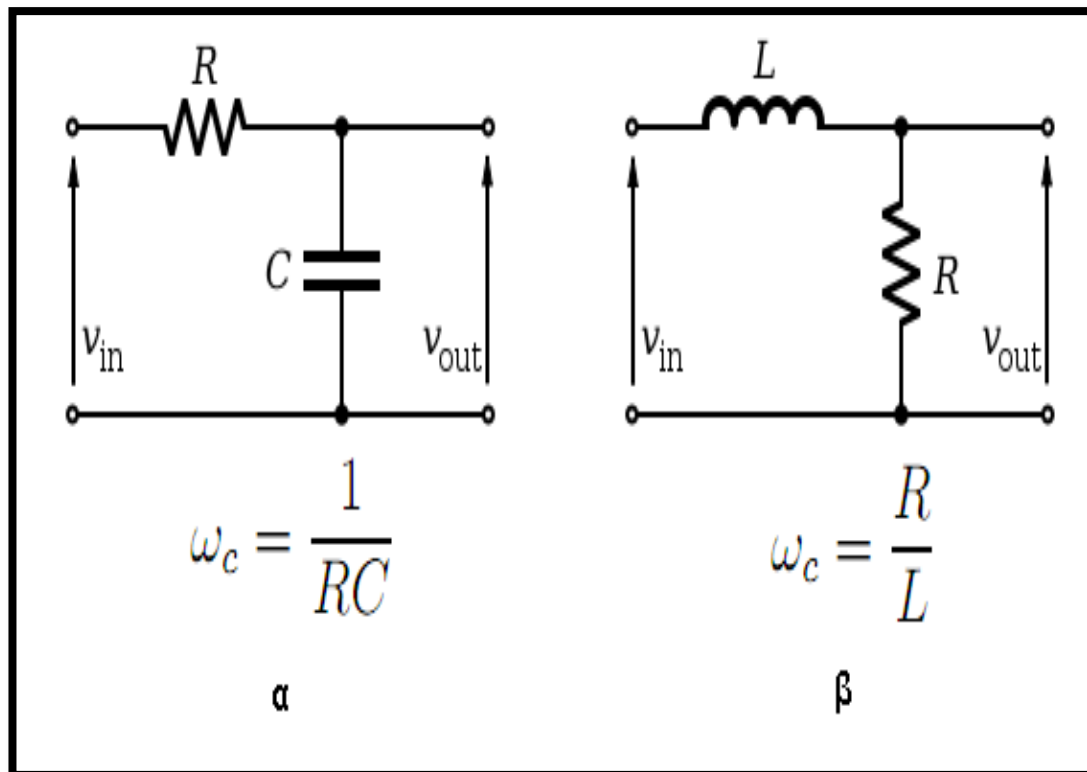
1. Χαμηλοπερατά φίλτρα : Τα χαμηλοπερατά φίλτρα επιτρέπουν τη διέλευση όλων των συχνοτήτων από  $f = 0$  μέχρι και τη συχνότητα αποκοπής  $f_{\text{cutoff}}$ .
2. Υψηπερατά φίλτρα : Τα Υψηπερατά φίλτρα λειτουργούν συμπληρωματικά των χαμηλοπερατών. Δηλαδή, επιτρέπουν τη διέλευση σε όλα τα σήματα με συχνότητα μεγαλύτερη ή ίση της συχνότητας αποκοπής.
3. Φίλτρα ζώνης συχνοτήτων : Τα φίλτρα ζώνης συχνοτήτων επιτρέπουν τη διέλευση όλων των σημάτων, με συχνότητα ανάμεσα στην χαμηλότερη και την ανώτερη συχνότητα αποκοπής.
4. Φίλτρα αποκλεισμού ζώνης συχνοτήτων : Τα φίλτρα αποκλεισμού ζώνης συχνοτήτων επιτρέπουν τη διέλευση των σημάτων, με συχνότητα μικρότερη ή μεγαλύτερη της ανώτερης και κατώτερης συχνότητας αποκοπής.
5. Φίλτρα διέλευσης όλων των συχνοτήτων : Αυτό το φίλτρο επιτρέπει σε όλες τις συχνότητες να περάσουν αλλάζοντας μόνο τη φάση του σήματος.



Εικόνα 1.17 Ιδανικές αποκρίσεις συχνότητας των διάφορων ειδών φίλτρων. α) χαμηλοπερατό φίλτρο β) υψηπερατό φίλτρο γ) φίλτρο ζώνης διέλευσης και δ) φίλτρο ζώνης αποκοπής.

## Κεφάλαιο 1 Ανασκόπηση Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων.

Τα πιο απλά παθητικά φίλτρα είναι τα **RC**, **RL** φίλτρα πρώτης τάξης (η τάξη ενός παθητικού φίλτρου καθορίζεται από τον αριθμό των πηνίων και των πυκνωτών στο κύκλωμα). Πιο σύνθετα είναι τα δύο και τριών στοιχείων (**L**, **T** και **Π** φίλτρα).



Εικόνα 1.18 Χαμηλοπερατά φίλτρα RC και RL.

Στην παραπάνω εικόνα, δίνονται δύο χαμηλοπερατά φίλτρα πρώτης τάξης καθώς και οι τύποι για τη γωνιακή συχνότητα αποκοπής σε κάθε περίπτωση.

$$f_c = 2 * \pi * \omega_c$$

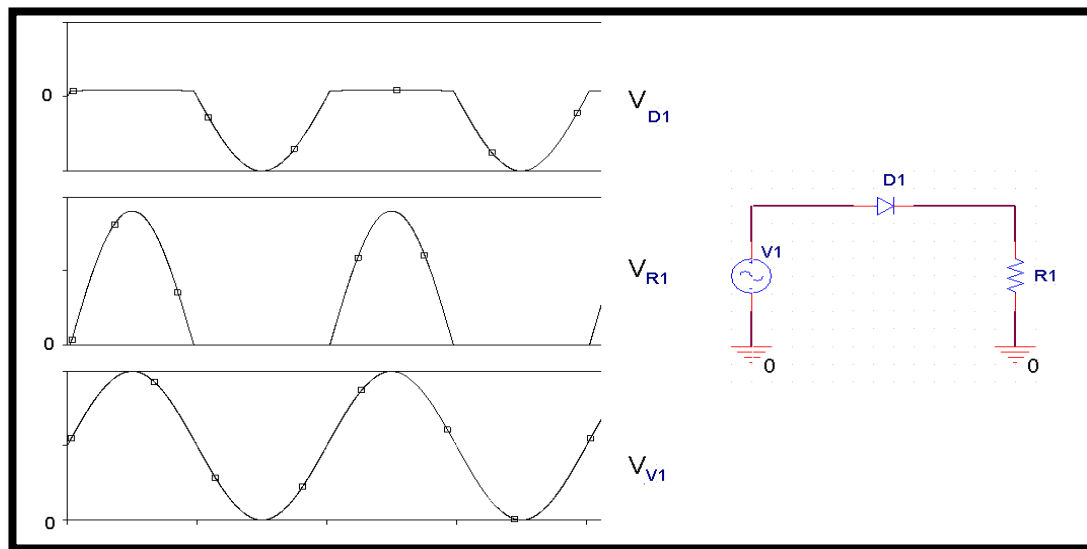
### 1.1.5.β - Ενεργά Φίλτρα

Τα ενεργά φίλτρα κατασκευάζονται από πυκνωτές, αντιστάσεις και τελεστικούς ενισχυτές. Διαχωρίζονται στις ίδιες κατηγορίες με τα παθητικά φίλτρα (χαμηλοπερατά, υψηλοπερατά κτλ.) αλλά αντίθετα με αυτά, παρουσιάζουν κέρδος ισχύος και χρειάζονται εξωτερική τροφοδοσία. Η τάξη των ενεργών φίλτρων εξαρτάται από το πλήθος των **RC** κυκλωμάτων (ή προσεγγιστικά από το πλήθος των πυκνωτών του κυκλώματος).

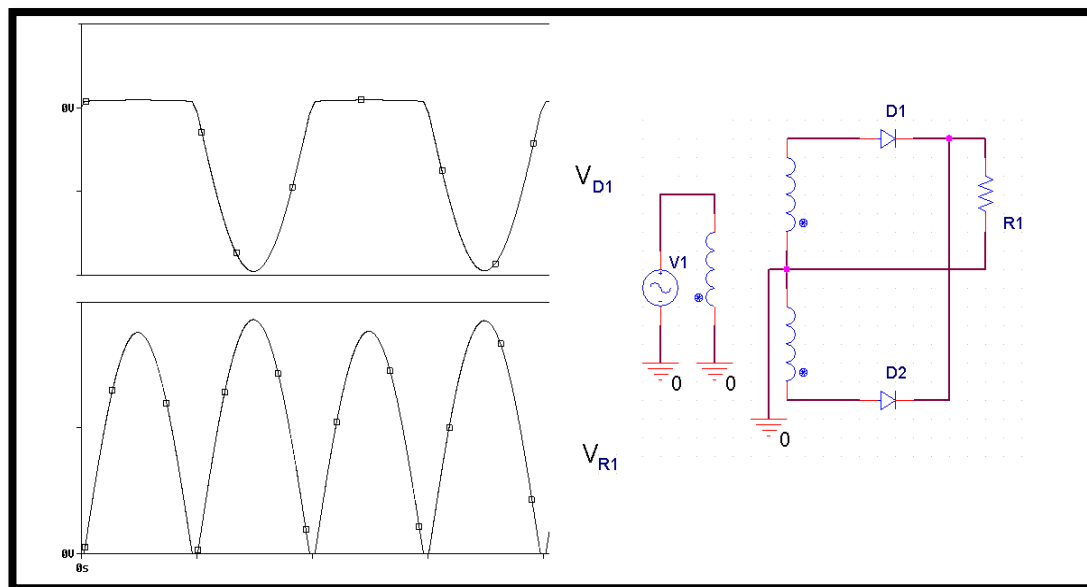
## 1.2 - Ανορθωτικές Διατάξεις – Μετατροπείς AC-DC

### 1.2.1 - Μη ελεγχόμενες Ανορθωτικές Διατάξεις

Σαν μη ελεγχόμενες ανορθωτικές διατάξεις κατηγοριοποιούνται, οι ανορθωτές πλήρους κύματος, ημίσεως κύματος και πλήρους γέφυρας με διόδους. Ονομάζονται έτσι, διότι δεν έχουμε κανέναν απολύτως έλεγχο είτε στην έναυση, είτε στη σβέση των ημιαγωγικών στοιχείων.



Εικόνα 1-8 Κύκλωμα σε Pspice ανορθωτή ημίσεως Κύματος.



Εικόνα 1-20 Κύκλωμα σε Pspice Ανορθωτή Πλήρους κύματος.

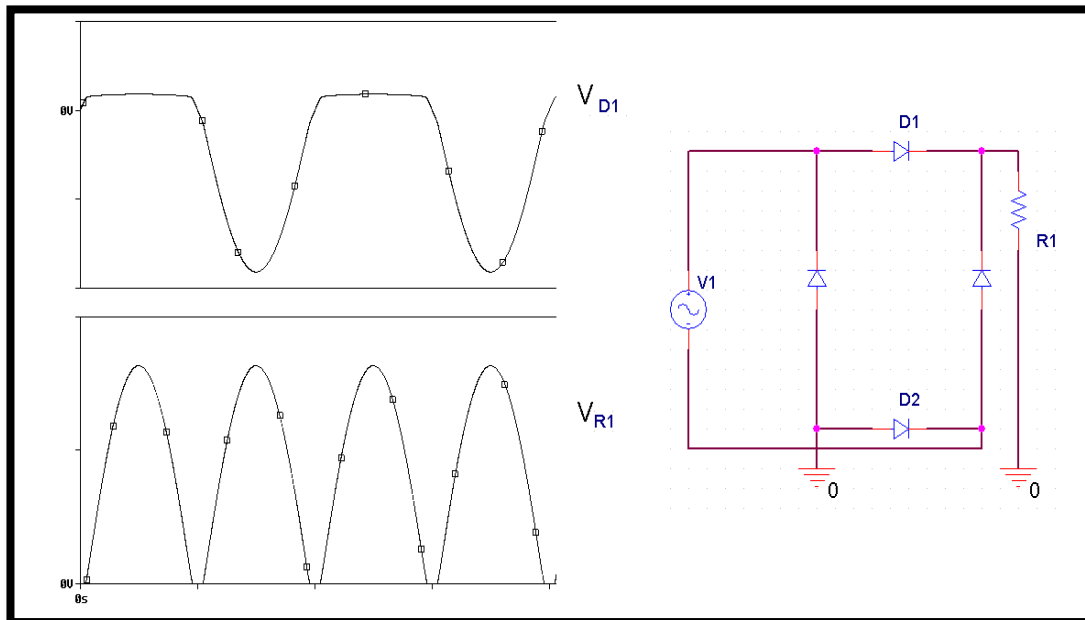
Στις εικόνες 1-19~21 δίνονται και οι τρεις συνδεσμολογίες με τις βασικές κυματομορφές. Ο ανορθωτής ημίσεως κύματος, ανορθώνει όπως αναφέρει και το όνομά του, μόνο το μισό ημίτονο της πηγής και για αυτό το λόγο είναι μη αποδοτικός. Η συχνότητα του σήματος εξόδου είναι η ίδια με τη συχνότητα της



## Κεφάλαιο 1 Ανασκόπηση Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων.

πηγής, ενώ η DC τάση εξόδου για ιδανικά στοιχεία υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$V_{DC} = \frac{V_p}{\pi}$$



Εικόνα 1-21 Κύκλωμα σε Pspice Ανορθωτή Πλήρους Γέφυρας.

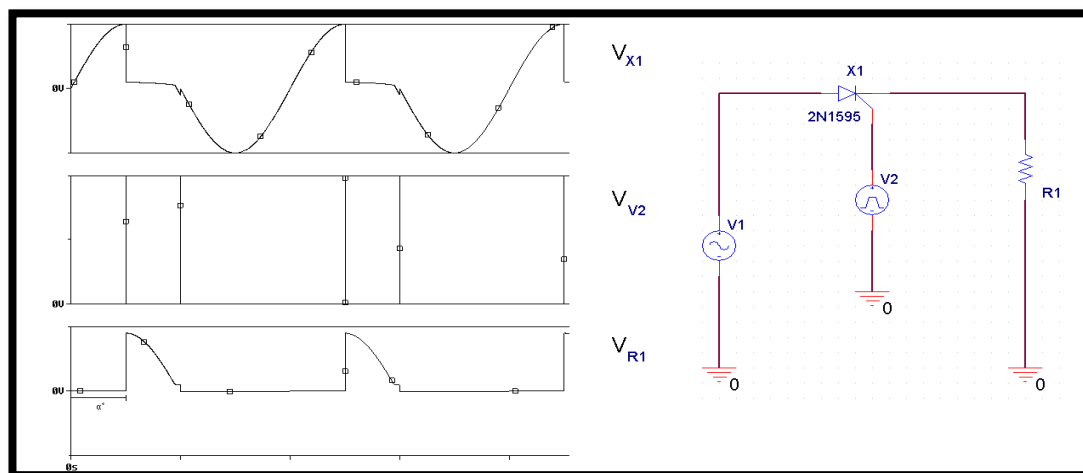
Ο ανορθωτής πλήρους κύματος είναι πιο αποδοτικός καθώς ανορθώνει ολόκληρο το ημίτονο της εισόδου, αλλά χρειάζεται ειδικό μετασχηματιστή με μεσαία λήψη για να λειτουργήσει. Σε διαφορετική περίπτωση χρησιμοποιούμε ανορθωτή πλήρους γέφυρας με τέσσερις διόδους. Η συχνότητα της τάσης εξόδου είναι διπλάσια από τη συχνότητα εισόδου (και για τους δύο ανορθωτές) και η DC τάση εξόδου για ιδανικά στοιχεία υπολογίζεται (στον ανορθωτή πλήρους γέφυρας με μη ιδανικά στοιχεία υπάρχει, η διπλάσια πτώση τάσης λόγω δύο διόδων σε σειρά) από την παρακάτω εξίσωση:

$$V_{DC} = \frac{2 * V_p}{\pi}$$

Σε όλες τις περιπτώσεις η διάδος άγει από την πρώτη χρονική στιγμή, που η άνοδος γίνεται θετικότερη από την κάθοδο και αποκόπτεται στο τέλος της ημιπεριόδου αγωγής.

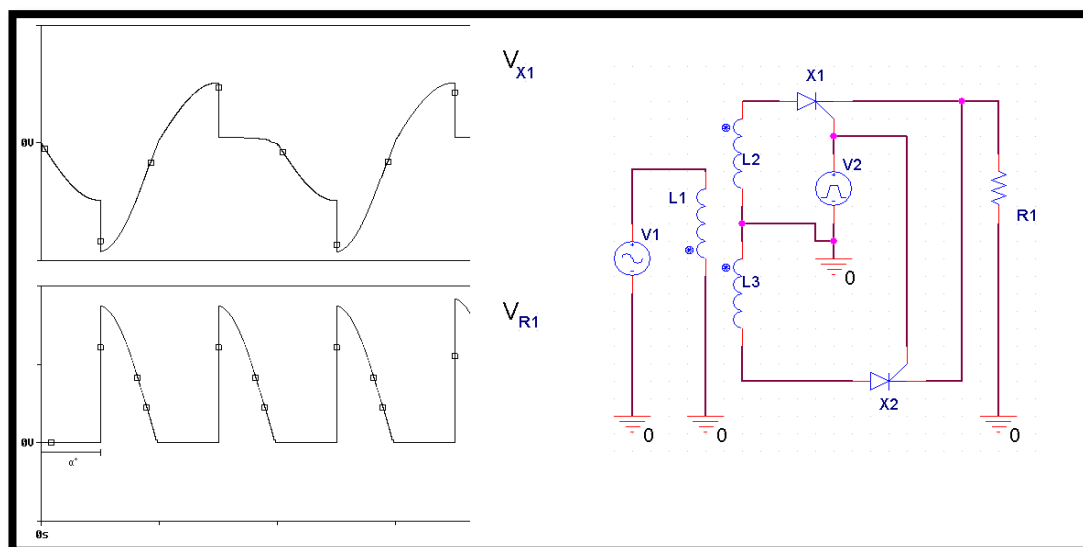
### 1.2.2 - Ημιελεγχόμενες Ανορθωτικές Διατάξεις

Σαν Ημιελεγχόμενες ανορθωτικές διατάξεις κατηγοριοποιούνται οι ανορθωτές ενός, δύο και τεσσάρων παλμών με θυρίστωρ. Ονομάζονται έτσι διότι, έχουμε έλεγχο μόνο στην έναυση του ημιαγωγικού στοιχείου και όχι στη σβέση. Γίνεται αναφορά μόνο σε καθαρά ωμικά φορτία.



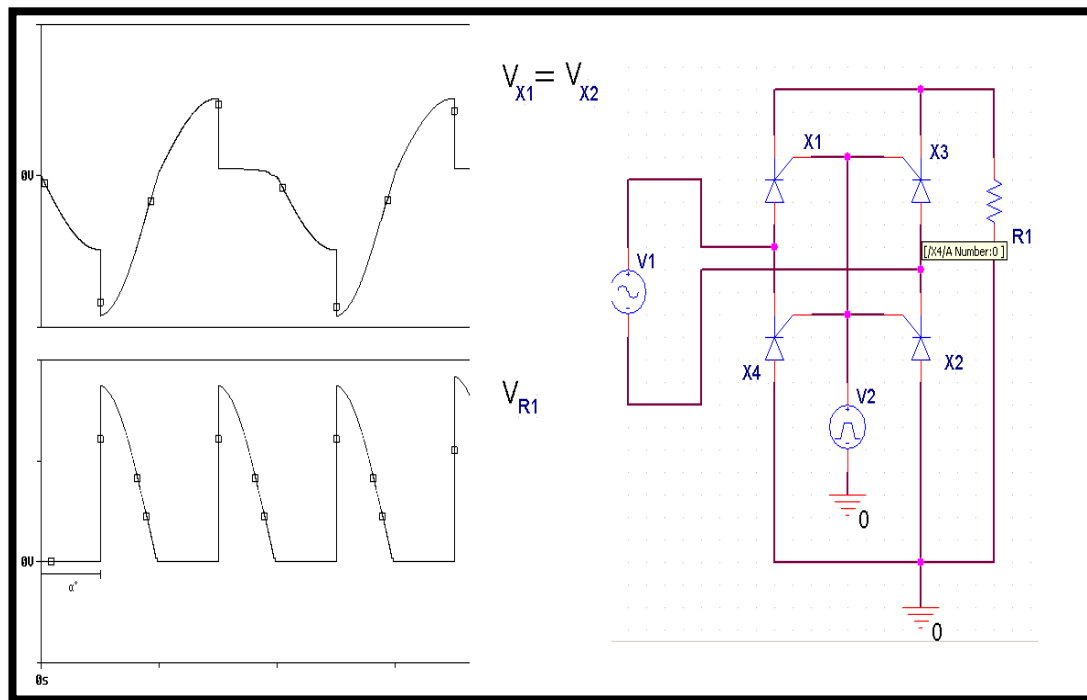
Εικόνα 1-22 Κύκλωμα σε Pspice Μετατροπέα ενός παλμού με θυρίστωρ.

Το θυρίστωρ μπαίνει σε κατάσταση αγωγής, όταν η τάση καθόδου είναι μεγαλύτερη από την τάση ανόδου και δοθεί παλμός στην πύλη. Όταν μπει σε κατάσταση αγωγής, παραμένει έτσι μέχρι το ρεύμα που το διαρρέει να γίνει μικρότερο από μια κρίσιμη τιμή, ανάλογα το μοντέλο του θυρίστωρ.



Εικόνα 1-23 Κύκλωμα σε Pspice Μετατροπέα δύο παλμών με θυρίστωρ.

## Κεφάλαιο 1 Ανασκόπηση Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων.



Εικόνα 1-24 Κύκλωμα σε Pspice Μετατροπέα τεσσάρων παλμών με θυρίστορ.

Η RMS τάση εξόδου υπολογίζεται σε κάθε ένα κύκλωμα από τους παρακάτω τύπους:

Μετατροπέας ενός παλμού, 
$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} * \sqrt{\frac{\pi - \alpha + \frac{1}{2} * \sin(2 * a)}{2 * \pi}}$$

Μετατροπέας δύο και τεσσάρων παλμών, 
$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} * \sqrt{\frac{\pi - \alpha + \frac{1}{2} * \sin(2 * a)}{\pi}}$$

Όπου  $\alpha$  η γωνία έναυσης.

### 1.2.3 - Πλήρως Ελεγχόμενες Ανορθωτικές Διατάξεις

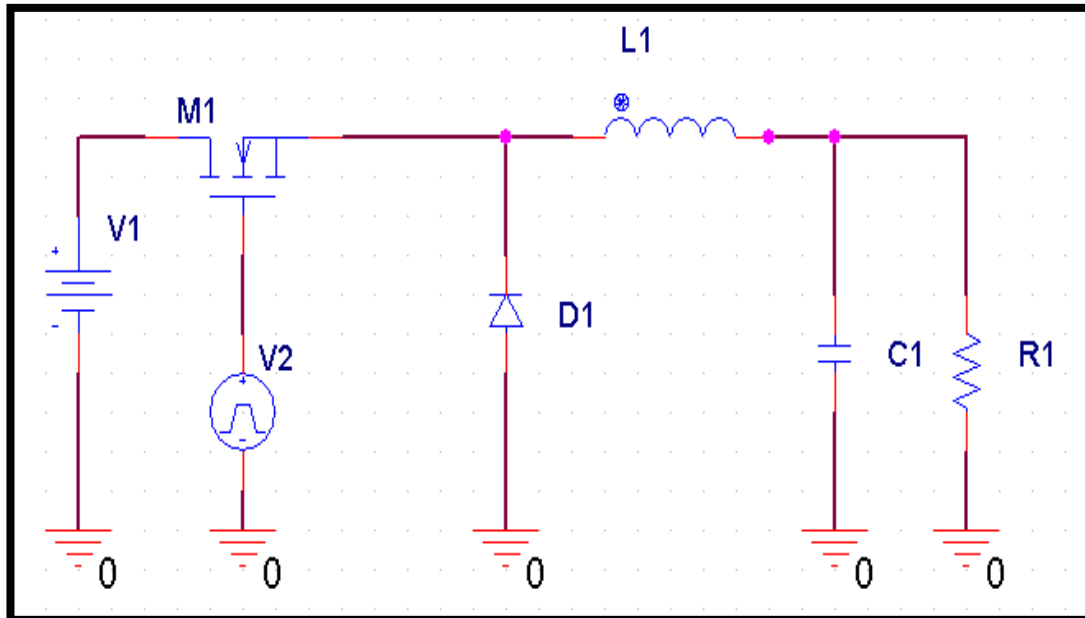
Σαν πλήρως ελεγχόμενες ανορθωτικές διατάξεις κατηγοριοποιούνται οι ανορθωτές με τρανζίστορ. Ονομάζονται έτσι διότι, έχουμε έλεγχο τόσο κατά την έναυση του ημιαγωγικού όσο και κατά τη σβέση. Τα τρανζίστορ άγουν όταν τους δοθεί κατάλληλο σήμα στη βάση ή την πύλη (ανάλογα το τρανζίστορ) και συνεχίζουν να άγουν μέχρι να σταματήσει το σήμα.

Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε οποιαδήποτε από τις παραπάνω συνδεσμολογίες και με τρανζίστορ.

## 1.3 - Διακοπτικοί Μετατροπείς DC-DC

### 1.3.1 - Ο DC-DC Μετατροπέας Buck

Ο μετατροπέας υποβιβασμού (Buck) αποτελείται από τέσσερα στοιχεία, ένα τρανζίστορ, μία δίοδο, ένα πηνίο και έναν πυκνωτή. Στην εικόνα δίνεται το κύκλωμα του μετατροπέα. Η λειτουργία του, χωρίζεται σε δύο χρονικές περιόδους.



Εικόνα 1-25 Κύκλωμα σε Pspice Μετατροπέα υποβιβασμού τάσης.

$$\alpha) 0 < t < DT, \quad \beta) DT < t < T$$

Όπου  $T_a$  η περίοδος και  $D$  χρόνος αγωγής του τρανζίστορ.

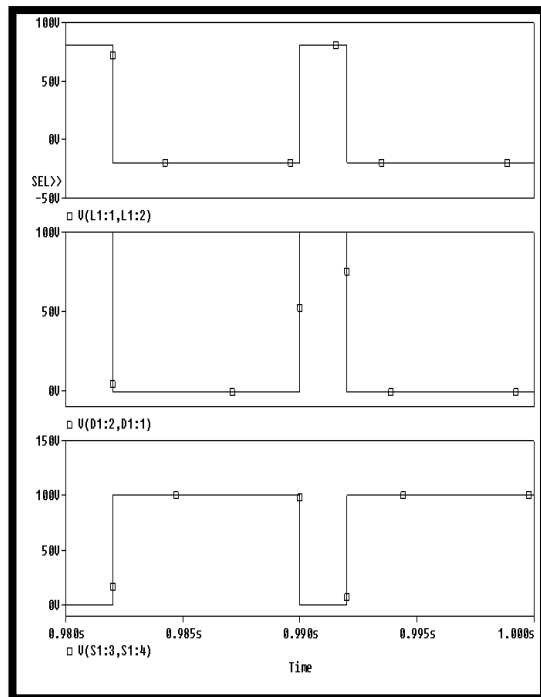
Τη χρονική περίοδο  $\alpha$  το τρανζίστορ άγει, η δίοδος είναι σε αποκοπή. Το ρεύμα της αυτεπαγωγής αυξάνεται γραμμικά και υπάρχει μεταφορά ενέργειας από την είσοδο στην έξοδο. Τη χρονική περίοδο  $\beta$  το τρανζίστορ βρίσκεται σε αποκοπή και η δίοδος μπαίνει σε κατάσταση αγωγής, επειδή η αυτεπαγωγή έχει αντιστρέψει την τάση στα άκρα της και τροφοδοτεί το φορτίο με την ενέργεια που έχει αποθηκεύσει (το ρεύμα της μειώνεται γραμμικά).

Επίσης παρατηρούμε δύο ειδών λειτουργίες. Όταν το ρεύμα της αυτεπαγωγής μηδενίζεται (λειτουργία ασυνεχούς αγωγής) και όταν το ρεύμα της αυτεπαγωγής δεν μηδενίζεται (λειτουργία συνεχούς αγωγής). Η τιμή της αυτεπαγωγής και το μέγεθος του φορτίου ,καθορίζουν σε πια κατάσταση λειτουργεί ο μετατροπέας.

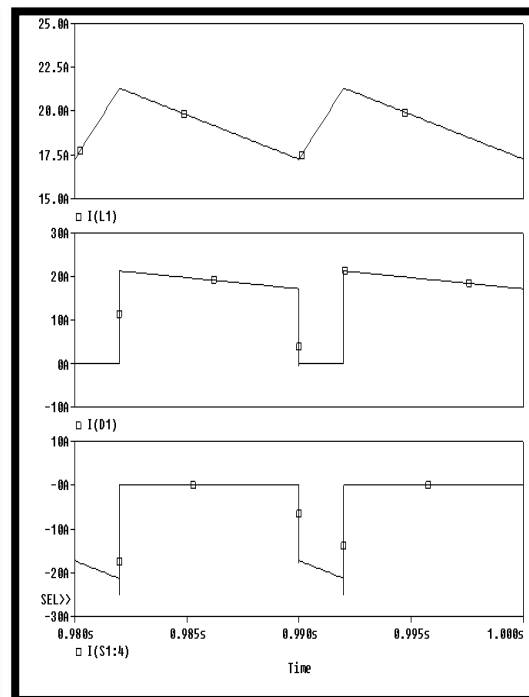
Η τάση εξόδου υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$V_{out} = D * V_{in}$$

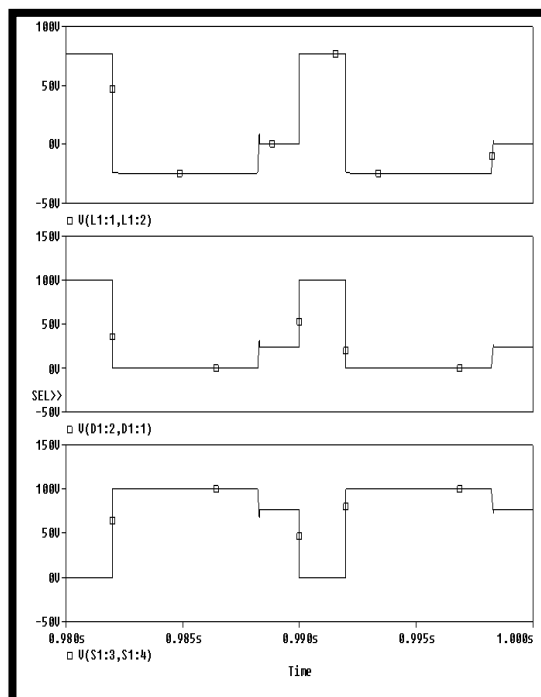
## Κεφάλαιο 1 Ανασκόπηση Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων.



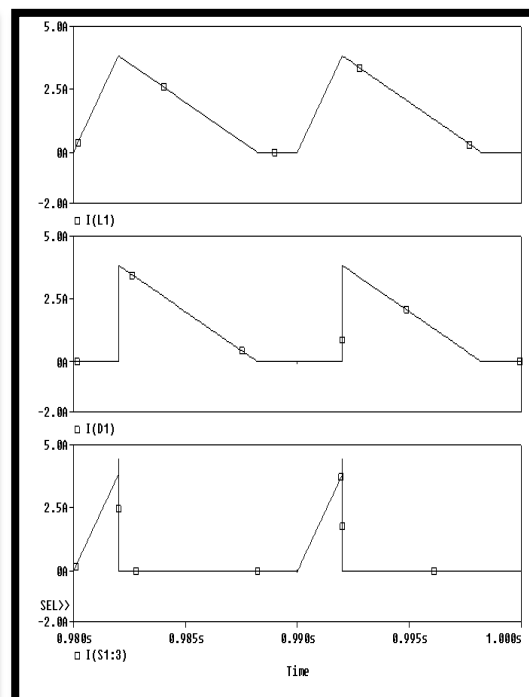
Εικόνα 1-26 Τάσεις πηνίου, διόδου ελεύθερης διέλευσης και διακόπτη σε κατάσταση συνεχούς αγωγής.



Εικόνα 1-27 Ρεύματα πηνίου, διόδου ελεύθερης διέλευσης και διακόπτη σε κατάσταση συνεχούς αγωγής.

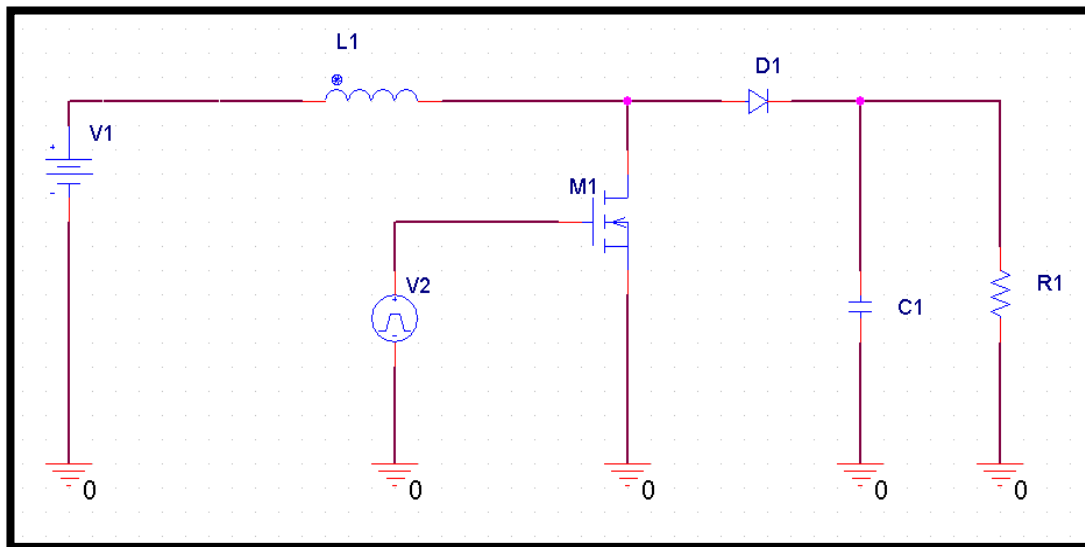


Εικόνα 1-28 Τάσεις πηνίου, διόδου ελεύθερης διέλευσης και διακόπτη σε κατάσταση ασυνεχούς αγωγής.



Εικόνα 1-29 Ρεύματα πηνίου, διόδου ελεύθερης διέλευσης και διακόπτη σε κατάσταση ασυνεχούς αγωγής.

### 1.3.2 - Ο DC-DC Μετατροπέας Boost



Εικόνα 1-30 Κύκλωμα σε Pspice μετατροπέα ανύψωσης τάσης.

Ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης προσφέρει όπως αναφέρει και το όνομα του, τάση εξόδου μεγαλύτερη από την τάση εισόδου. Αυτό γίνεται ως εξής:

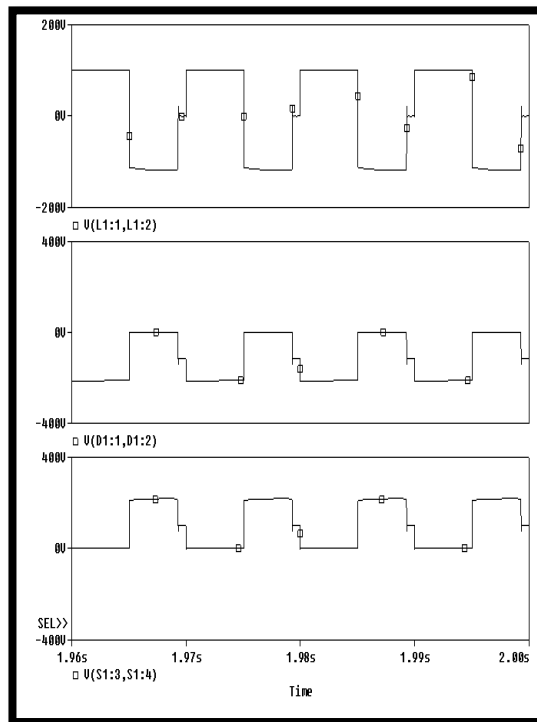
Κατά τη χρονική περίοδο  $0 < t < DT$  το τρανζίστορ είναι σε κατάσταση αγωγής, η διάδος σε κατάσταση αποκοπής και η είσοδος τροφοδοτεί με ενέργεια το πηνίο. Τη χρονική περίοδο  $DT < t < T$  το τρανζίστορ είναι σε κατάσταση αποκοπής και η ενέργεια που ρέει στην έξοδο, προσφέρεται από την αποθηκευμένη ενέργεια του πηνίου του οποίου, το ρεύμα μειώνεται γραμμικά. Λόγω της αντιστροφής της τάσης του πηνίου, η διάδος πολώνεται ορθά και εισέρχεται στην κατάσταση αγωγής.

Η τάση εξόδου υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

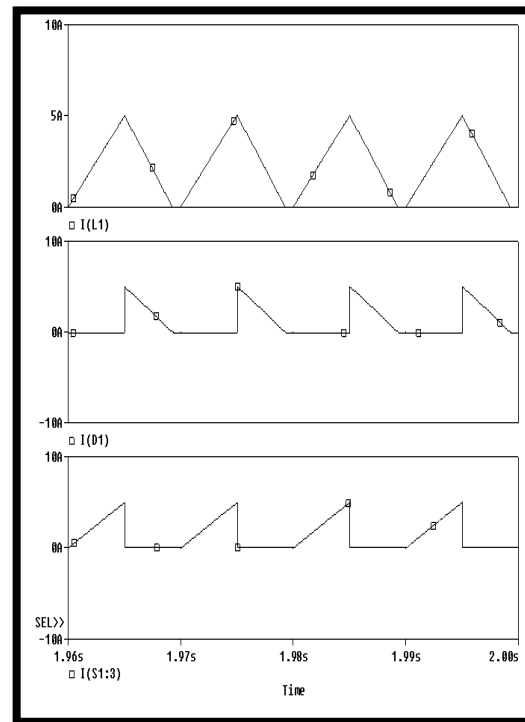
$$V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}}}{1 - D}$$

Αποτελείται από τέσσερα στοιχεία όπως και ο μετατροπέας Buck, Ένα πηνίο, μία διάδο, ένα τρανζίστορ και έναν πυκνωτή.

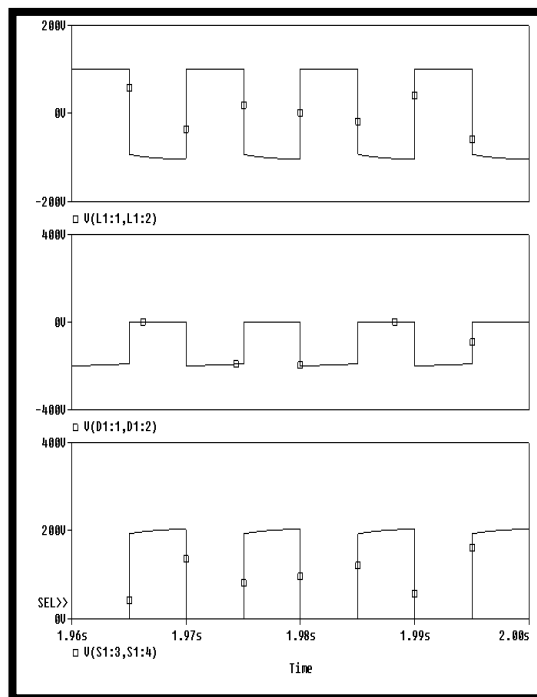
## Κεφάλαιο 1 Ανασκόπηση Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων.



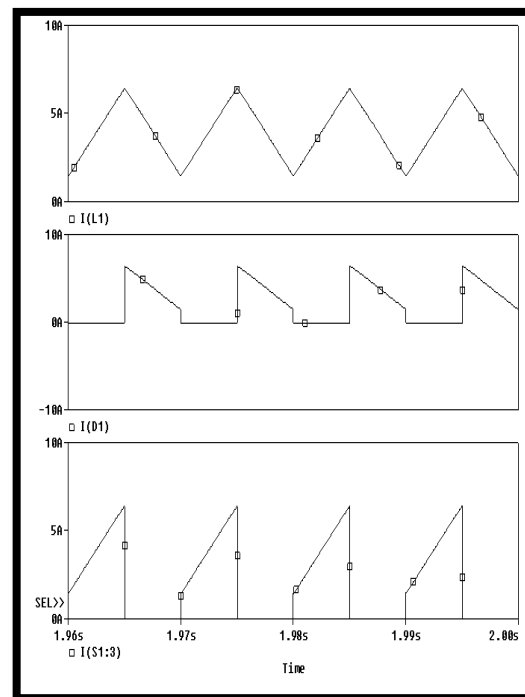
Εικόνα 1-31 Τάσεις πηνίου, διόδου ελεύθερης διέλευσης και διακόπτη σε κατάσταση ασυνεχούς αγωγής.



Εικόνα 1-32 Ρεύματα πηνίου, διόδου ελεύθερης διέλευσης και διακόπτη σε κατάσταση ασυνεχούς αγωγής.

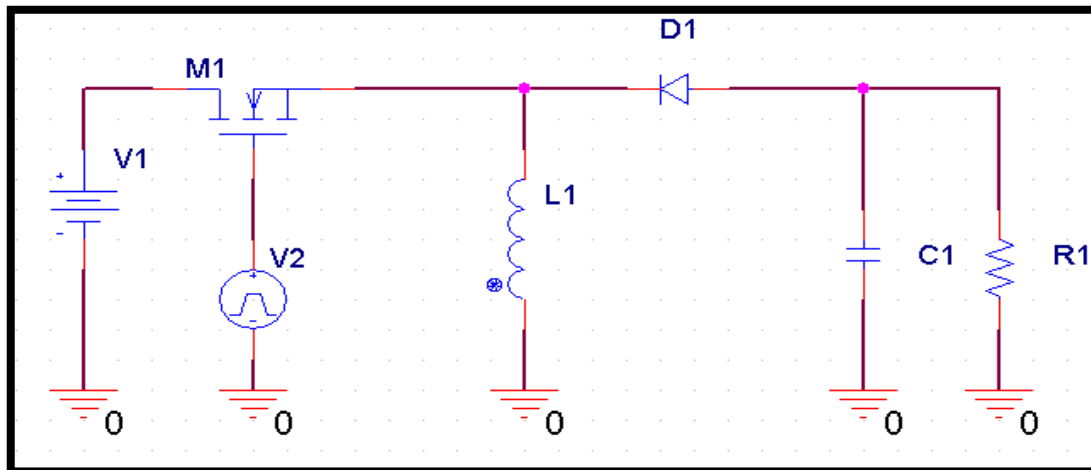


Εικόνα 1-33 Τάσεις πηνίου, διόδου ελεύθερης διέλευσης και διακόπτη σε κατάσταση συνεχούς αγωγής.



Εικόνα 1-34 Ρεύματα πηνίου, διόδου ελεύθερης διέλευσης και διακόπτη σε κατάσταση συνεχούς αγωγής.

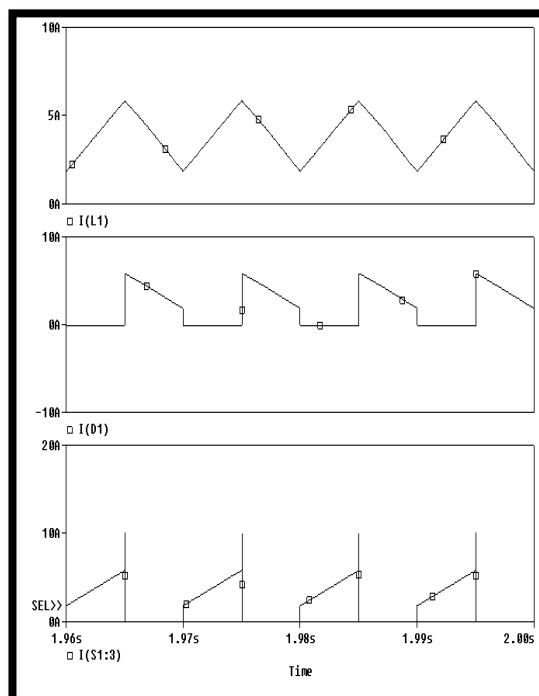
### 1.3.3 - Ο Μεικτός DC-DC Μετατροπέας



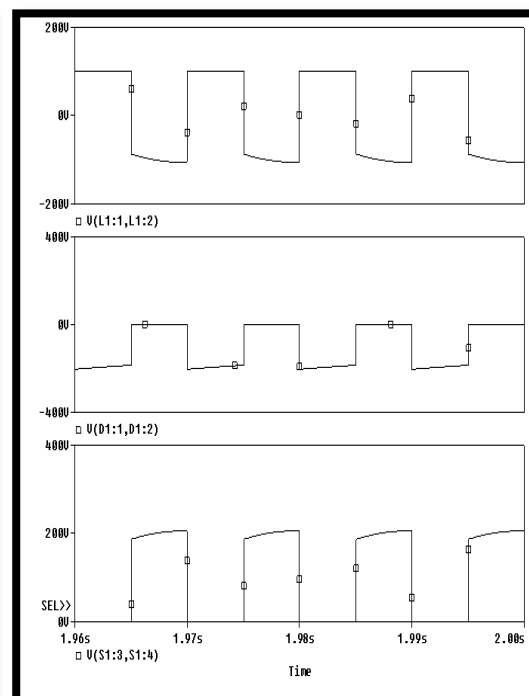
Εικόνα 1-35 Κύκλωμα σε Pspice Μετατροπέα Buck-Boost.

Ο μεικτός μετατροπέας σχηματίζεται με τη σύνδεση σε σειρά των μετατροπέων Buck και Boost. Μπορεί να προσφέρει, είτε ανυψωμένη, είτε υποβιβασμένη τάση στην έξοδο, ανάλογα με το λόγο  $D$ . Η τάση εξόδου υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$V_{out} = V_{in} * \frac{D}{1 - D}$$



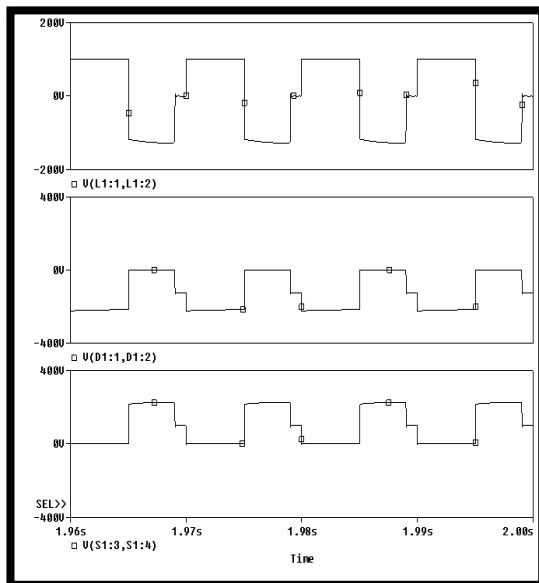
Εικόνα 1-36 Ρεύματα πηνίου, διόδου ελεύθερης διέλευσης και διακόπτη σε κατάσταση συνεχούς αγωγής.



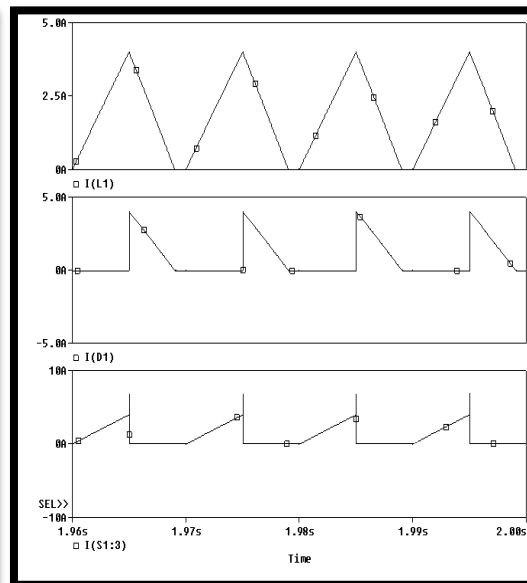
Εικόνα 1-37 Τάσεις πηνίου, διόδου ελεύθερης διέλευσης και διακόπτη σε κατάσταση συνεχούς αγωγής.



## Κεφάλαιο 1 Ανασκόπηση Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων.

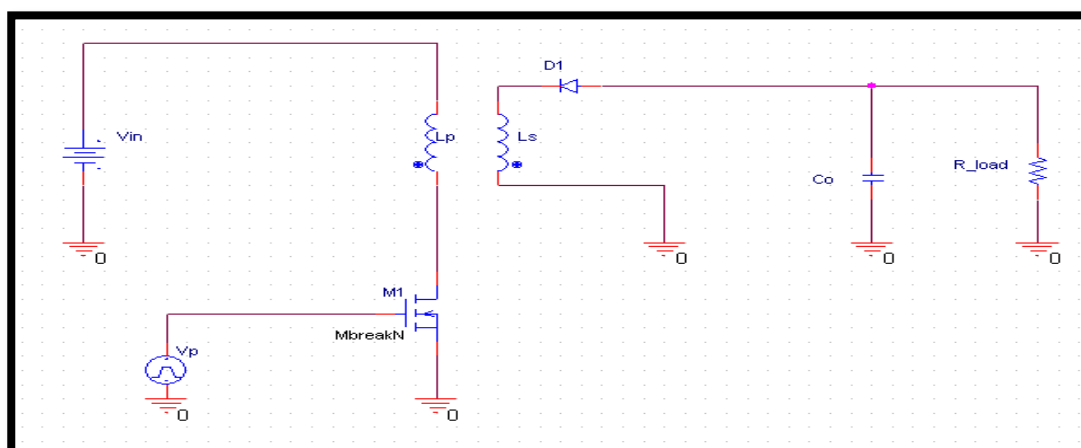


Εικόνα 1-38 Ρεύματα πηνίου, διόδου ελεύθερης διέλευσης και διακόπτη σε κατάσταση ασυνεχούς αγωγής.



Εικόνα 1-39 Τάσεις πηνίου, διόδου ελεύθερης διέλευσης και διακόπτη σε κατάσταση ασυνεχούς αγωγής.

### 1.3.4 - Ο DC-DC Μετατροπέας Flyback

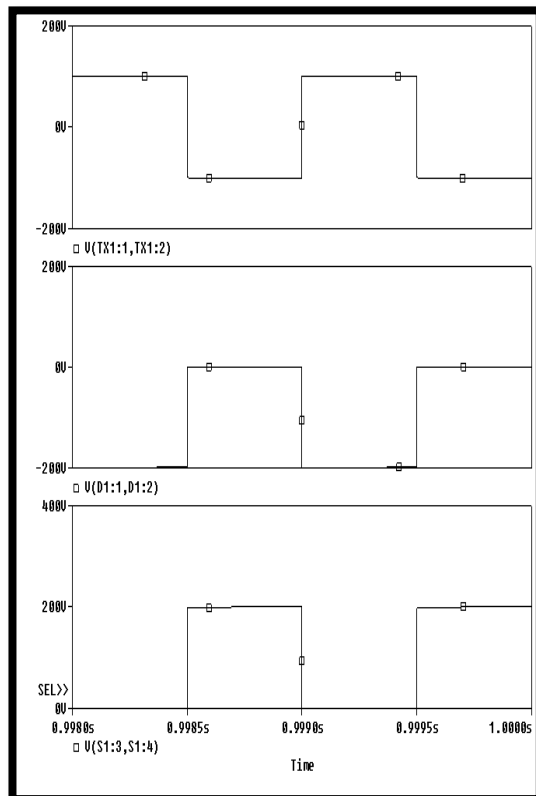


Εικόνα 1-40 Κύκλωμα σε Pspice Μετατροπέα Flyback.

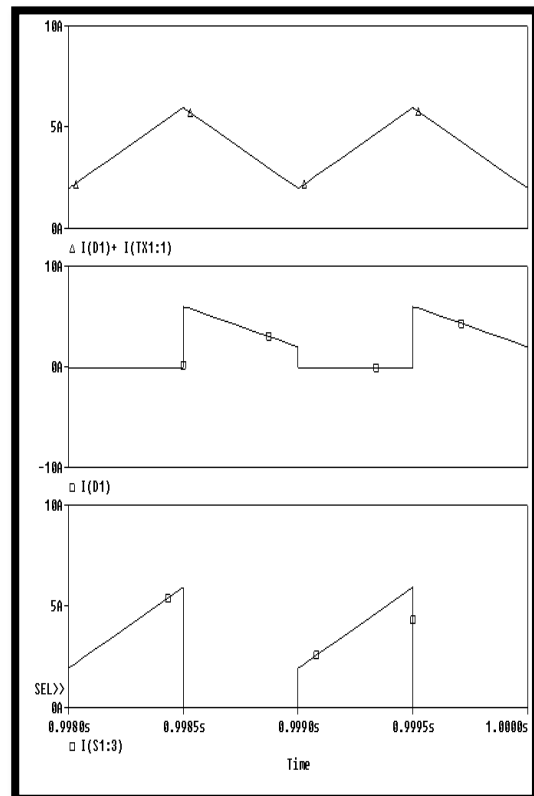
Ο μετατροπέας Flyback προέρχεται από τον DC-DC μετατροπέα Buck με την προσθήκη στο κύκλωμα ενός μετασχηματιστή και την αφαίρεση του πηνίου εξόδου. Ο μετασχηματιστής πέρα από απομόνωση, προσφέρει στο κύκλωμα τη δυνατότητα αύξησης της τάσης εξόδου καθώς και αντιστροφή της, με κατάλληλη αλλαγή στο παραπάνω κύκλωμα (αντιστρέφοντας τη δίοδο, τον πυκνωτή καθώς και την πολικότητα του μετασχηματιστή). Η τάση εξόδου υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} * \frac{N_s}{N_p} * \frac{D}{1 - D}$$

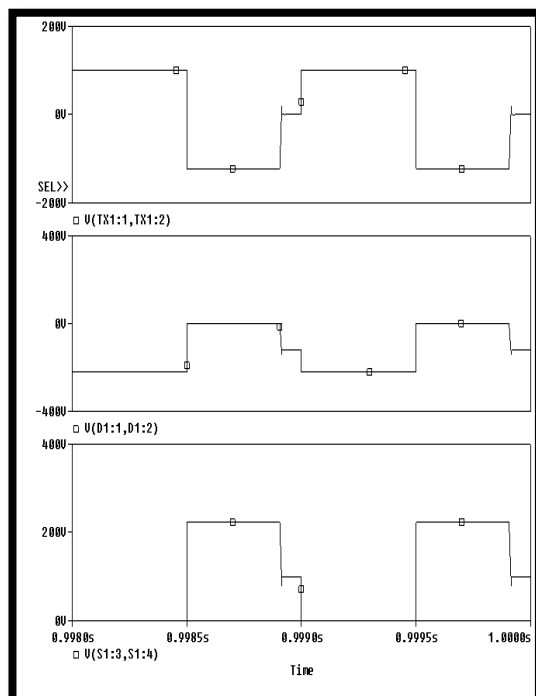
## Κεφάλαιο 1 Ανασκόπηση Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων.



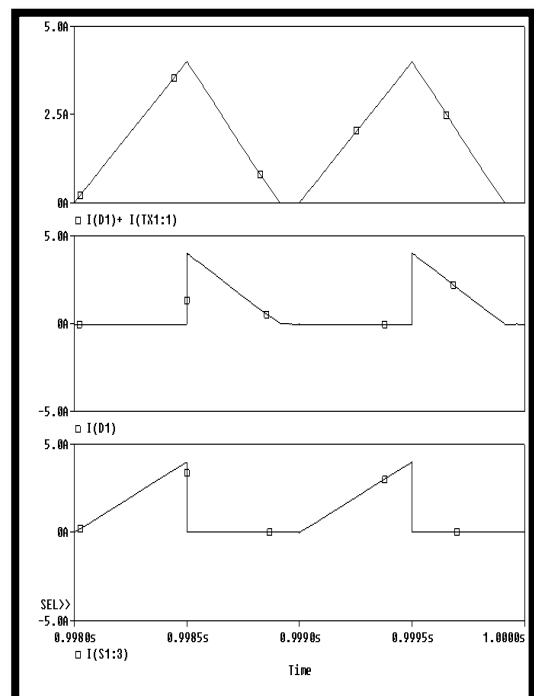
Εικόνα 1-41 Τάσεις πηνίου, διόδου και διακόπτη σε κατάσταση συνεχούς αγωγής.



Εικόνα 1-42 Ρεύματα πηνίου, διόδου και διακόπτη σε κατάσταση συνεχούς αγωγής.



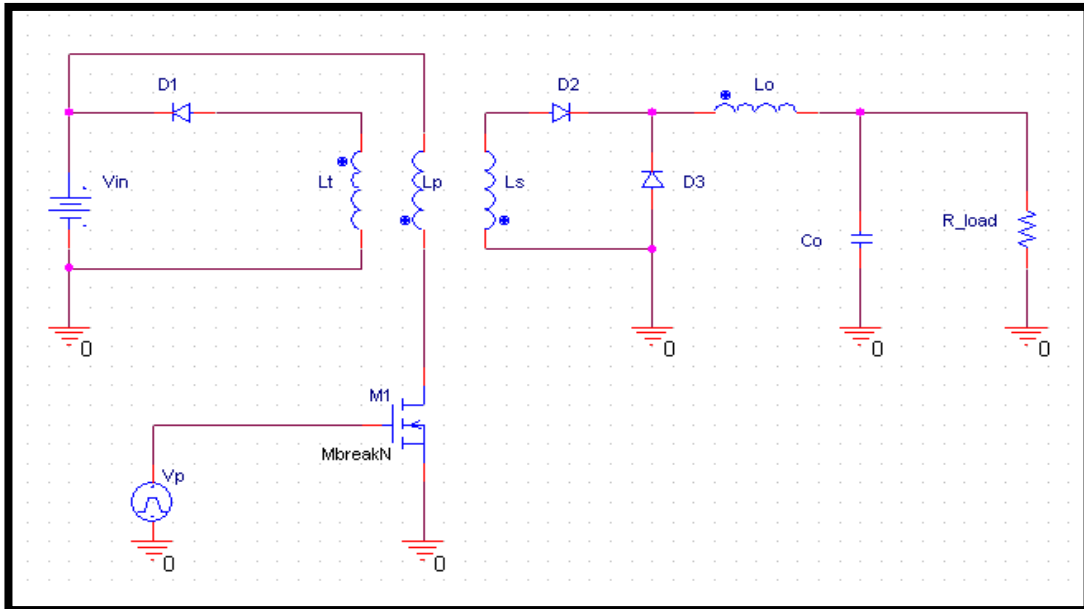
Εικόνα 1-43 Τάσεις πηνίου, διόδου και διακόπτη σε κατάσταση ασυνεχούς αγωγής.



Εικόνα 1-44 Ρεύματα πηνίου, διόδου και διακόπτη σε κατάσταση ασυνεχούς αγωγής.

### 1.3.5 - Ο DC-DC Μετατροπέας Forward

Ο μετατροπέας Flyback προέρχεται από τον DC-DC μετατροπέα Buck με την προσθήκη στο κύκλωμα ενός μετασχηματιστή μιας διόδου. Το τριτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή χρησιμεύει για την απομαγνήτιση του πυρήνα στο τέλος κάθε περιόδου αγωγής, έτσι ώστε να αποφευχθεί η λειτουργία στον κόρο. Η τάση εξόδου υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

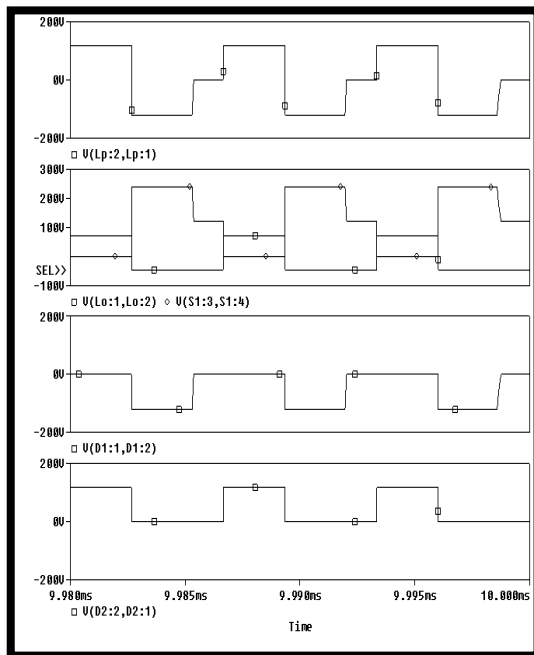


Εικόνα 1.45 Κύκλωμα σε Pspice Μετατροπέα Forward.

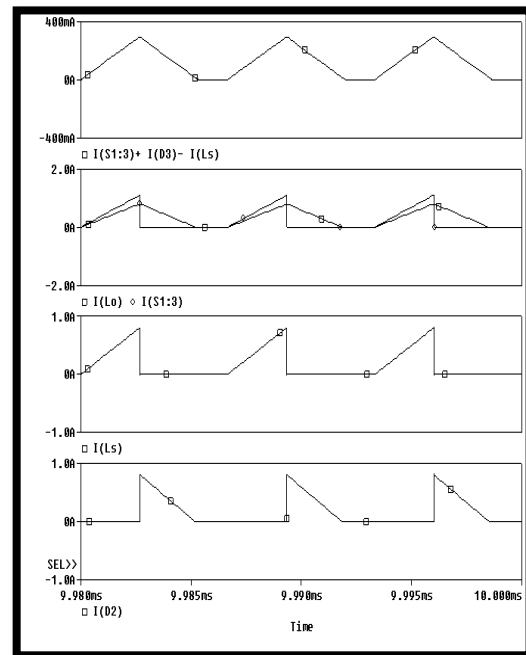
$$V_{out} = V_{in} * \frac{N_s}{N_p} * D$$

Η λειτουργία του μετατροπέα Forward αναλύεται διεξοδικά στο επόμενο κεφάλαιο.

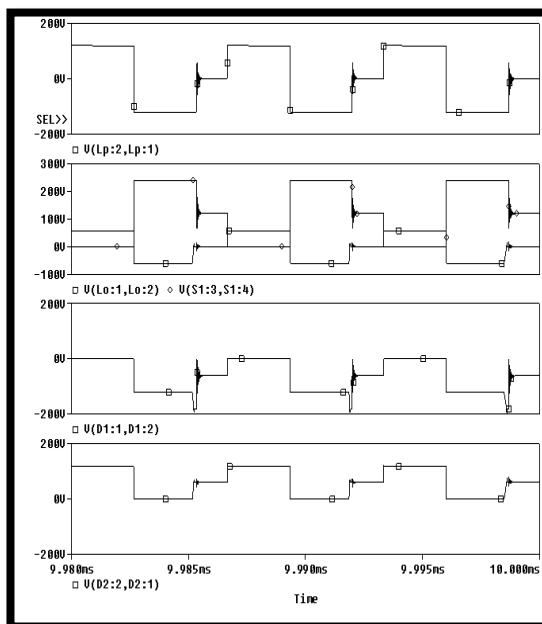
## Κεφάλαιο 1 Ανασκόπηση Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων.



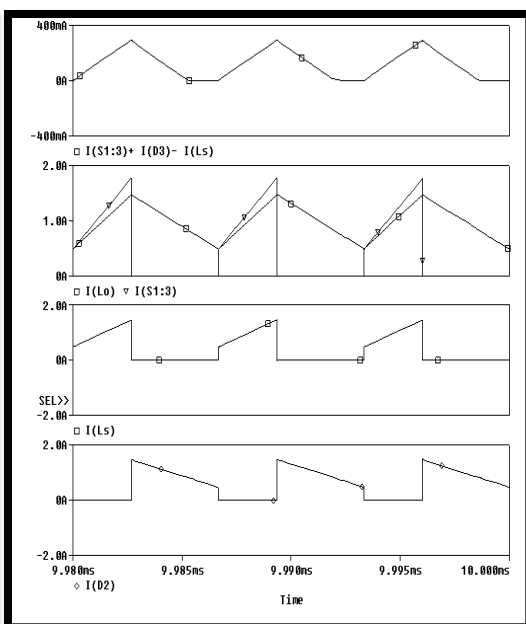
Εικόνα 1-46 Τάσεις πηνίου, διόδων και διακόπτη σε κατάσταση συνεχούς αγωγής.



Εικόνα 1-47 Ρεύματα πηνίου, διόδων και διακόπτη σε κατάσταση συνεχούς αγωγής.



Εικόνα 1.48 Τάσεις πηνίου, διόδων και διακόπτη σε κατάσταση ασυνεχούς αγωγής.



Εικόνα 1.49 Ρεύματα πηνίου, διόδων και διακόπτη σε κατάσταση ασυνεχούς αγωγής.

### 1.4 - Βιβλιογραφία

- Ηλεκτρικές μηχανές AC/DC, Stephen Chapman, 3<sup>η</sup> έκδοση, εκδοτικός οίκος ΤΖΙΟΛΑ.
- Ηλεκτρονικά Ισχύος, Mohan/Underland/Robbins, Β έκδοση, εκδοτικός οίκος ΤΖΙΟΛΑ.
- Ηλεκτρονική, Malvino, 6<sup>η</sup> έκδοση, εκδοτικός οίκος ΤΖΙΟΛΑ.
- Σημειώσεις εργαστηρίου Ηλεκτρονικών Ισχύος, Ν.Π. Πολυζος.

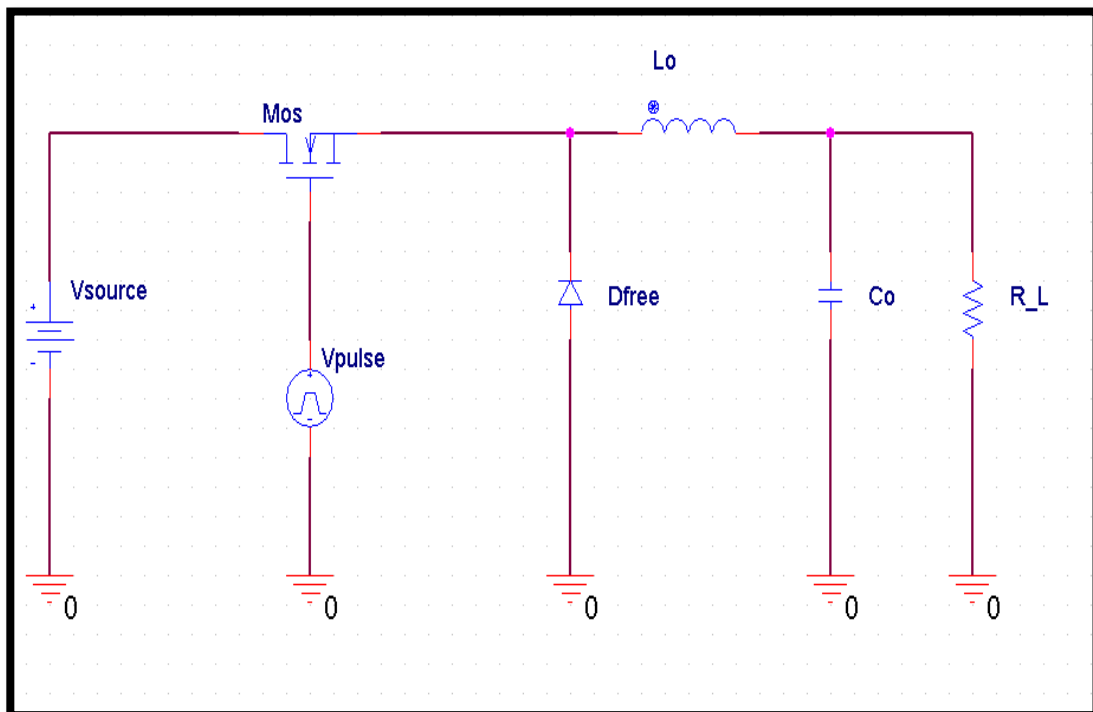
# Κεφάλαιο 2

## Ανάλυση Του DC-DC Μετατροπέα Forward

### Εισαγωγή

Ο μετατροπέας *Forward* προέρχεται από το μετατροπέα υποβιβασμού τάσης (*Buck*) με την προσθήκη ενός μετασχηματιστή τριών τυλιγμάτων και δύο διόδων.

- Ο μετασχηματιστής προσφέρει γαλβανική απομόνωση και δυνατότητα υποβιβασμού/ανύψωσης της τάσης εξόδου.
- Η διάδος  $D_{for}$  τοποθετείται γιατί η μέση τιμή στα άκρα μιας αυτεπαγωγής είναι ίση με μηδέν ( $\bar{V}_L = 0$ ) επομένως, δεν μπορεί να παραλληλιστεί απευθείας με τη διάοδο  $D_{free}$  διότι η μέση τιμή της τάσης είναι αρνητική. Με αυτό τον τρόπο, η μέση τιμή της τάσης στη διάοδο ελεύθερης διέλευσης  $D_{free}$  είναι ίση με την τάση στη διάοδο  $D_{for}$ .
- Η διάδος  $D_{demag}$  και το τριτεύον τύλιγμα του Μ/Σ τοποθετούνται για τον απομαγνητισμό του πυρήνα και την επιστροφή της αποθηκευμένης ενέργειας στην πηγή εισόδου, έτσι ώστε να αποφευχθεί η λειτουργία στον κόρο καθώς και η πιθανή καταστροφή.

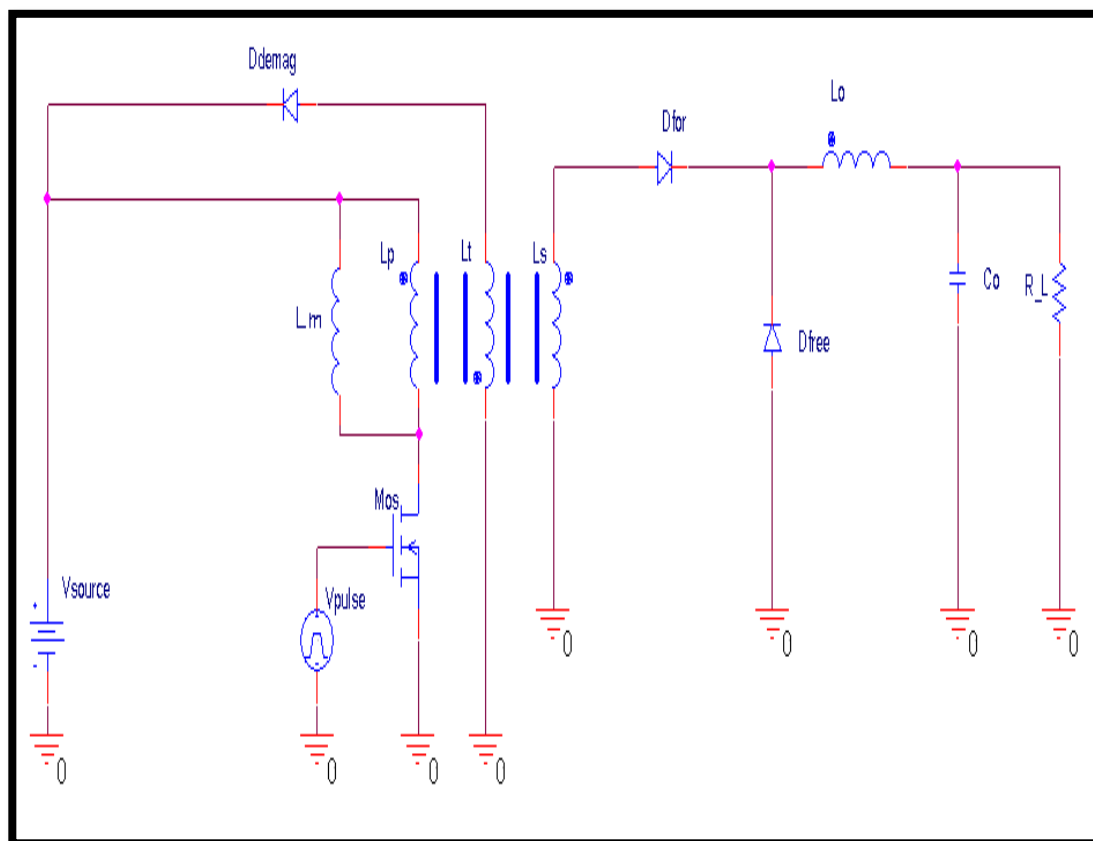


Εικόνα 2-1 Κυκλωματικό διάγραμμα σε Pspice μετατροπέα Buck

## 2.1 - Ο Απλός Μετατροπέας Forward

Παρακάτω εξηγείται συνοπτικά, η λειτουργία του μετατροπέα τόσο σε συνεχή (*Continuous Conduction Mode*) όσο και σε ασυνεχή (*Discontinuous Conduction Mode*) αγωγή με τις εξής παραδοχές :

- Το τρανζίστορ και οι διόδοι θεωρούνται ιδανικά στοιχεία.
- Οι χωρητικότητες τόσο του τρανζίστορ όσο και των διόδων είναι μηδενικές, επομένως έχουμε μηδενικές διακοπτικές απώλειες.
- Οι παρασιτικές χωρητικότητες και αυτεπαγωγές του M/Σ θεωρούνται αμελητέες.
- Τα παθητικά στοιχεία είναι γραμμικά, σταθερά στο χρόνο και ανεξάρτητα της συχνότητας.
- Η σύνθετη αντίσταση εξόδου της πηγής εισόδου  $V_{source}$  θεωρείται μηδενική, τόσο για τα DC όσο και για τα AC στοιχεία του κυκλώματος.
- Τα τρία τυλίγματα του μετασχηματιστή έχουν ίδιο αριθμό περιελίξεων.



Εικόνα 2-2 Κυκλωματικό διάγραμμα σε Pspice μετατροπέα Forward.

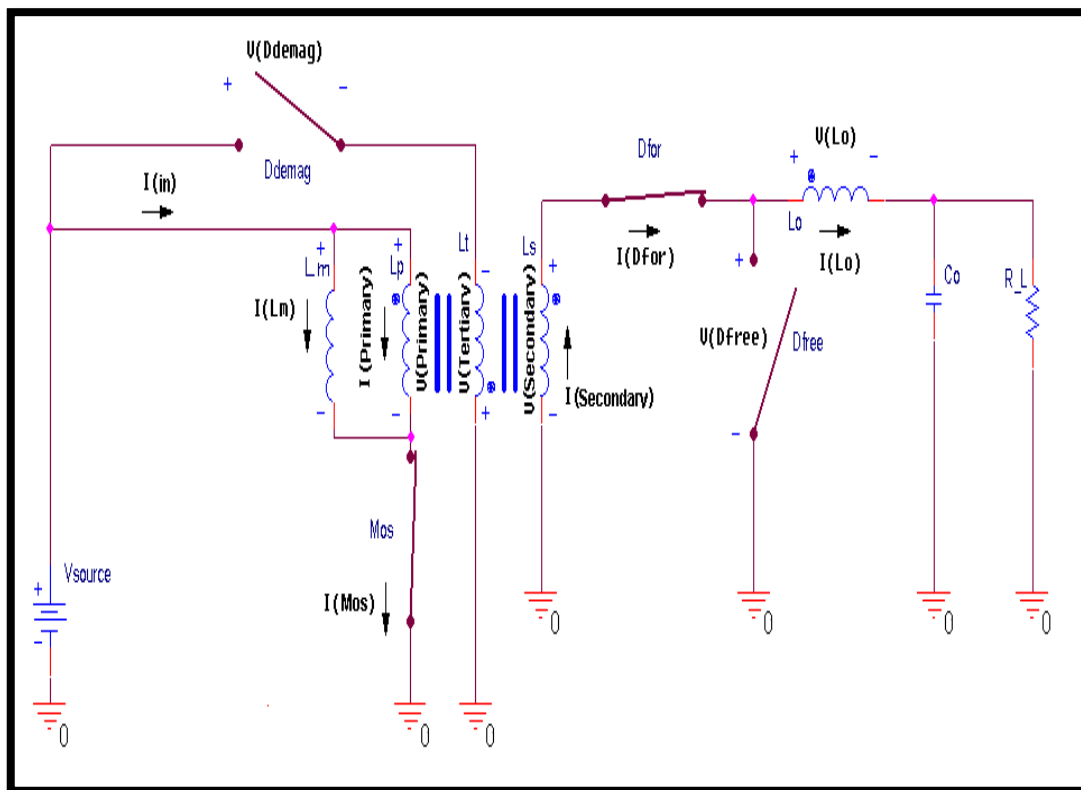
### 2.1.1 - Κατάσταση Συνεχούς Αγωγής (Continuous Conduction Mode)

Σε λειτουργία συνεχούς αγωγής ξεχωρίζουμε τρία χρονικά διαστήματα.

- $0 < t \leq DT$  On state
- $DT < t \leq DT + t_m$  Demagnetization state
- $DT + t_m < t \leq T$  Off state

#### 2.1.1.α - $0 < t \leq DT$

(Τρανζίστορ ON - δίοδος  $D_{for}$  ON - δίοδος  $D_{free}$  OFF - δίοδος  $D_{demag}$  OFF)



Εικόνα 2-3 Κυκλωματικό διάγραμμα μετατροπέα Forward για  $0 < t \leq DT$ .

Στο παραπάνω σχήμα δίνεται, το ισοδύναμο κύκλωμα για αυτή τη χρονική περίοδο λειτουργίας. Ο Μ/Σ μοντελοποιείται από δύο ιδανικά σημεία μετασχηματισμού και την επαγωγή μαγνήτισης  $L_m$ .

Το τρανζίστορ είναι ανοιχτό (σε κατάσταση αγωγής) επομένως, η τάση στην αυτεπαγωγή μαγνήτισης είναι ίση με την τάση εισόδου ( $V_{L_m} = V_{source}$ ) και το ρεύμα  $i_{L_m}$  αυξάνεται γραμμικά. Η τάση στο πηνίο  $L$  είναι η διαφορά των τάσεων δευτερεύοντος και εξόδου και το ρεύμα  $i_L$  αυξάνεται γραμμικά μέχρι τη μέγιστη τιμή  $i_L = \frac{V_1 - V_o}{L} DT + i_{L(0)}$  ( $i_{L(0)} > 0$  λόγω CCM).

Παρακάτω υπολογίζονται οι τάσεις και τα ρεύματα για κάθε στοιχείο του κυκλώματος.



## Κεφάλαιο 2 Ανάλυση Του DC-DC Μετατροπέα Forward.

Οι σχέσεις μεταξύ των τυλιγμάτων και των τάσεων του Μ/Σ είναι  $v_1:v_2:v_3 = N_1:N_2:(-N_3)$  όπου,  $N_1$ ,  $N_2$ , και  $N_3$  ο αριθμός τυλιγμάτων του πρωτεύοντος, δευτερεύοντος και τριτεύοντος αντίστοιχα (το αρνητικό πρόσημο στο τριτεύον συμβολίζει αντίστροφη φορά τυλιγμάτων. Αυτό γίνεται με σκοπό, η επαγόμενη τάση στο τριτεύον να έχει πάντα αντίθετη πολικότητα από την τάση του δευτερεύοντος, ώστε να πολώνει ανάστροφα τη διόδο  $D_{demag}$  κατά την περίοδο αγωγής και ορθά κατά την περίοδο απομαγνήτισης). Ανάλογα οι λόγοι μετασχηματισμού είναι

$$v_1:v_2:v_3 = \frac{N_1}{N_2}:\frac{N_2}{N_2}:(-\frac{N_3}{N_2}) \Leftrightarrow v_1:v_2:v_3 = n_1:1:(-n_3)$$

Τάση και ρεύμα πρωτεύοντος και επαγωγής μαγνήτισης :

$$v_1 = v_{L_m} = V_{source} = L_m \frac{di_{L_m}}{dt}$$

$$i_1 = \frac{i_2}{n_1} = \frac{\frac{V_{source}}{n_1} - V_o}{n_1 L} t + \frac{i_{L(0)}}{n_1}$$

$$i_{L_m} = \frac{1}{L_m} \int_0^t v_{L_m} dt + i_{L_m(0)} = \frac{1}{L_m} \int_0^t V_{source} dt + i_{L_m(0)} = \frac{V_{source}}{L_m} t, (i_{L_m(0)} = 0)$$

Η μέγιστη τιμή του ρεύματος μαγνήτισης υπολογίζεται από την

$$\Delta i_{L_m(max)} = \frac{V_{sourcemax} D_{min}}{f_s L_{m(min)}} = \frac{V_{sourcemin} D_{max}}{f_s L_{m(min)}}, \quad f_s = \frac{1}{T}$$

επομένως, η ελάχιστη τιμή της επαγωγής μαγνήτισης είναι

$$L_{m(min)} = \frac{V_{sourcemax} D_{min}}{f_s \Delta i_{L_m(max)}} = \frac{V_{sourcemin} D_{max}}{f_s \Delta i_{L_m(max)}}$$

Τάση και ρεύμα δευτερεύοντος :

$$v_2 = \frac{v_1}{n_1} = \frac{V_{source}}{n_1}, \quad i_2 = i_{D_{for}} = i_L = \frac{1}{L} \int_0^t v_L dt + i_{L(0)} = \frac{\frac{V_{source}}{n_1} - V_o}{L} t + i_{L(0)}$$

Τάση και ρεύμα Τριτεύοντος :

$$v_3 = -\left(\frac{n_3}{n_1}\right) v_1 = -\left(\frac{n_3}{n_1}\right) V_{source}, \quad i_3 = i_{D_{demag}} = 0$$

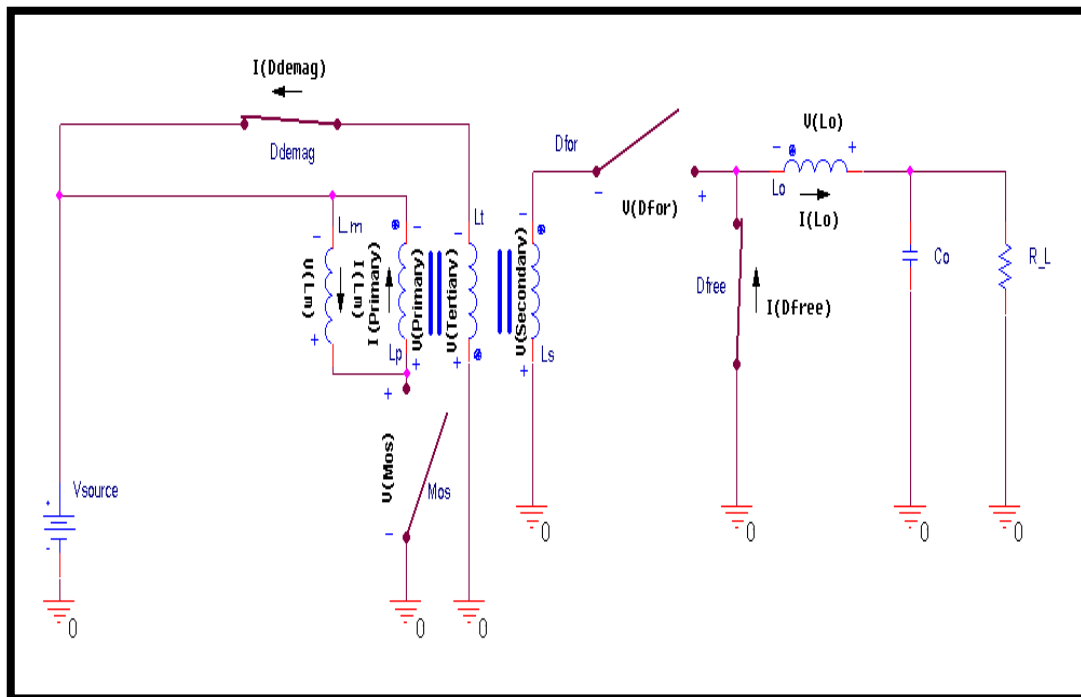
Η τάση του διακόπτη και της διόδου  $D_1$  είναι :

$$v_s = v_{D_1} = 0, \quad i_s = i_1 + i_{L_m} = \frac{\frac{V_{source}}{n_1} - V_o}{n_1 L} + \frac{i_{L_m(0)}}{n_1} + \frac{V_{source}}{L_m} t$$

Ενώ, η τάση του πηνίου  $L$  και των διόδων  $D_2$  και  $D_3$  είναι :

$$v_L = \frac{V_{source}}{n_1} - V_o = L \frac{di_L}{dt}, \quad v_{D_{free}} = -v_L - V_o = -\frac{V_{source}}{n_1}, \quad v_{D_{demag}} = v_3 - V_{source} = -\left(\frac{n_3}{n_1} + 1\right) V_{source}$$

## Κεφάλαιο 2 Ανάλυση Του DC-DC Μετατροπέα Forward.

2.1.1.β -  $DT < t \leq DT + t_m$ (Τρανζίστορ OFF - δίοδος  $D_{for}$  OFF - δίοδος  $D_{free}$  ON - δίοδος  $D_{demag}$  ON)Εικόνα 2-4 Κυκλωματικό διάγραμμα μετατροπέα Forward για  $DT < t \leq DT + t_m$ .

Όταν το τρανζίστορ κλείνει, οι αυτεπαγωγές αντιστρέφουν την τάση τους για να διατηρήσουν το ρεύμα σταθερό. Αυτή η αντιστροφή της τάσης ενεργοποιεί τη δίοδο  $D_{free}$  και πολώνει ανάστροφα τη δίοδο  $D_{for}$ . Το ρεύμα εξόδου  $i_L$  διαρρέει πλέον τη δίοδο ελεύθερης διέλευσης και μειώνεται γραμμικά. Η ισχύς εξόδου παρέχεται από την αποθηκευμένη ενέργεια του πηνίου φίλτρου-εξόδου. Η απομαγνήτιση του πυρήνα γίνεται μέσω της δίοδου  $D_{demag}$ , η οποία έχει μπει σε κατάσταση αγωγής λόγω της ίδιας αντιστροφής τάσης που ενεργοποίησε τη  $D_{free}$ . Το ρεύμα μαγνήτισης διαρρέει πλέον τη  $D_{demag}$  και μειώνεται γραμμικά μέχρι να μηδενιστεί τη χρονική στιγμή  $DT+t_m$  στην οποία τελειώνει κι αυτή η χρονική περίοδος. Σημειώνεται ότι, ο διακόπτης πρέπει να παραμείνει κλειστός για ένα χρονικό διάστημα τέτοιο, ώστε να προλάβει να ολοκληρωθεί η απομαγνήτιση του πυρήνα. Λόγω αυτής της απαίτησης, ο χρόνος αγωγής δεν μπορεί να ξεπεράσει το 50% εάν ο αριθμός τυλιγμάτων πρωτεύοντος - τριτεύοντος είναι ίδιος.

Οι τάσεις και τα ρεύματα δίνονται παρακάτω για τα διάφορα μέρη του κυκλώματος :

Τάση και ρεύμα πρωτεύοντος και επαγωγής μαγνήτισης :

$$v_1 = v_{L_m} = -\left(\frac{n_1}{n_3}\right)v_3 = -\left(\frac{n_1}{n_3}\right)V_{source} = L_m \frac{di_{L_m}}{dt}$$

$$i_{L_m} = \frac{1}{L_m} \int_{DT}^t v_{L_m} dt + i_{L_m}(DT) = -\frac{n_1 V_{source}}{n_3 L_m} (t - DT) + \frac{DV_{source}}{f_s L_m}$$

$$i_1 = -i_{L_m} = \frac{n_1 V_{source}}{n_3 L_m} (t - DT) - \frac{DV_{source}}{f_s L_m}$$

## Κεφάλαιο 2 Ανάλυση Του DC-DC Μετατροπέα Forward.

Τάση και ρεύμα δευτερεύοντος :

$$v_2 = v_{D_{\text{for}}} = -\frac{v_3}{n_3} = -\frac{V_{\text{source}}}{n_3}, \quad i_2 = i_{D_{\text{for}}} = 0$$

Τάση και ρεύμα τριτεύοντος :

$$v_3 = V_{\text{source}}, \quad i_3 = i_{D_{\text{demag}}} = -\frac{n_1}{n_3} i_1 = \frac{n_1}{n_3} i_{L_m} = \frac{n_1^2 V_{\text{source}}}{n_3^2 L_m} (t - DT) + \frac{n_1 D V_{\text{source}}}{n_3 f_s L_m}$$

Η τάση του διακόπτη και της διόδου  $D_{\text{for}}$  είναι :

$$v_s = V_{\text{source}} - v_1 = \left(\frac{n_1}{n_3} + 1\right) V_{\text{source}}, \quad i_s = i_{D_{\text{for}}} = 0$$

Ενώ η τάση του πηνίου  $L$  και των διόδων  $D_{\text{free}}$  και  $D_{\text{demag}}$  είναι :

$$v_L = -V_0 = L \frac{di_L}{dt}, \quad v_{D_{\text{for}}} = v_{D_{\text{demag}}} = 0$$

$$i_{D_{\text{free}}} = i_L = \frac{1}{L} \int_{DT}^t v_L dt + i_{L(DT)} = -\frac{V_0}{L} \int_{DT}^t dt + i_{L(DT)} = -\frac{V_0}{L} (t - DT) + i_{L(DT)}$$

Η κυμάτωση του ρεύματος εξόδου υπολογίζεται από την

$$\Delta i_L = i_{L(DT)} - i_{L(T)} = \frac{V_0 T(1-D)}{L} = \frac{V_0(1-D)}{f_s L}$$

Ο χρόνος  $t_m$  υπολογίζεται από την

$$t_m = \frac{n_3 D}{n_1 f_s} = \frac{n_3}{n_1} DT$$

από την οποία προκύπτει

$$t_{m(\text{max})} = \frac{n_3 D_{\text{max}}}{n_1 f_s} = \frac{n_3}{n_1} D_{\text{max}} T$$

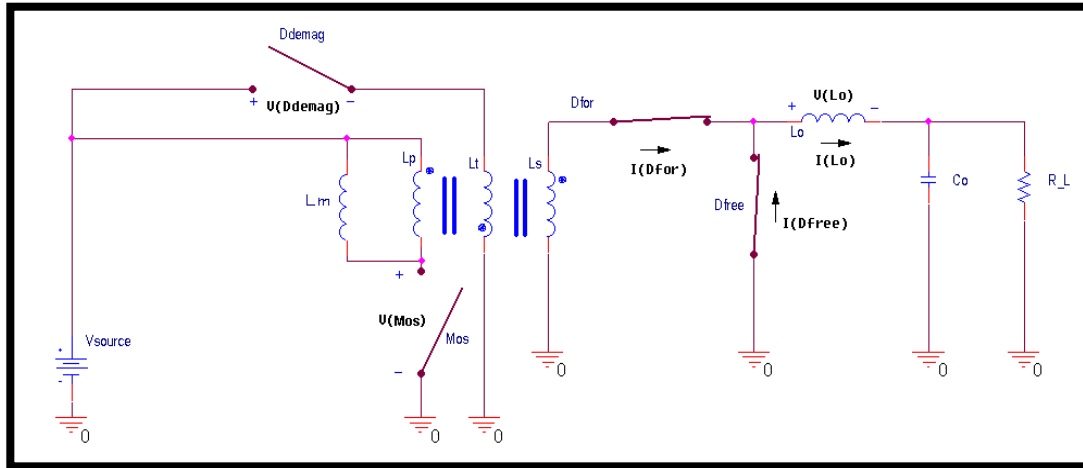
Για

$$n_3 = n_1, \quad t_m = DT, \quad t_{m(\text{max})} = D_{\text{max}} T$$

Κεφάλαιο 2 Ανάλυση Του DC-DC Μετατροπέα Forward.

2.1.1.γ -  $DT + t_m < t \leq T$

(Τρανζίστορ OFF - δίοδος  $D_{for}$  ON - δίοδος  $D_{free}$  ON - δίοδος  $D_{demag}$  OFF)



Εικόνα 2-5 Κυκλωματικό διάγραμμα μετατροπέα Forward για  $DT + t_m < t \leq T$ .

Στο παραπάνω σχήμα δίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα για αυτή τη χρονική περίοδο λειτουργίας.

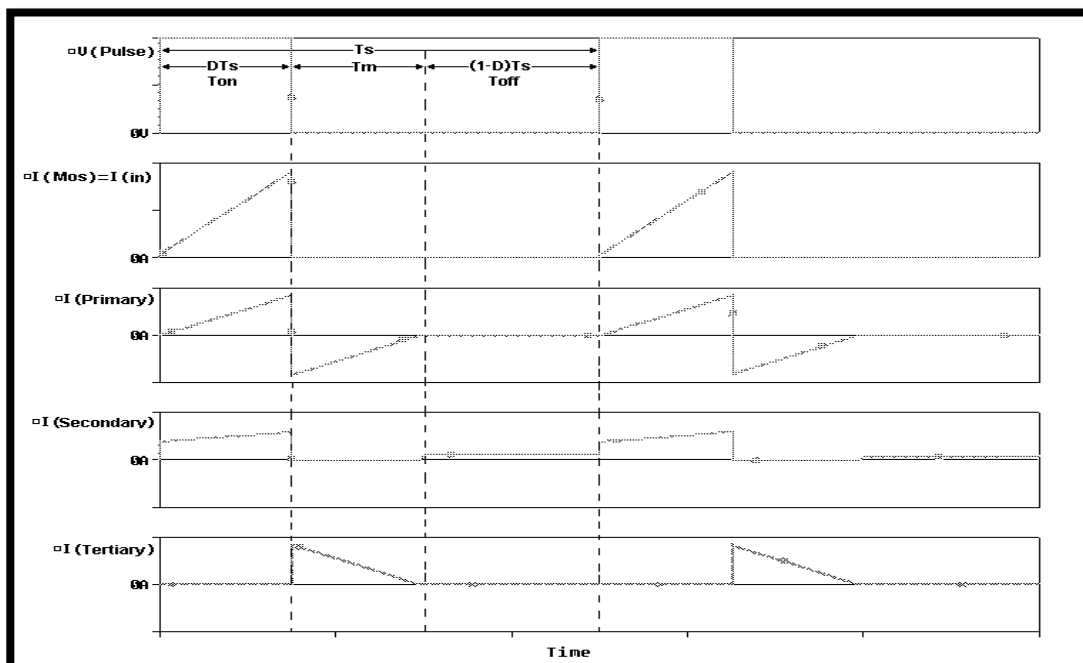
Οι τάσεις δίνονται παρακάτω για τα διάφορα μέρη του κυκλώματος :

$$v_1 = v_2 = v_3 = v_{D_{for}} = v_{D_{free}} = v_{L_m} = 0$$

$$v_s = V_{source}$$

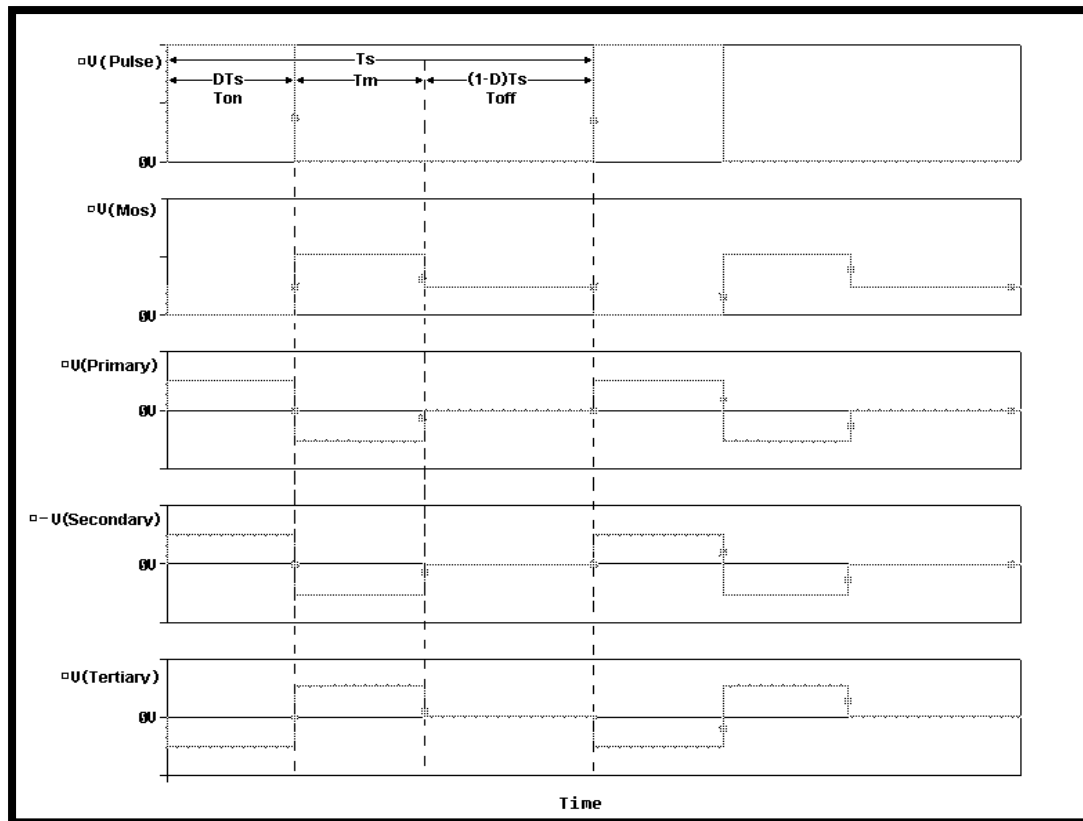
$$v_{D_{demag}} = -V_{source}$$

Παρακάτω δίνονται οι κυματομορφές για όλα τα στοιχεία του κυκλώματος.

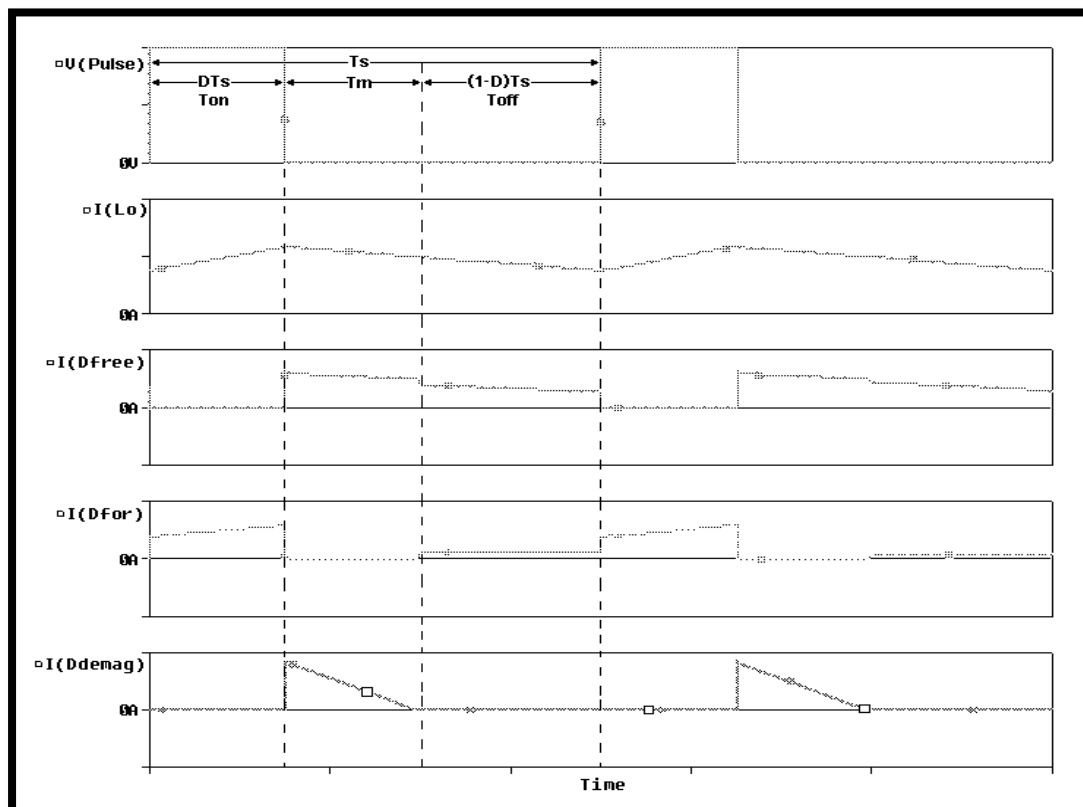


Εικόνα 2-6 Κυματομορφές ρευμάτων (από πάνω προς τα κάτω) παλμοδότησης, διακόπτη, πρωτεύοντος, δευτερεύοντος και τριτεύοντος σε λειτουργία συνεχούς αγωγής.

## Κεφάλαιο 2 Ανάλυση Του DC-DC Μετατροπέα Forward.

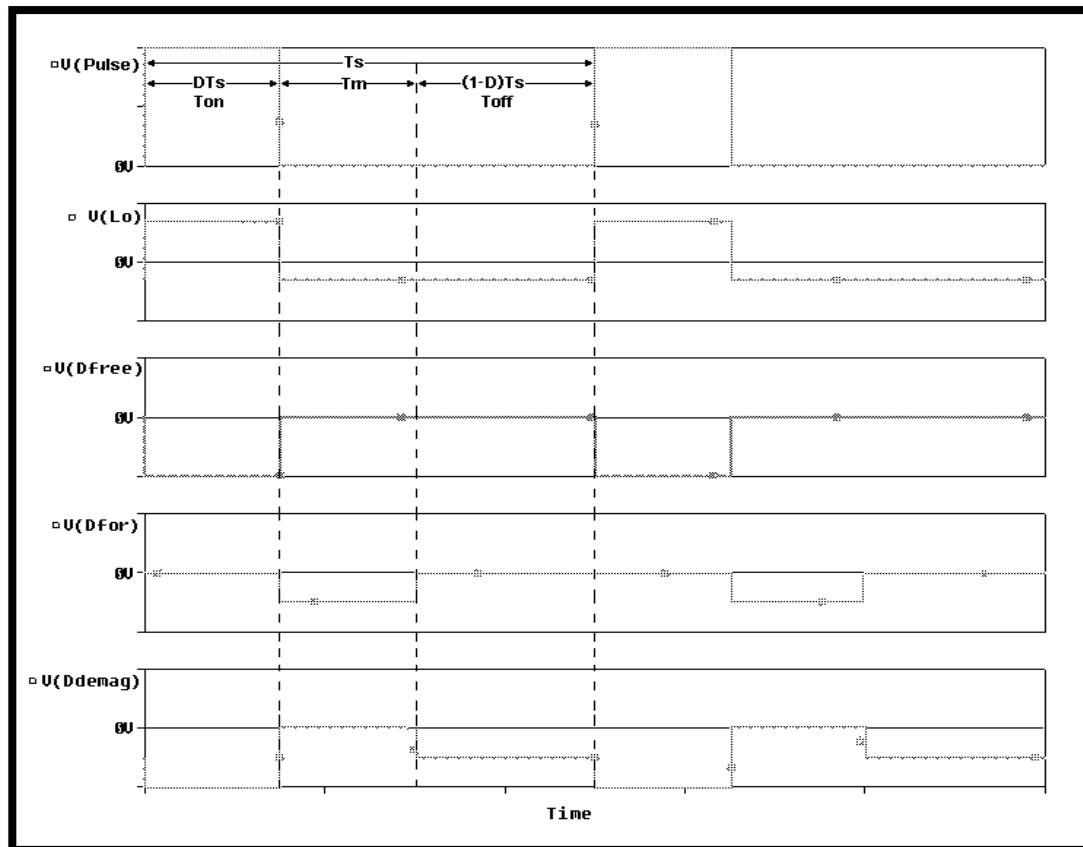


Εικόνα 2-7 Κυματομορφές τάσεων (από πάνω προς τα κάτω) παλμοδότησης, διακόπτη, πρωτεύοντος, δευτερεύοντος και τριτεύοντος σε λειτουργία συνεχούς αγωγής.

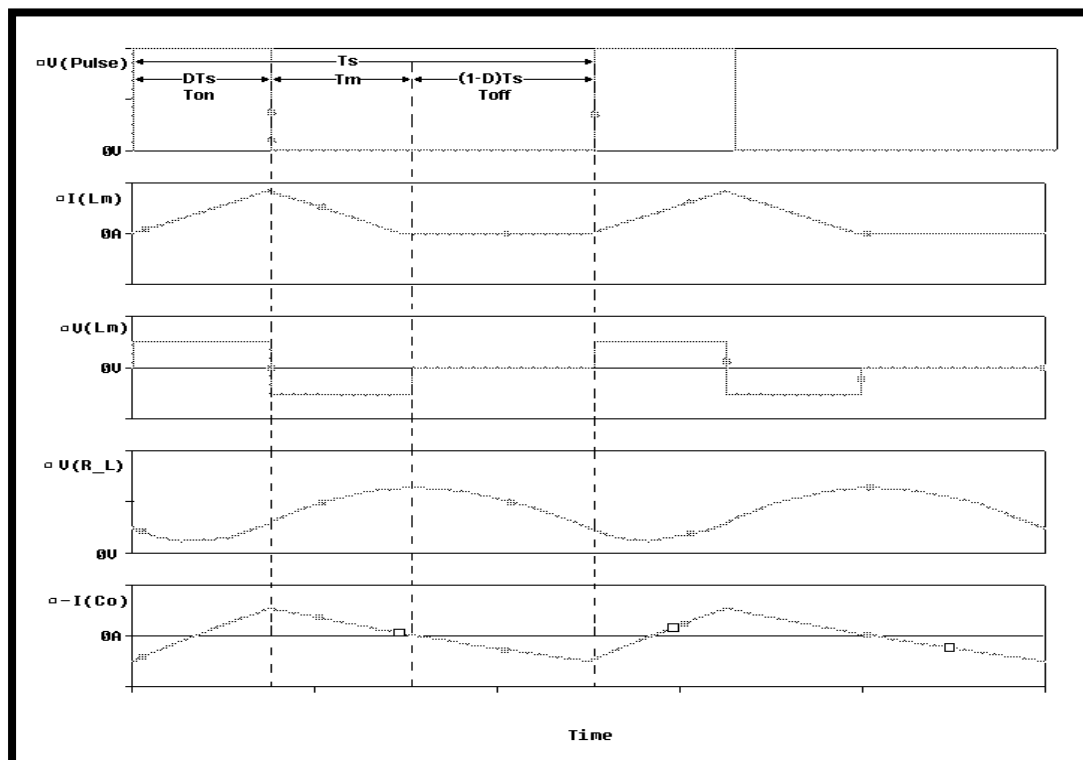


Εικόνα 2-8 Κυματομορφές ρευμάτων (από πάνω προς τα κάτω) παλμοδότησης, πηνίου εξόδου, διόδου  $D_{free}$  και διόδου  $D_{for}$  και διόδου  $D_{demag}$  σε λειτουργία συνεχούς αγωγής.

## Κεφάλαιο 2 Ανάλυση Του DC-DC Μετατροπέα Forward.



Εικόνα 2-9 Κυματομορφές τάσεων (από πάνω προς τα κάτω) παλμοδότησης, πηνίου εξόδου, διόδου  $D_{free}$  και διόδου  $D_{for}$  και διόδου  $D_{demag}$  σε λειτουργία συνεχούς αγωγής.



Εικόνα 2-10 Κυματομορφές (από πάνω προς τα κάτω) παλμοδότησης, ρεύματος επαγωγής μαγνήτισης, τάση επαγωγής μαγνήτισης, τάση εξόδου και ρεύμα πυκνωτή εξόδου σε λειτουργία συνεχούς αγωγής.

### 2.1.2 - Κατάσταση Ασυνεχούς Αγωγής (Discontinuous Conduction Mode)

Σε λειτουργία ασυνεχούς αγωγής ξεχωρίζουμε τέσσερα χρονικά διαστήματα.

- $0 < t \leq DT$  On state
- $DT < t \leq DT + t_m$  Demagnetization state
- $DT + t_m < t \leq (D + D_1)T$  Off state ( $i_L > 0$ )
- $(D + D_1)T < t \leq T$  Off state ( $i_L = 0$ )

Η ανάλυση του κυκλώματος κατά τα τρία πρώτα χρονικά διαστήματα, είναι όμοια με τη λειτουργία σε συνεχή αγωγή με μοναδική διαφορά ότι η αρχική τιμή του ρεύματος του πηνίου φίλτρου-εξόδου είναι μηδέν στην αρχή για κάθε περίοδο λειτουργίας ( $i_{L(0)} = 0$ ).

#### 2.1.2.a - $(D + D_1)T < t \leq T$

(Τρανζίστορ OFF - δίοδος  $D_{for}$  OFF - δίοδος  $D_{free}$  OFF - δίοδος  $D_{demag}$  OFF)

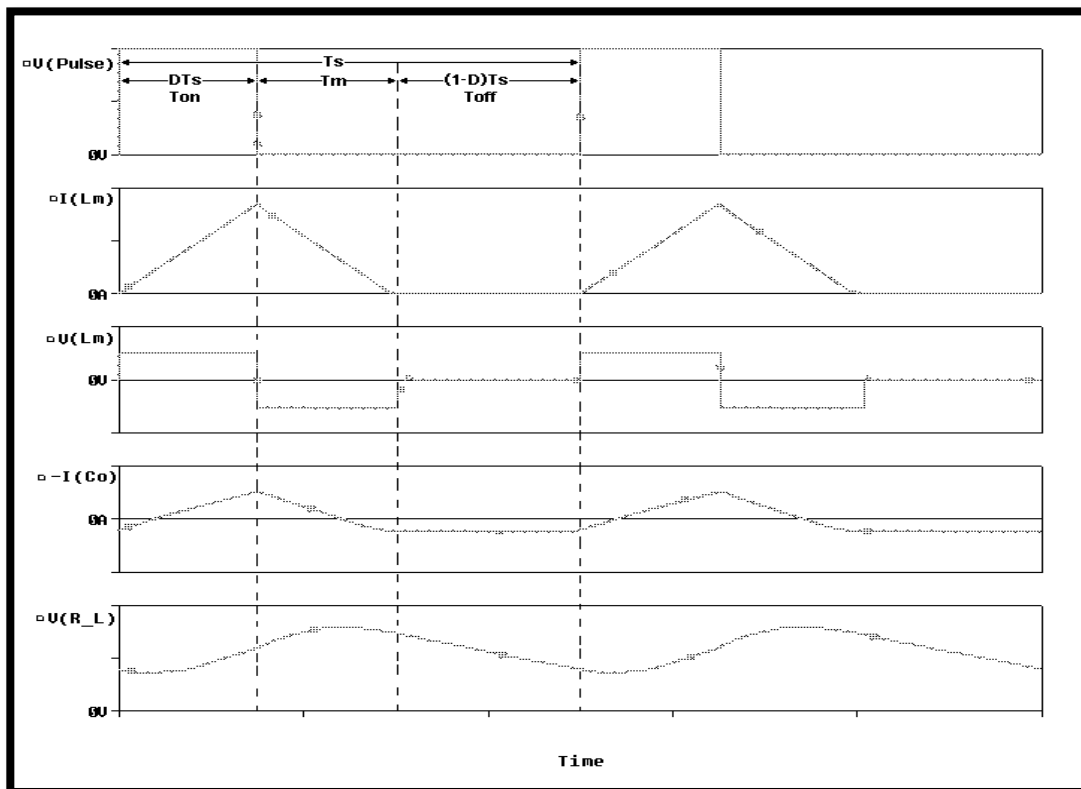
Σε αυτό το χρονικό διάστημα ο διακόπτης και όλες οι διόδοι είναι κλειστές. Η έξοδος τροφοδοτείται από την ενέργεια του πυκνωτή φίλτρου εξόδου C.

$$v_1 = v_2 = v_3 = v_{Lm} = v_L = 0$$

$$i_L = i_{D_{for}} = i_{D_{free}} = i_{D_{demag}} = i_s = 0$$

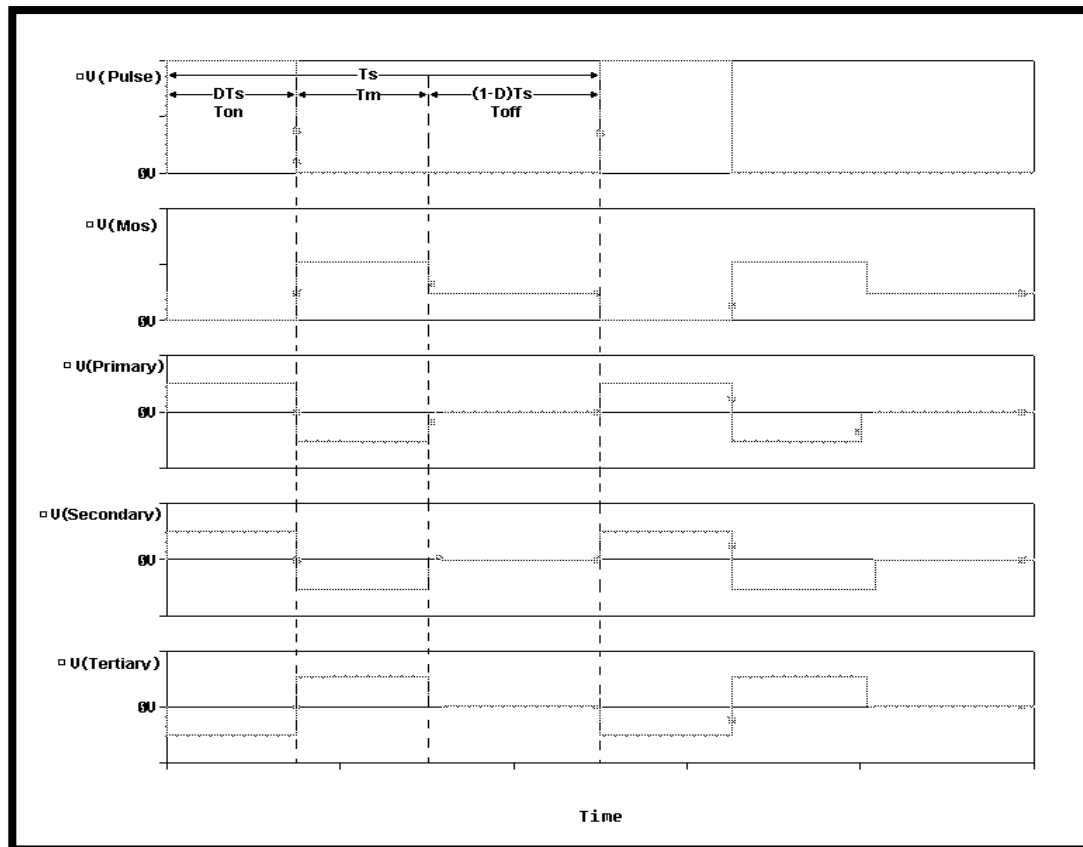
$$v_s = V_{source}, \quad v_{D_{for}} = v_{D_{free}} = -V_0, \quad v_{D_{demag}} = -V_{source}$$

Παρακάτω δίνονται οι κυματομορφές για όλα τα στοιχεία του κυκλώματος.

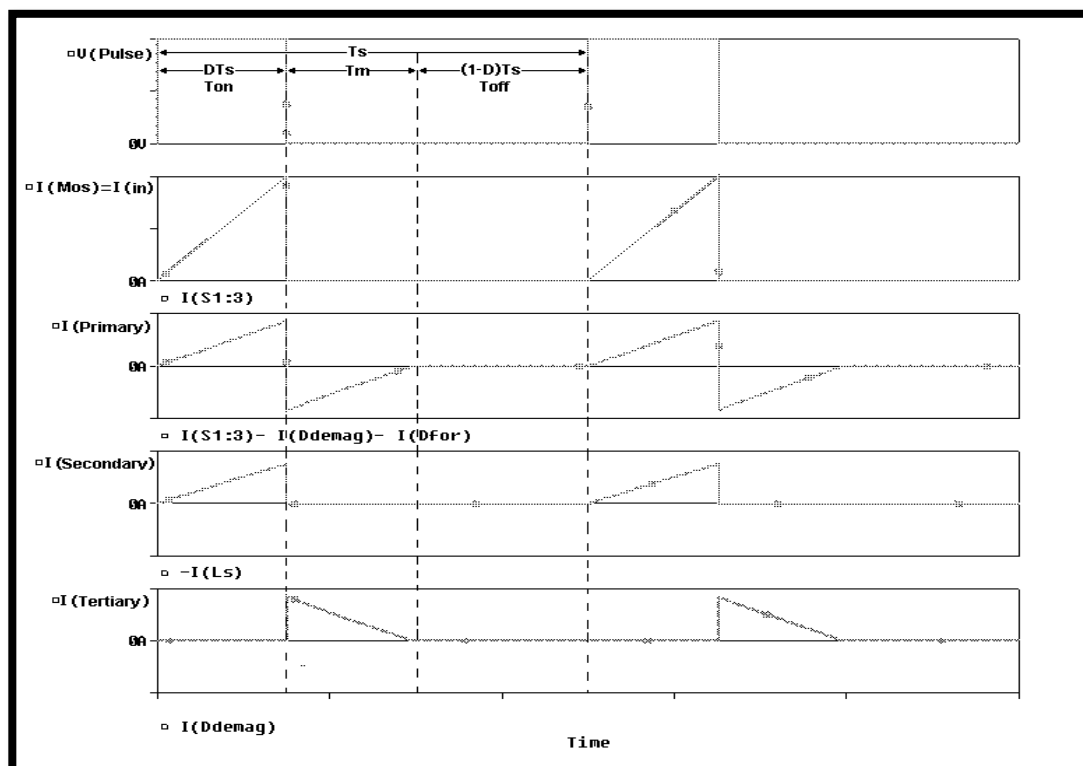


Εικόνα 2-11 Κυματομορφές (από πάνω προς τα κάτω) παλμοδότησης, ρεύματος επαγωγής μαγνήτισης, τάση επαγωγής μαγνήτισης, τάση εξόδου και ρεύμα πυκνωτή εξόδου σε λειτουργία ασυνεχούς αγωγής.

## Κεφάλαιο 2 Ανάλυση Του DC-DC Μετατροπέα Forward.



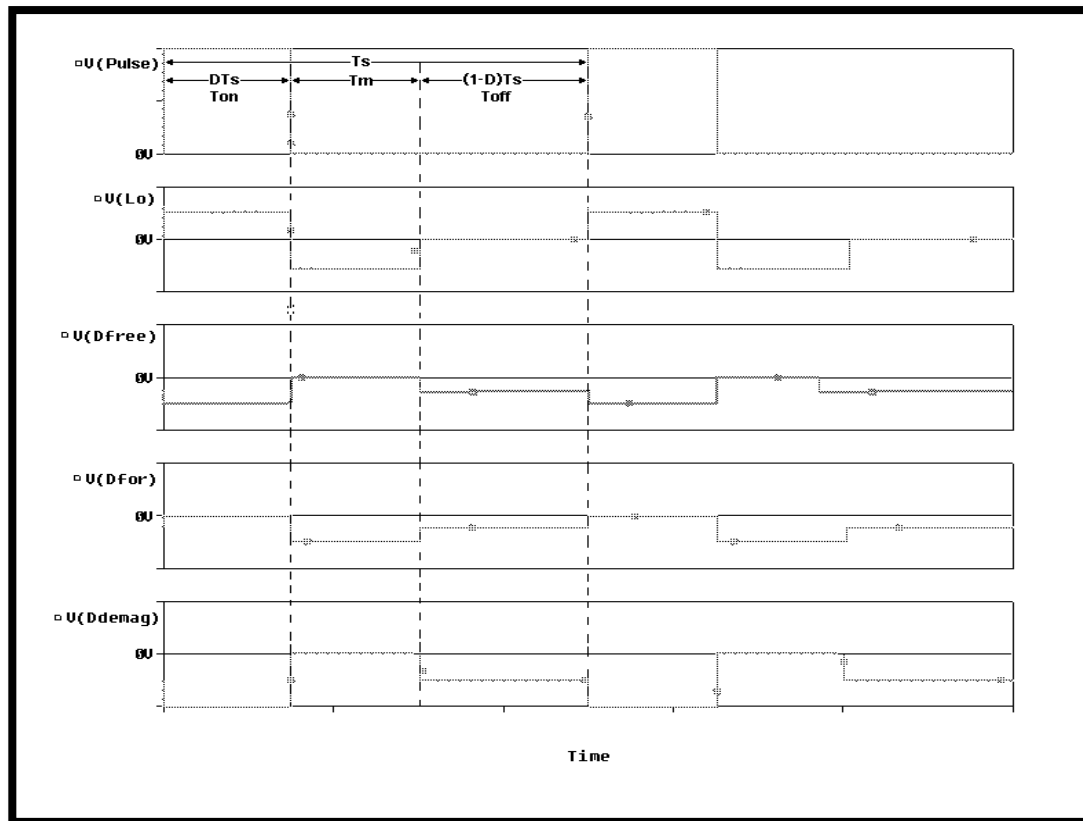
Εικόνα 2-1 Κυματομορφές τάσεων (από πάνω προς τα κάτω) παλμοδότησης, διακόπτη, πρωτεύοντος, δευτερεύοντος και τριτεύοντος σε λειτουργία ασυνεχούς αγωγής.



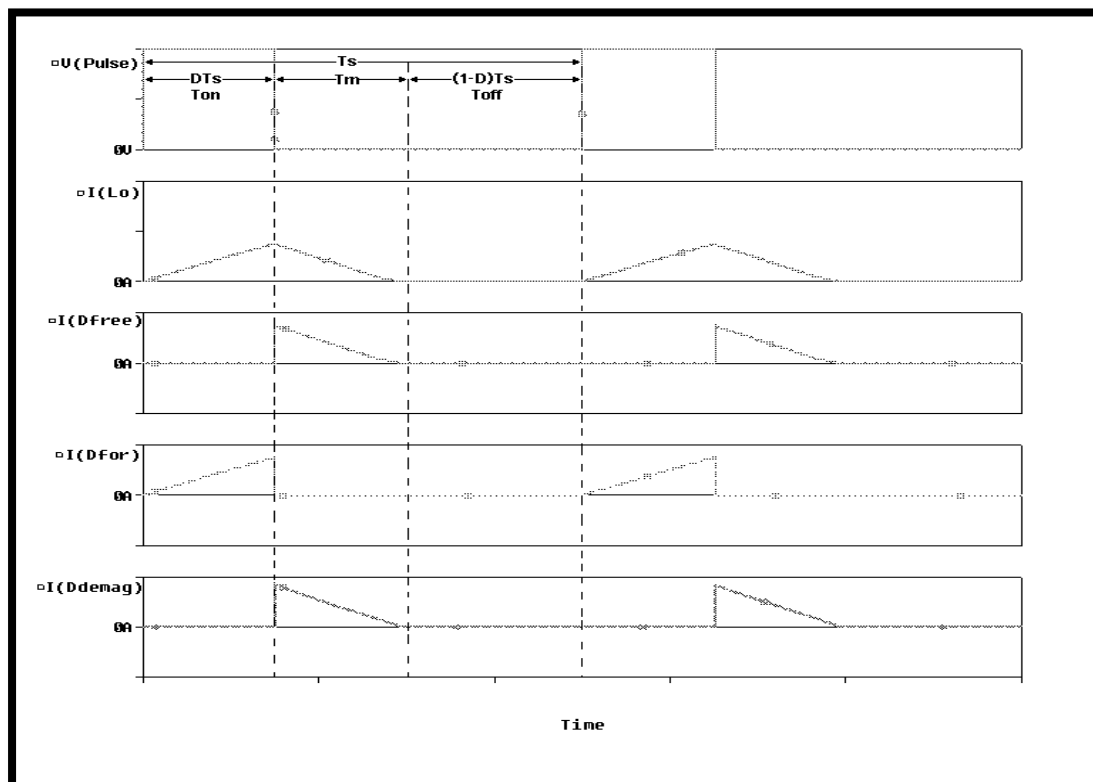
Εικόνα 2-13 Κυματομορφές ρευμάτων (από πάνω προς τα κάτω) παλμοδότησης, διακόπτη, πρωτεύοντος, δευτερεύοντος και τριτεύοντος σε λειτουργία ασυνεχούς αγωγής.



## Κεφάλαιο 2 Ανάλυση Του DC-DC Μετατροπέα Forward.



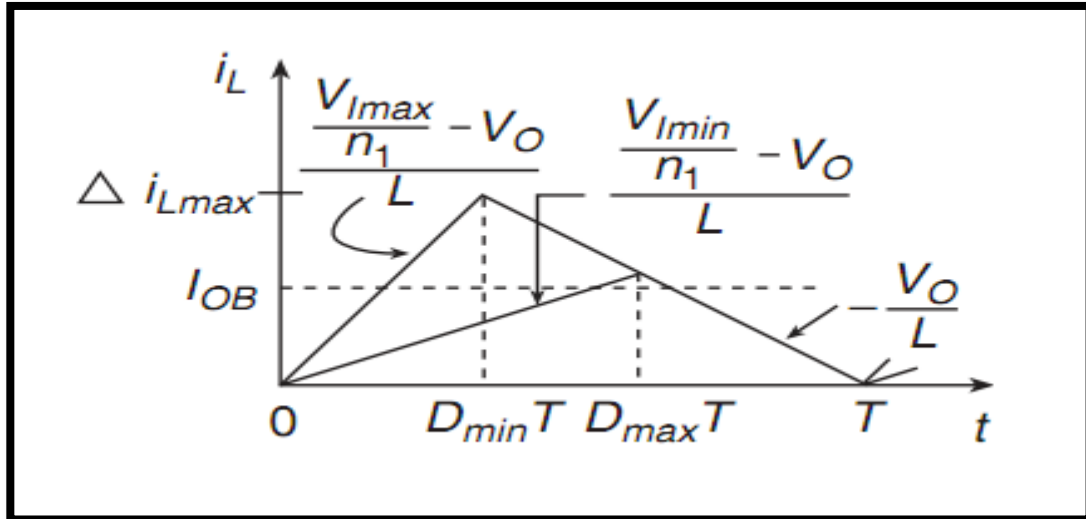
Εικόνα 2-2 Κυματομορφές τάσεων (από πάνω προς τα κάτω) παλμοδότησης, πηνίου εξόδου, διόδου  $D_{free}$ , διόδου  $D_{for}$  και διόδου  $D_{demag}$  σε λειτουργία ασυνεχούς αγωγής.



Εικόνα 2-3 Κυματομορφές ρευμάτων (από πάνω προς τα κάτω) παλμοδότησης, πηνίου εξόδου, διόδου  $D_{free}$ , διόδου  $D_{for}$  και διόδου  $D_{demag}$  σε λειτουργία ασυνεχούς αγωγής.

### 2.1.3 - Όριο CCM/DCM και κυμάτωση τάσης εξόδου.

Τώρα που αναλύθηκε τόσο η συνεχής όσο και η ασυνεχής αγωγή, θα γίνει μια λεπτομερής αναφορά στο όριο μεταξύ των δύο λειτουργιών καθώς και στην κυμάτωση του ρεύματος και της τάσης εξόδου.



Εικόνα 2-4 Κυματομορφή ρεύματος του πηνίου εξόδου στο όριο μεταξύ συνεχούς ασυνεχούς αγωγής.

Στην παραπάνω εικόνα, φαίνεται η κυματομορφή ρεύματος του πηνίου εξόδου στο όριο μεταξύ συνεχούς ασυνεχούς αγωγής καθώς και η κλίση του σε κάθε χρονική περίοδο.

Η οριακή αυτή τιμή του ρεύματος υπολογίζεται από την

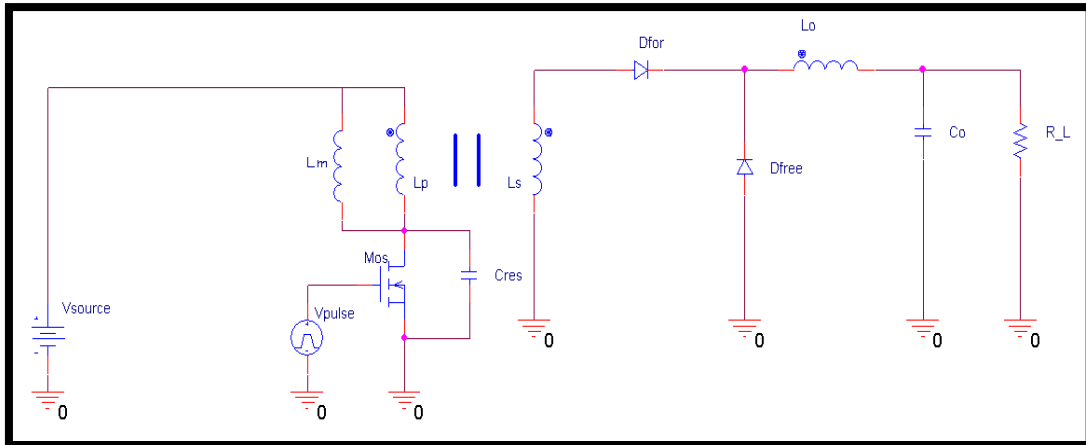
$$I_{OB} = \frac{V_o(1 - D_{min})}{2f_s L_{min}} = \frac{\Delta i_{L_{max}}}{2}$$

Και εξαρτάται από την τιμή της αυτεπαγωγής του πηνίου εξόδου.

Η κυμάτωση της τάσης εξόδου υπολογίζεται προσεγγιστικά από την

$$\Delta v_r \approx \frac{V_o(1 - D_{min})}{8f_s^2 LC}$$

## 2.2 - Μετατροπέας Forward συντονισμένης απομαγνήτισης

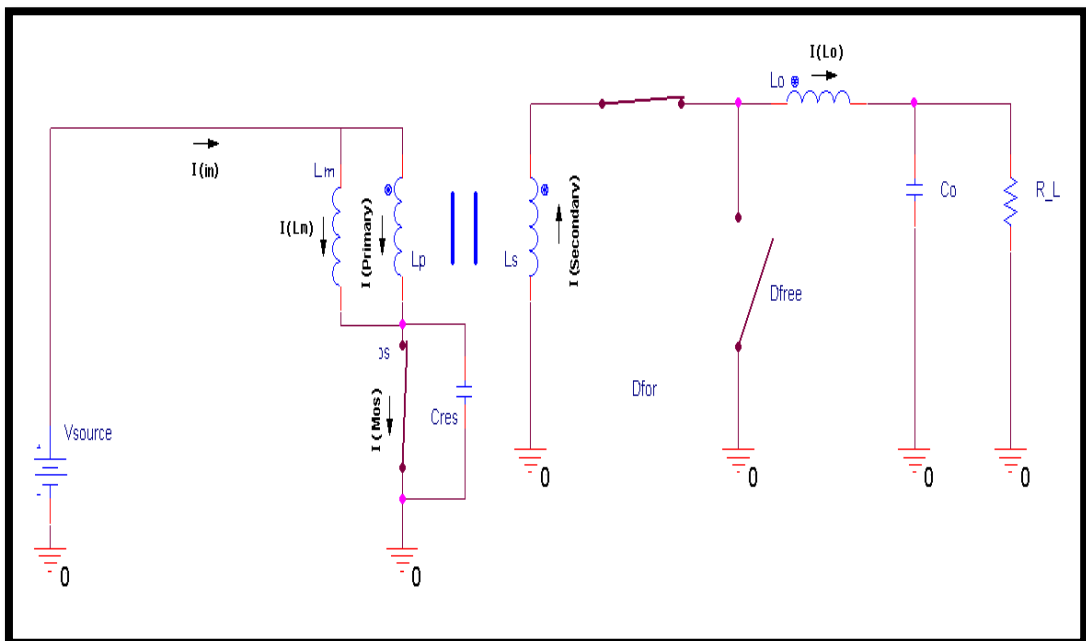


Εικόνα 2-17 Κυκλωματικό διάγραμμα σε Pspice μετατροπέα forward με την τεχνική της συντονισμένης απομαγνήτισης.

Ο μετατροπέας *Forward* συντονισμένης απομαγνήτισης (**Resonant Demagnetization Forward Converter**) είναι μια παραλλαγή του συμβατικού μετατροπέα *forward*, στην οποία αφαιρείται το τρίτερον τύλιγμα και η διόδος  $D_{demag}$ . Η απομαγνήτιση του πυρήνα γίνεται μέσω ενός κυκλώματος συντονισμού, το οποίο αποτελείται από την επαγωγή μαγνήτισης του Μ/Σ και τις συνδυασμένες χωρητικότητες του διακόπτη, του πρωτεύοντος τυλίγματος και όλων των υπολοίπων χωρητικότητας του δευτερεύοντος του Μ/Σ, συμπεριλαμβανομένης της χωρητικότητας της διόδου ελεύθερης διέλευσης  $D_{free}$ , όπως φαίνονται από το πρωτεύον.

### 2.2.1 - $0 < t \leq T_{ON}$ On state

(Τρανζίστορ ON – διόδος  $D_{for}$  ON – διόδος  $D_{free}$  OFF)

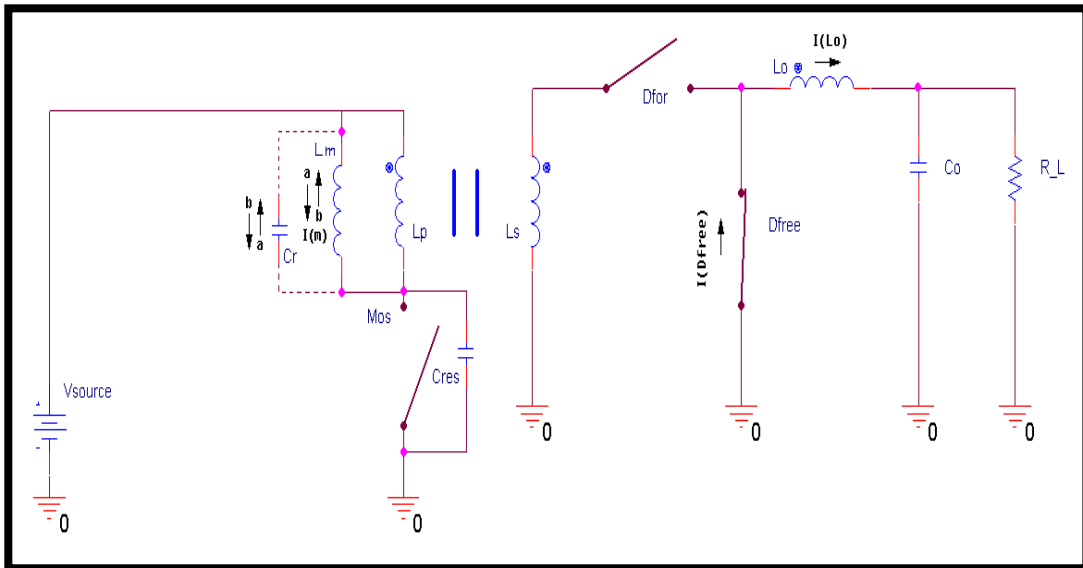


Εικόνα 2-18 Κυκλωματικό διάγραμμα μετατροπέα forward με την τεχνική της συντονισμένης απομαγνήτισης για  $0 < t \leq T_{ON}$ .

## Κεφάλαιο 2 Ανάλυση Του DC-DC Μετατροπέα Forward.

Όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός, η τάση της αυτεπαγωγής μαγνήτισης είναι ίση με την τάση εισόδου και το ρεύμα μαγνήτισης αυξάνει γραμμικά από μια τιμή  $I_1$  σε μια τιμή  $I_2 = I_1 + \frac{V_{source} T_{on}}{L_M}$  στο τέλος της χρονικής περιόδου  $T_{on}$ . Το ρεύμα δευτερεύοντος ρέει μέσω της διόδου  $D_{for}$ .

### 2.2.2 - $T_{ON} < t \leq T_{ON} + T_R$ Demagnetization state (Τρανζίστορ OFF – διόδος $D_{for}$ OFF – διόδος $D_{free}$ ON)



Εικόνα 2-19 Κυκλωματικό διάγραμμα μετατροπέα forward με την τεχνική της συντονισμένης απομαγνήτισης για  $T_{ON} < t \leq T_{ON} + T_R$ .

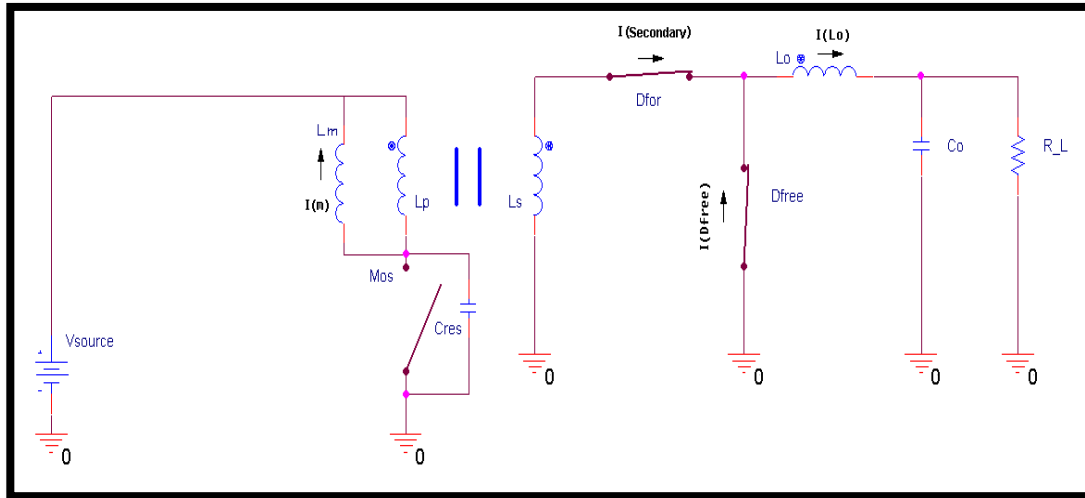
Όταν ο διακόπτης ανοίξει, η τάση πηγής – απαγωγού αυξάνει απότομα στην τιμή της τάσης εισόδου. Όταν τείνει να την ξεπεράσει, αντιστρέφεται η τάση των αυτεπαγωγών. Τότε πολώνεται ανάστροφα η διόδος  $D_{for}$  και αρχίζει να άγει η διόδος ελεύθερης διέλευσης  $D_{free}$ . Ένα ημιτονοειδές ρεύμα απομαγνήτισης ρέει στο κύκλωμα συντονισμού, που αποτελείται από τον παράλληλο συνδυασμό της επαγωγής μαγνήτισης  $L_M$  και της χωρητικότητας  $C_R$  μέρος της οποίας ανακλάται από το δευτερεύον του  $M/\Sigma$ .

$$C_R = C_{D_{for}} \left( \frac{N_s}{N_p} \right)^2 + C_S + C_T$$

Όπου  $C_{D_{for}}$  η εσωτερική χωρητικότητα της διόδου  $D_{for}$ ,  $C_S$  η εξωτερική ( $C_{res}$ ) και εσωτερική χωρητικότητα του διακόπτη, και  $C_T$  η παρασιτική χωρητικότητα του  $M/\Sigma$ . Η χωρητικότητα  $C_R$  φορτίζεται από μηδέν σε μια μέγιστη τιμή  $I_2 \sqrt{\frac{L_M}{C_R}}$  και επιστρέφει στο μηδέν. Επομένως, το ρεύμα μαγνήτισης στο τέλος του χρόνου  $T_{ON} + T_R$  ισούται με  $-I_2$ . Η τάση απαγωγού-πηγής ( $V_{DS}$ ) είναι ίση με  $V_{source}$  και η μέγιστη τιμή  $V_{source} + I_2 \sqrt{\frac{L_M}{C_R}}$  εμφανίζεται στα μέσα αυτής της χρονικής περιόδου. Ο χρόνος  $T_R$  ισούται με το μισό μιας πλήρους περιόδου συντονισμού

$$f_{Res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_M C_R}}, \quad T_R = \pi\sqrt{L_M C_R}$$

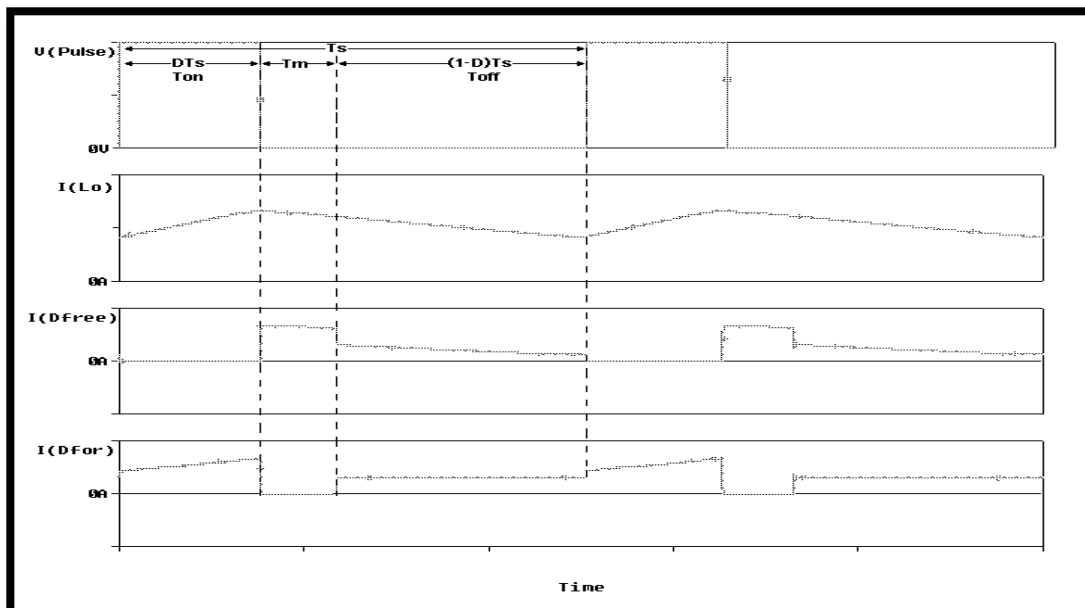
## Κεφάλαιο 2 Ανάλυση Του DC-DC Μετατροπέα Forward.

2.2.2 -  $T_{ON} + T_R < t \leq T$  Off state(Τρανζίστορ OFF – δίοδος  $D_{for}$  ON – δίοδος  $D_{free}$  ON)

Εικόνα 2-20 Κυκλωματικό διάγραμμα μετατροπέα forward με την τεχνική της συντονισμένης απομαγνήτισης για  $T_{ON} + T_R < t \leq T$ .

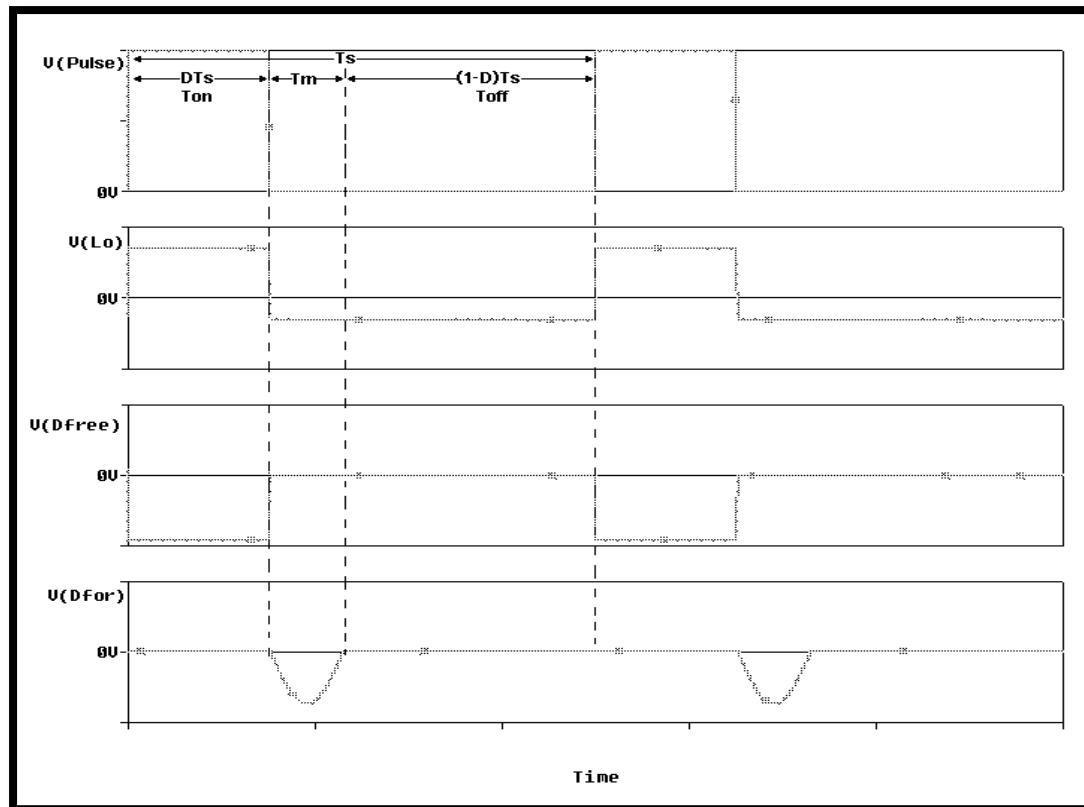
Μετά την απομαγνήτιση του πυρήνα και οι δύο δίοδοι άγουν, η τάση του Μ/Σ είναι μηδέν λόγω του ανακλώμενου εικονικού βραχυκυκλώματος της διόδου ελεύθερης διέλευσης  $D_{free}$  και το ρεύμα μαγνήτισης είναι ίσο με  $-I_2$  για όλο το υπόλοιπο χρονικό διάστημα. Το τέλος αυτής της περιόδου προσδιορίζει, το τέλος ενός πλήρους κύκλου λειτουργίας και εφόσον είμαστε σε σταθερή κατάσταση  $I_1 = -I_2$  οπότε αντικαθιστώντας στην εξίσωση του  $I_2$  παίρνουμε την αρχική τιμή του ρεύματος μαγνήτισης  $I_1 = -\frac{V_{source} T_{on}}{2L_M}$ . Σε αυτό το χρονικό διάστημα, η τάση στο πρωτεύον του Μ/Σ είναι μηδέν οπότε η τάση του διακόπτη είναι  $V_{DS} = V_{source}$ .

Παρακάτω δίνονται οι κυματομορφές του κυκλώματος σε κατάσταση συνεχούς αγωγής.

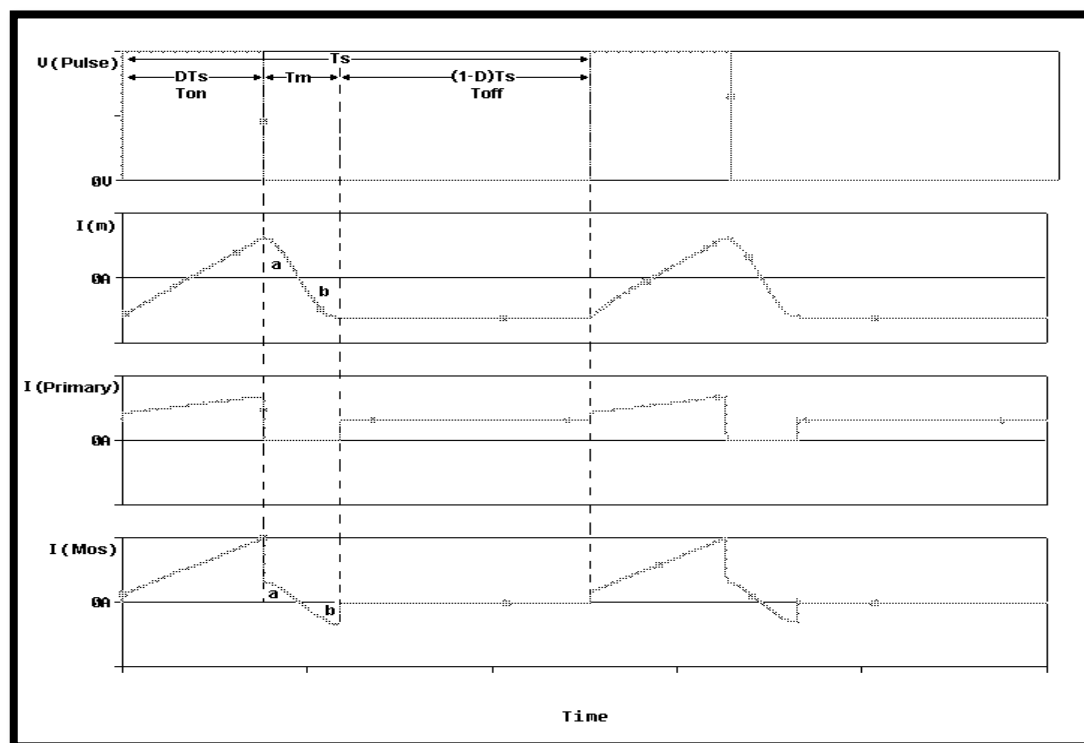


Εικόνα 2-21 Κυματομορφές ρευμάτων (από πάνω προς τα κάτω) παλμοδότησης, πηνίου εξόδου, διόδου  $D_{free}$  και διόδου  $D_{for}$  σε λειτουργία συνεχούς αγωγής.

## Κεφάλαιο 2 Ανάλυση Του DC-DC Μετατροπέα Forward.

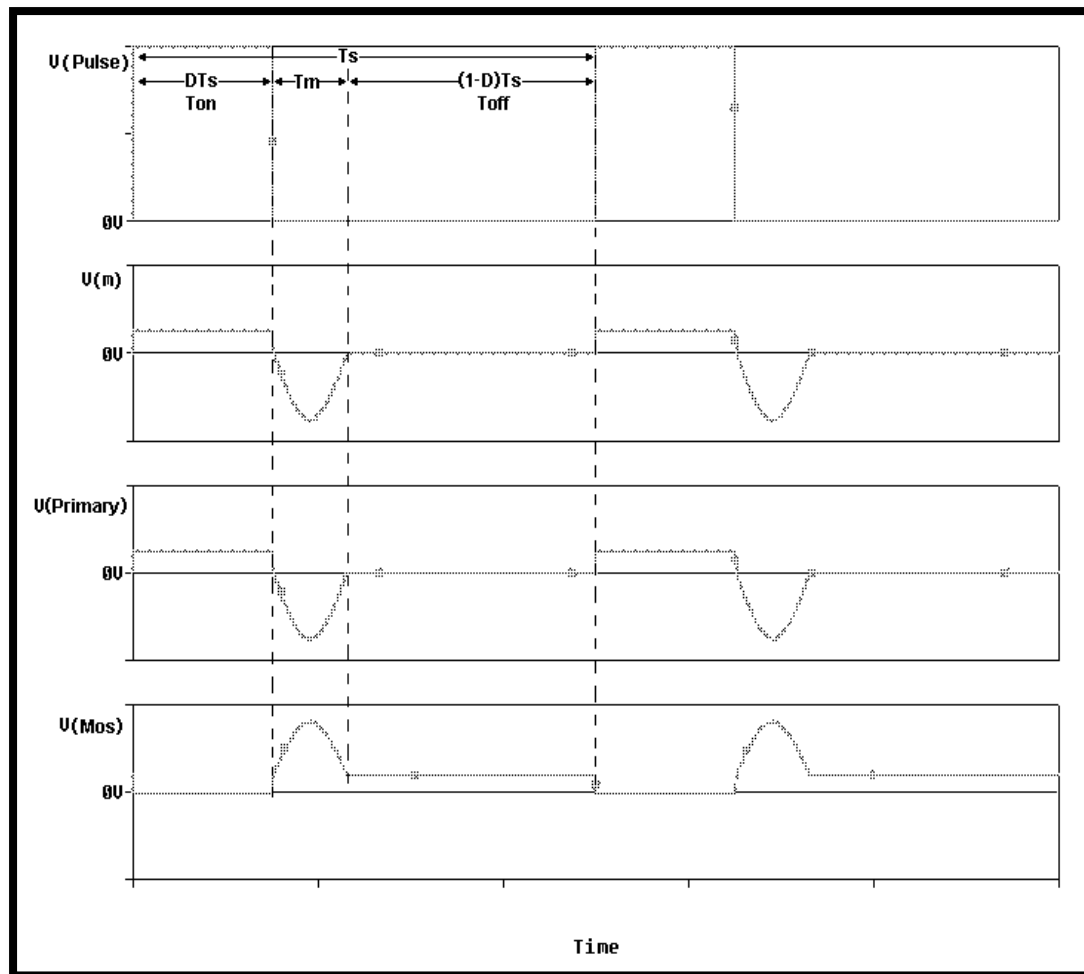


Εικόνα 2-22 Κυματομορφές τάσεων (από πάνω προς τα κάτω) παλμοδότησης, πηνίου εξόδου, διόδου  $D_{free}$  και διόδου  $D_{for}$  σε λειτουργία συνεχούς αγωγής.



Εικόνα 2-23 Κυματομορφές ρευμάτων (από πάνω προς τα κάτω) παλμοδότησης, επαγωγής μαγνήτισης, πρωτεύοντος και διακόπτη σε λειτουργία συνεχούς αγωγής.

## Κεφάλαιο 2 Ανάλυση Του DC-DC Μετατροπέα Forward.



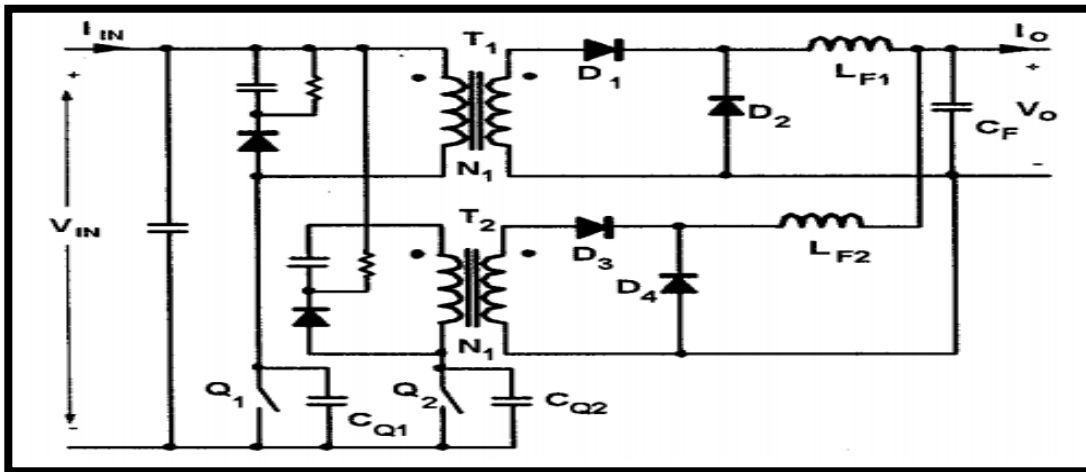
Εικόνα 2-24 Κυματομορφές τάσεων (από πάνω προς τα κάτω) παλμοδότησης, επαγωγής μαγήτισης, πρωτεύοντος και διακόπτη σε λειτουργία συνεχούς αγωγής.

## 2.3 - Τεχνικές Παραλληλισμού Μετατροπέων forward.

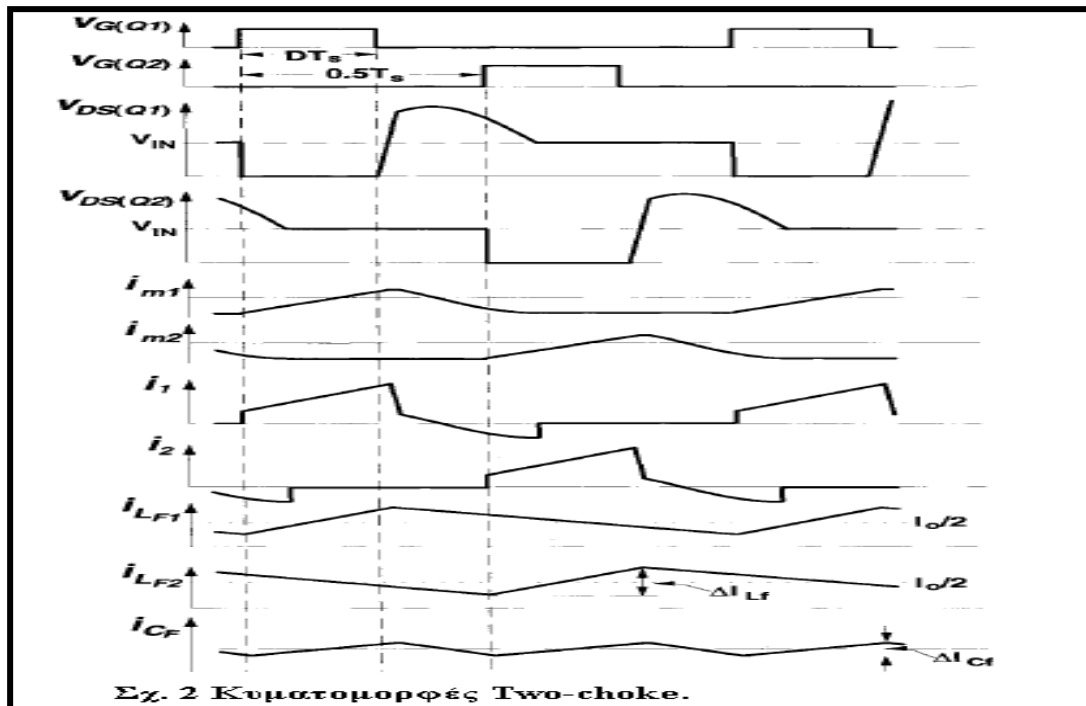
Ο παραλληλισμός διαφόρων μετατροπέων είναι μια γνωστή τεχνική που χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές υψηλής ισχύος για να επιτύχουμε την επιθυμητή ισχύ εξόδου χρησιμοποιώντας M/Σ και πηνία μικρότερου μεγέθους.

### 2.3.1 - Προσέγγιση με δύο πλήρης μετατροπείς (Two-choke).

Σε αυτή την προσέγγιση χρησιμοποιούνται δύο μετατροπείς συντονισμένης απομαγνήτισης (*resonant demagnetization*) με μόνο κοινό στοιχείο τον πυκνωτή εξόδου. Η αρχή λειτουργίας των παραλληλισμένων μετατροπέων είναι όμοια με τη λειτουργία του *RDFC* (*Resonant demagnetization forward converter*) γιατί ο κάθε μετατροπέας λειτουργεί ανεξάρτητα.



Εικόνα 2-25 Κυκλωματικό διάγραμμα παραλληλισμένων μετατροπέων forward με δύο πηνία εξόδου (Two Choke).



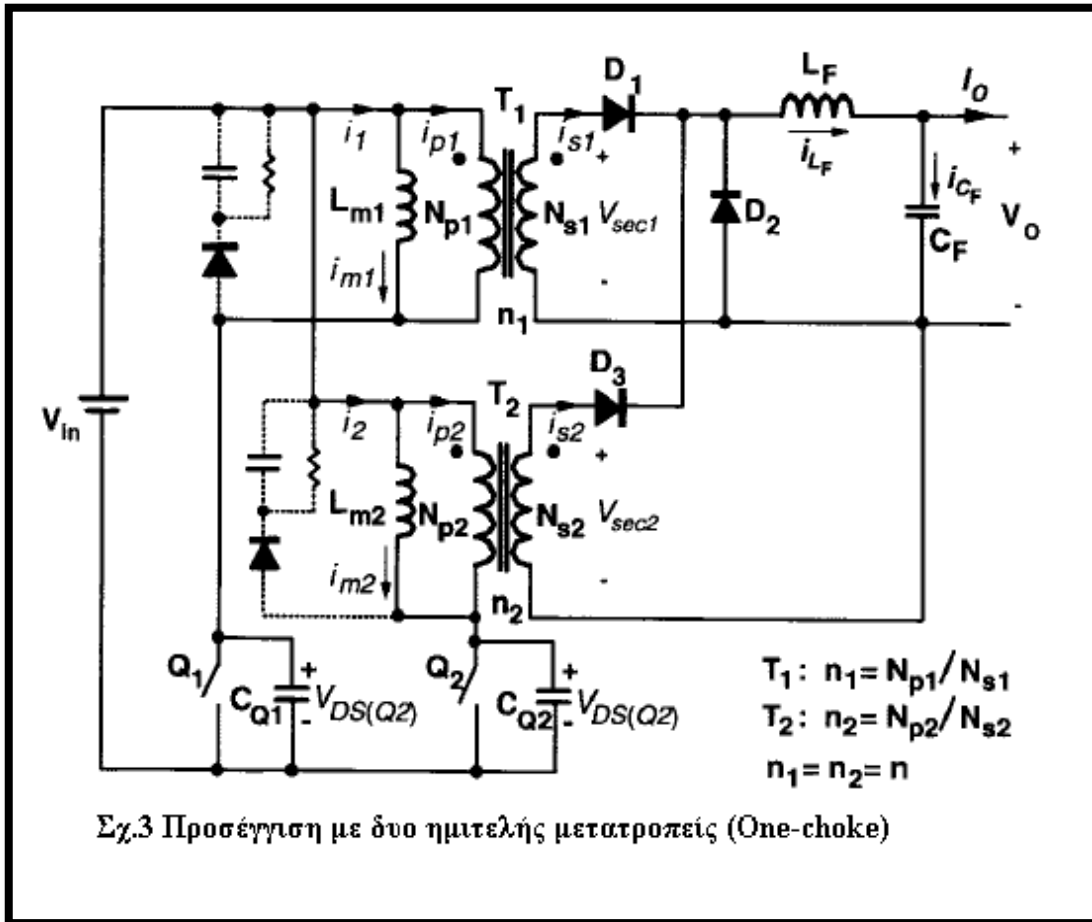
Σχ. 2 Κυματομορφές Two-choke.

Εικόνα 2-26 Κυματομορφές ρευμάτων – τάσεων Two Choke.



### 2.3.2 - Προσέγγιση με δύο ημιτελής μετατροπείς (One-choke)

Σε αυτή την προσέγγιση χρησιμοποιούμε ένα κοινό LC φίλτρο εξόδου και κοινή δίοδο ελεύθερης διέλευσης, οπότε δεν είναι δυνατόν οι μετατροπείς να λειτουργήσουν ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο. Το σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος δίνεται παρακάτω.



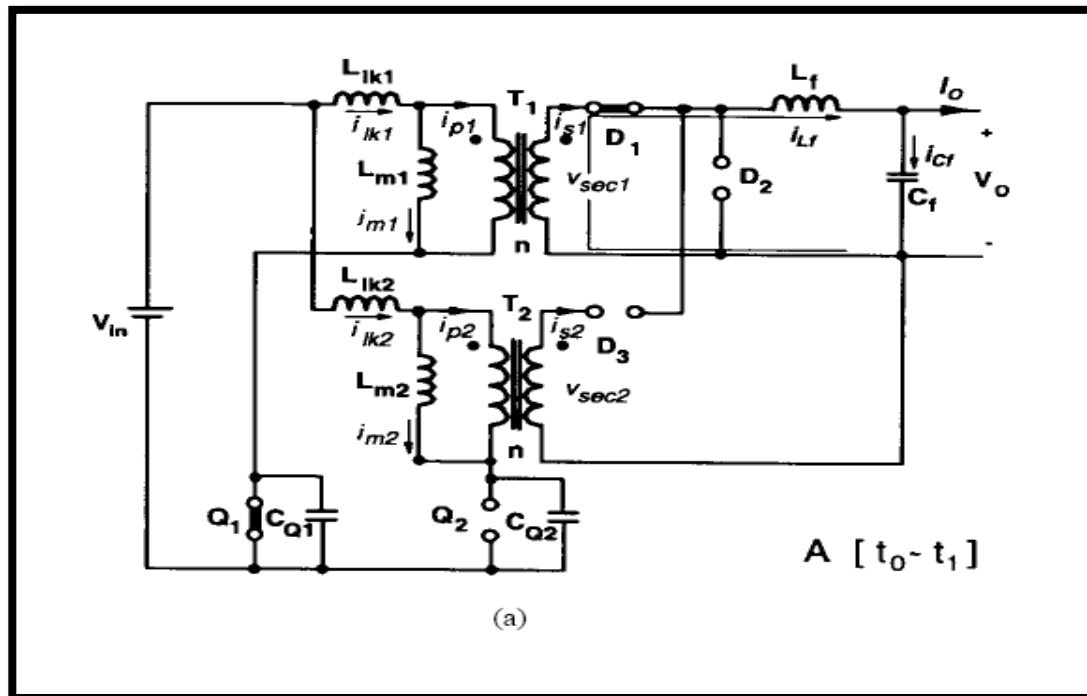
Εικόνα 2-27 Κυκλωματικό διάγραμμα παραλληλισμένων μετατροπέων forward με ένα πηνίο εξόδου (One Choke).

Η ανάλυση της λειτουργίας με ένα choke γίνεται με τις παρακάτω παραδοχές.

1. Όλα τα ημιαγωγικά στοιχεία είναι ιδανικά.
2. Όλοι οι μετασχηματιστές είναι ιδανικοί με επιπρόσθετες επαγωγές μαγνήτισης και διαρροής.
3. Οι πυκνωτές που είναι παραλληλισμένοι με τους διακόπτες συμβολίζουν την ολική χωρητικότητα που είναι συνδεδεμένη ανάμεσα σε πηγή και απαγωγό (παρασιτική και εξωτερική χωρητικότητα).

Κατά τη λειτουργία με ένα *choke* διακρίνουμε, πέντε διαφορετικά χρονικά διαστήματα με πέντε ισοδύναμα κυκλώματα. Παρακάτω αναλύεται κάθε ένα ξεχωριστά.

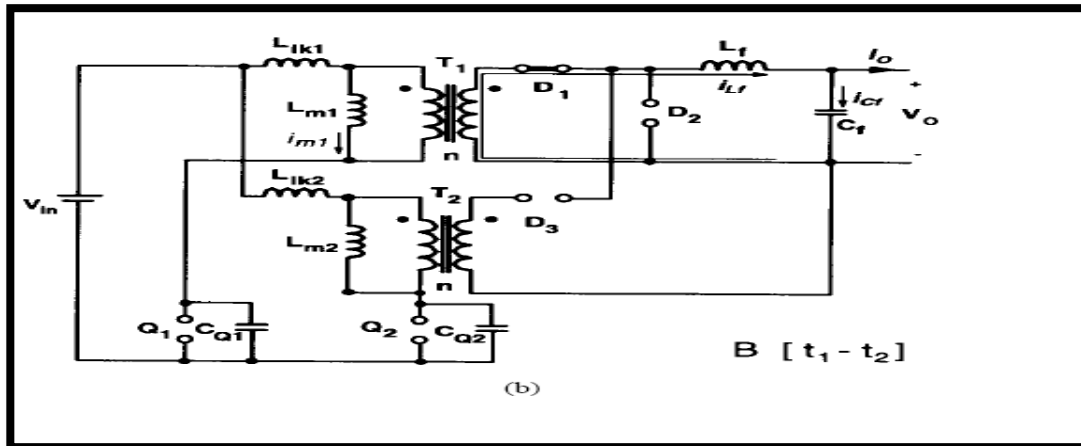
## Κεφάλαιο 2 Ανάλυση Του DC-DC Μετατροπέα Forward.

2.3.2.α - Χρονικό διάστημα A ( $t_0-t_1$ ).(Τρανζίστορ  $Q_1$  ON, Τρανζίστορ  $Q_2$  OFF, Δίοδος  $D_1$  ON, Δίοδος  $D_2$  OFF, Δίοδος  $D_3$  OFF)Εικόνα 2-28 Κυκλωματικό διάγραμμα One Choke κατά το χρονικό διάστημα A( $t_0-t_1$ ).

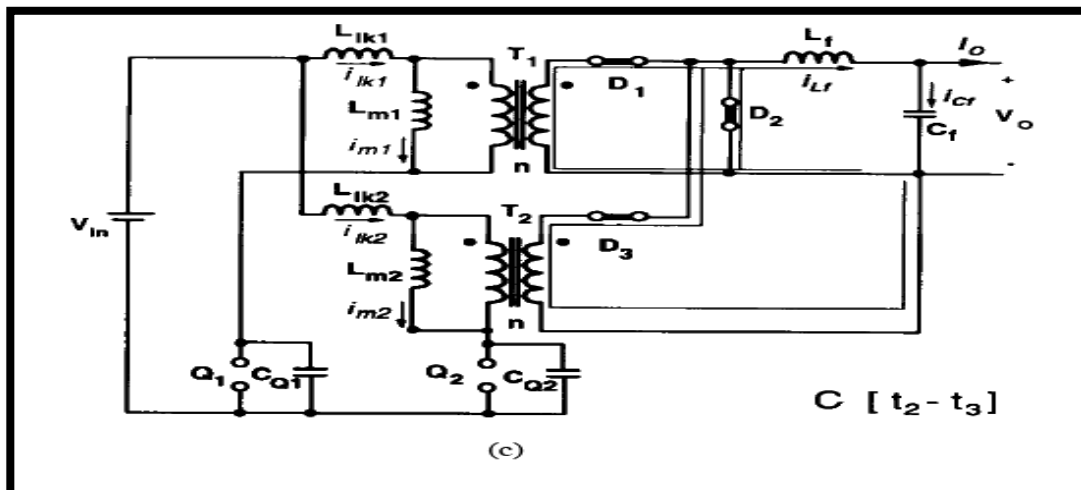
Τη χρονική στιγμή  $t_0$  το τρανζίστορ  $Q_1$  εισέρχεται σε κατάσταση αγωγής και το ρεύμα του πηνίου φίλτρου-εξόδου εναλλάσσεται από τη δίοδο ελεύθερης διέλευσης  $D_2$  στη δίοδο  $D_1$ . Η εναλλαγή αυτή δεν επηρεάζει την κατάσταση λειτουργίας της δίοδος  $D_3$  διότι το δυναμικό της καθόδου αυξάνεται από 0 Volt (λόγω της αγωγής της  $D_2$  για  $t < t_0$ ) σε  $V_{sec1} = \frac{V_{in}}{n}$  επομένως, για να μπει σε κατάσταση αγωγής η  $D_3$  πρέπει το δυναμικό της ανόδου να γίνει  $V_{sec2} \geq \frac{V_{in}}{n}$ .

Λόγω λειτουργίας αντίφασης πριν την ενεργοποίηση του τρανζίστορ  $Q_1$  ο  $M/\Sigma_2$  είναι σε κατάσταση απομαγνήτισης, ο  $M/\Sigma_2$  (μια αρνητική τάση εφαρμόζεται στο πρωτεύον του επειδή  $V_{DS(Q2)} > \frac{V_{IN}}{n}$ ). Η επαναφορά του πυρήνα του  $M/\Sigma_2$  συνεχίζει μετά την ενεργοποίηση του τρανζίστορ  $Q_1$  και η τάση απαγωγού-πηγής του  $Q_2$  συνεχίζει να μειώνεται. Σε ένα μονό RDFC μετατροπέα (ή σε παραλληλισμένους μετατροπέες με πολλαπλά choke), η τάση του διακόπτη δεν θα μειωνόταν πιο κάτω από  $V_{IN}$  επειδή μόλις γίνει ίση με αυτή, η δίοδος  $D_1$  μπαίνει σε κατάσταση αγωγής και αρχίζει να άγει το ανακλώμενο ρεύμα μαγνήτισης. Λόγω της ταυτόχρονης αγωγής  $D_3$  και  $D_2$  το δευτερεύον του  $M/\Sigma_2$  βραχυκυκλώνεται και έτσι η τάση του διακόπτη παραμένει σταθερή και ίση με  $V_{IN}$ . Στην περίπτωση που μελετάμε, η δίοδος  $D_3$  δεν άγει επειδή το δυναμικό της καθόδου αυξάνεται σε  $V_{sec1} = \frac{V_{in}}{n}$  λόγω της αγωγής της  $D_1$ . Επομένως, η  $D_3$  είναι πολωμένη ανάστροφα ακόμα όταν  $V_{DS(Q2)} < V_{in}$ . Όπως φαίνεται και από τις κυματομορφές, η τάση του διακόπτη αφού φτάσει την  $V_{in}$  (τη χρονική στιγμή  $t=t_1'$ ) συνεχίζει να μειώνεται περισσότερο μέχρι το τέλος της χρονικής περιόδου A.

## Κεφάλαιο 2 Ανάλυση Του DC-DC Μετατροπέα Forward.

2.3.2.β - Χρονικό διάστημα Β ( $t_1-t_2$ )(Τρανζίστορ  $Q_1$  OFF, Τρανζίστορ  $Q_2$  OFF, Δίοδος  $D_1$  ON, Δίοδος  $D_2$  OFF, Δίοδος  $D_3$  OFF)Εικόνα 2-29 Κυκλωματικό διάγραμμα One Choke κατά το χρονικό διάστημα Β( $t_1-t_2$ ).

Όταν το τρανζίστορ μπει σε κατάσταση αποκοπής, η τάση  $V_{DS(Q1)}$  αρχίζει να ταλαντώνεται επειδή ο πυκνωτής  $C_{Q1}$  είναι φορτισμένος με το ρεύμα μαγνήτισης και το ανακλώμενο ρεύμα του πηνίου φίλτρου  $i_1 = i_{m1} + \frac{i_{Lf}}{n}$ . Και η τάση του  $Q_2$  συνεχίζει να μειώνεται πιο κάτω από την  $V_{in}$  διότι, ο  $M/\Sigma_2$  είναι ακόμα σε κατάσταση επαναφοράς.

2.3.2.γ - Χρονικό διάστημα C ( $t_2-t_3$ )(Τρανζίστορ  $Q_1$  OFF, Τρανζίστορ  $Q_2$  OFF, Δίοδος  $D_1$  ON, Δίοδος  $D_2$  ON, Δίοδος  $D_3$  ON)Εικόνα 2-30 Κυκλωματικό διάγραμμα One Choke κατά το χρονικό διάστημα C( $t_2-t_3$ ).

Όταν  $V_{DS(Q1)} = V_{IN}$  τη χρονική στιγμή  $t_2$ , η δίοδος ελεύθερης διέλευσης  $D_2$  πολώνεται ορθά και αρχίζει να άγει ένα μέρος του ρεύματος του πηνίου φίλτρου εξόδου  $i_{Lf}$ . Επειδή σε αυτή τη χρονική περίοδο, οι δίοδοι  $D_1$  και  $D_2$  άγουν ταυτόχρονα, το δευτερεύον του  $M/\Sigma_1$  είναι βραχυκυκλωμένο. Αποτέλεσμα αυτού είναι να αρχίσει μια ταλάντωση ανάμεσα στον πυκνωτή  $C_{Q1}$  και το πηνίο διαρροής  $L_{lk1}$  η οποία αυξάνει την  $V_{DS(Q1)}$  σε  $V_{IN}$ . Την ίδια στιγμή η αγωγή της  $D_2$  κάνει την  $D_3$  να πολωθεί ορθά, διότι χαμηλώνει το δυναμικό της καθόδου στα 0 volt ενώ, η

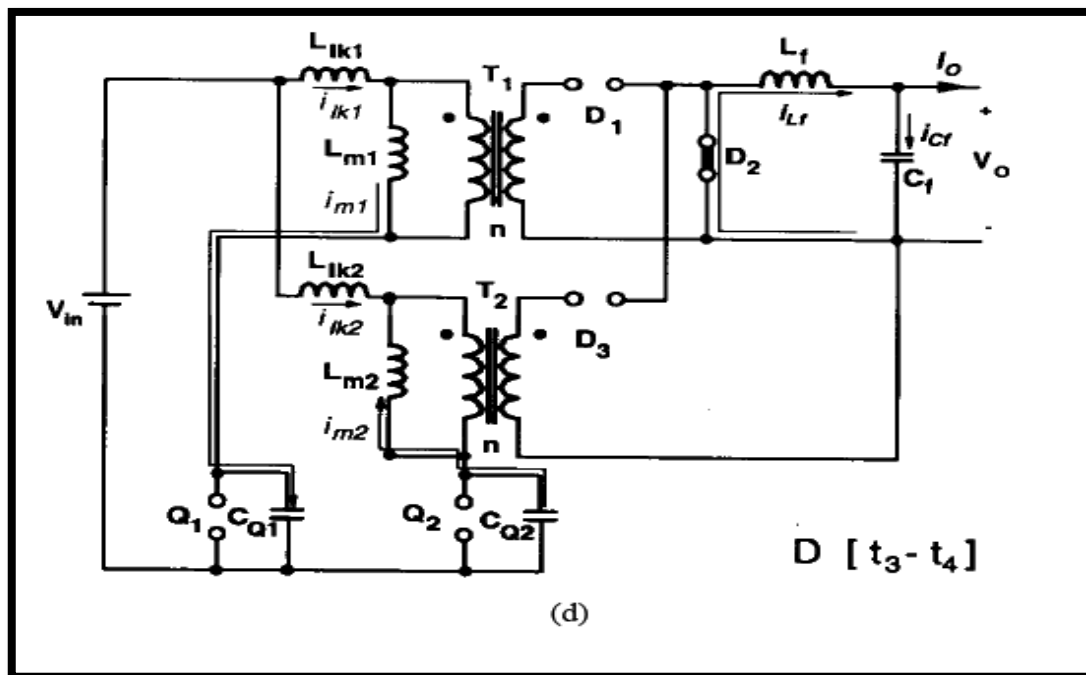
## Κεφάλαιο 2 Ανάλυση Του DC-DC Μετατροπέα Forward.

τάση του δευτερεύοντος είναι θετική  $V_{sec2} = \frac{(V_{IN} - V_{DS(Q2)})}{n}$  γιατί τη χρονική στιγμή  $t_2$   $V_{DS(Q2)} < V_{IN}$ .

Λόγω της αγωγής της  $D_3$  βραχυκυκλώνεται το δευτερεύον του  $M/\Sigma_2$  και η τάση  $V_{DS(Q2)}$  συνεχίζει να αυξάνεται με γρήγορο ρυθμό λόγω του συντονισμού ανάμεσα στον πυκνωτή  $C_{Q2}$  και το πηνίο διαρροής  $I_{lk2}$ . Αυτή η χρονική περίοδος φτάνει στο τέλος, όταν το ρεύμα του πηνίου διαρροής του  $M/\Sigma_1$  και το ρεύμα μαγνήτισης γίνουν ίσα  $i_{lk1} = i_1 = i_{m1}$  οδηγώντας την  $D_1$  σε αποκοπή.

2.3.2.δ - Χρονικό διάστημα D ( $t_3-t_4$ )

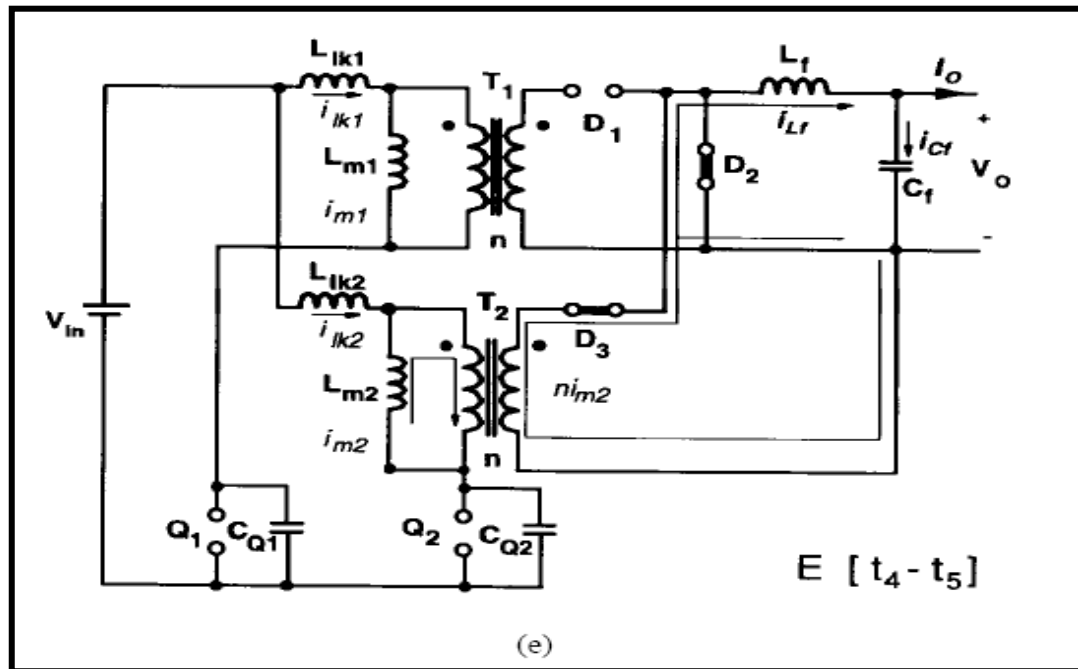
(Τρανζίστορ  $Q_1$  OFF, Τρανζίστορ  $Q_2$  OFF, Δίοδος  $D_1$  OFF, Δίοδος  $D_2$  ON, Δίοδος  $D_3$  OFF)



Εικόνα 2-31 Κυκλωματικό διάγραμμα One Choke κατά το χρονικό διάστημα D( $t_3-t_4$ ).

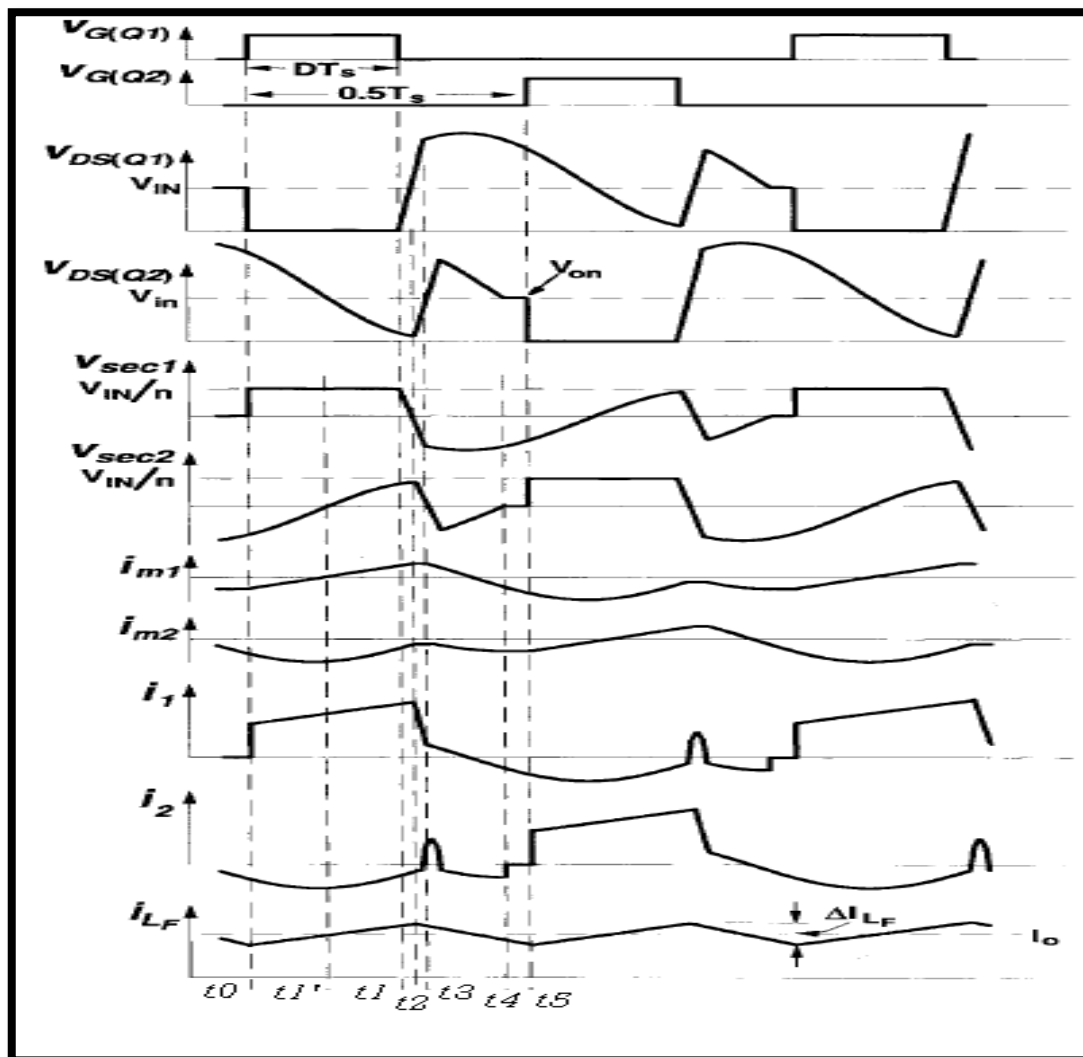
Σε αυτή τη χρονική περίοδο και οι δύο διόδοι  $D_1$  και  $D_3$  είναι σε κατάσταση αποκοπής και το ρεύμα  $i_{Lf}$  άγεται από τη δίοδο ελεύθερης διέλευσης  $D_2$ . Σαν αποτέλεσμα έχουμε την απομαγνήτιση του  $M/\Sigma_1$  μέσω του συντονισμού  $C_{Q1} - I_{lk1}$  ενώ, ο συντονισμός  $C_{Q2} - I_{lk2}$  αποφορτίζει τον πυκνωτή  $C_{Q2}$  με αποτέλεσμα, η  $V_{DS(Q2)}$  να μειωθεί στην τιμή της τάσης εισόδου. Αυτή η χρονική περίοδος τελειώνει όταν η  $V_{DS(Q2)}$  γίνει ίση με  $V_{IN}$  τη χρονική στιγμή  $t=t_4$ . Σημειώνεται ότι, αυτή η κατάσταση μπορεί να τελειώσει πριν η  $V_{DS(Q2)}$  γίνει ίση με  $V_{IN}$  με την ενεργοποίηση του  $Q_2$ . Σε αυτή την περίπτωση έχει ολοκληρωθεί μια ημιπερίοδος λειτουργίας χωρίς την εμφάνιση του χρονικού διαστήματος E.

## Κεφάλαιο 2 Ανάλυση Του DC-DC Μετατροπέα Forward.

2.3.2.ε - Χρονικό διάστημα Ε ( $t_4-t_5$ )(Τρανζίστορ **Q1** OFF, Τρανζίστορ **Q2** OFF, Δίοδος **D1** OFF, Δίοδος **D2** ON, Δίοδος **D3** ON)Εικόνα 2-32 Κυκλωματικό διάγραμμα One Choke κατά το χρονικό διάστημα Ε( $t_4-t_5$ ).

Όταν η  $V_{DS(Q2)}$  γίνει ίση με την τάση εισόδου τη χρονική στιγμή  $t_4$ , η διάοδος **D3** πολώνεται ορθά και το ρεύμα μαγνήτισης  $n * i_{m2}$  αρχίζει να ρέει μέσω αυτής. Λόγω του βραχυκυκλώματος του  $M/\Sigma_2$  το  $i_{m2}$  παραμένει σταθερό σε όλο το χρονικό διάστημα αυτό. Επίσης, σε αυτό το χρονικό διάστημα ο  $M/\Sigma_1$  συνεχίζει την απομαγνήτισή του. Αυτό το χρονικό διάστημα τελειώνει τη χρονική στιγμή  $t_5$  όταν το τρανζίστορ **Q2** μπει σε κατάσταση αγωγής και περνάμε στη δεύτερη ημιπερίοδο λειτουργίας, η οποία είναι όμοια με την προηγούμενη αλλά με μόνη διαφορά ότι, εναλλάσσεται η λειτουργία των τρανζίστορ **Q1-Q2**.

## 2.3.2.στ - Κυματομορφές V/I για την προσέγγιση με ένα choke.



Εικόνα 2-33 Κυματομορφές ρευμάτων – τάσεων One Choke.

## 2.4 - Βιβλιογραφία

- Ηλεκτρονικά Ισχύος, Mohan/Underland/Robbins, Β έκδοση, εκδοτικός οίκος ΤΖΙΟΛΑ
- Σημειώσεις εργαστηρίου Ηλεκτρονικών Ισχύος, Ν.Π. Πολύζος.
- Designing Single-Switch Resonant-Reset Forward Converters, MAXIM Application Note 3983.
- Designing Single-Switch Forward Converters, Suresh Hariharan/David Schie.
- Analysis and Evaluation of Interleaving Techniques in Forward Converters, Michael T. Zhang/ Milan M. Jovanovic/ Fred C. Y. Lee, IEEE Transactions on power electronics Vol. 13, No. 4.

# Κεφάλαιο 3

## Μετασχηματιστές

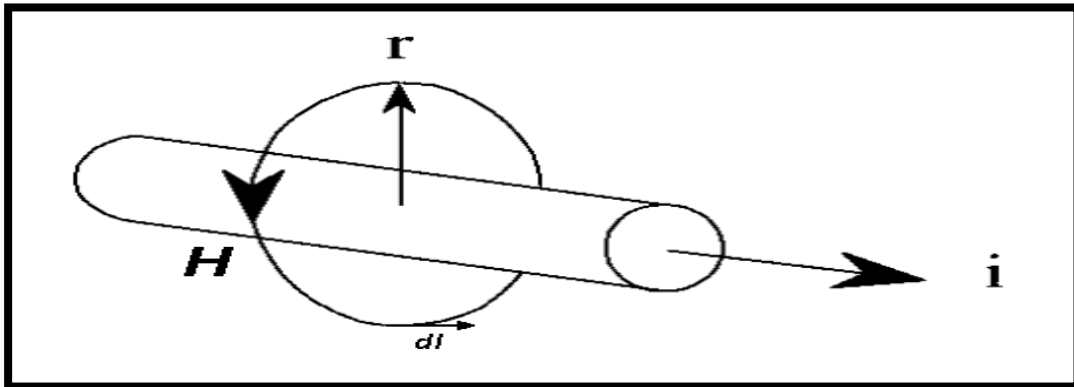
### Εισαγωγή

Οι μετασχηματιστές είναι ηλεκτρικές διατάξεις, οι οποίες μετατρέπουν εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια (με τον όρο εναλλασσόμενη δεν εννοούνται μόνο μεγέθη με μηδενική απόλυτη τιμή, άλλα γενικότερα χρονικά μεταβαλλόμενα μεγέθη) από ένα επίπεδο τάσης σε ένα μεγαλύτερο ή μικρότερο. Αποτελείται από δύο πηνία συζευγμένα από ένα κοινό μαγνητικό υλικό, γύρω από το οποίο είναι τυλιγμένα. Οι μετασχηματιστές αποτελούν ένα πολύ σημαντικό κομμάτι στον τομέα της μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας και όχι μόνο. Χρειάζονται διαφόρων ειδών μετασχηματιστές, όπως ανύψωσης, υποβιβασμού, ισχύος, υψηλών συχνοτήτων και άλλα είδη. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα αναλυθούν τα βασικά μεγέθη, οι νόμοι και οι μονάδες των μαγνητικών κυκλωμάτων.

### 3.1 - Βασική Νόμοι Μαγνητισμού

#### 3.1.1 - Ο Νόμος Του Ampere

Κάθε ρευματοφόρος αγωγός δημιουργεί γύρω του ένα μαγνητικό πεδίο έντασης  $\mathbf{H}$  της οποίας, η μονάδα στο  $SI$  είναι τα *Αμπερελίγματα ανά μέτρο* [ $At/m$ ]. Σύμφωνα με το νόμο του *Ampere* (Εικόνα 3-1) *το ολοκλήρωμα της έντασης του μαγνητικού πεδίου σε μια κλειστή διαδρομή ισούται με το συνολικό (περικλειόμενο από το μαγνητικό πεδίο του αγωγού) ρεύμα.*



Εικόνα 3-2 Αναπαράσταση του νόμου του Ampere.

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \mu_0 \mathbf{i}, \quad \text{Νόμος Ampere}$$

Σε περίπτωση που τα ρεύματα φέρονται από αγωγούς σε τύλιγμα με  $N$  σπείρες και ο πυρήνας είναι κατασκευασμένος από κάποιο σιδηρομαγνητικό υλικό (ή κάποιου άλλου είδους υλικό υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας), τότε το μαγνητικό πεδίο περιορίζεται μέσα στον πυρήνα και η διαδρομή ολοκλήρωσης, είναι το μέσο μήκος του πυρήνα  $l_c$  (Εικόνα 3-2) έτσι με κατάλληλη επίλυση του νόμου του *Ampere* έχουμε:

$$\mathbf{H}l_c = N\mathbf{i}$$



Όπου

$\mathbf{H}$  το διάνυσμα της έντασης του μαγνητικού πεδίου [ $\text{At/m}$ ]

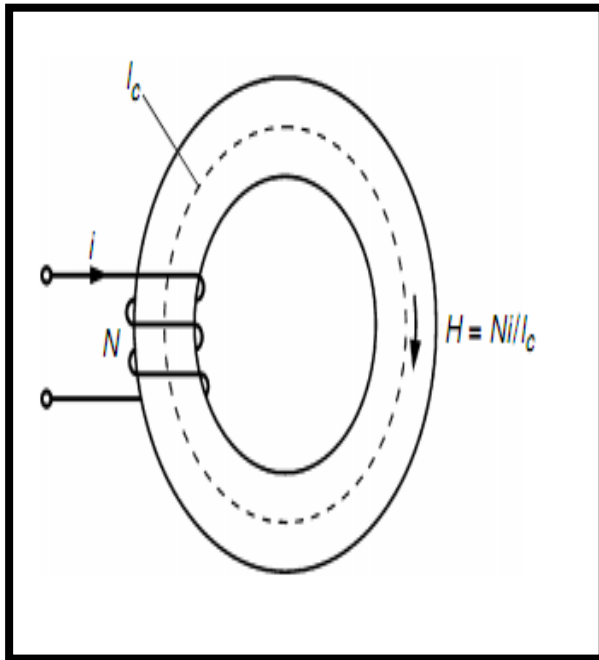
$d\mathbf{l}$  το διάνυσμα μήκους της κλειστής διαδρομής με φορά τη διεύθυνση του  $\mathbf{H}$  [ $\text{m}$ ]

$l$  το μήκος της περιφέρειας της κλειστής διαδρομής [ $\text{m}$ ]

$i$  το ρεύμα που ρέει στον αγωγό [ $\text{A}$ ]

$N$  ο αριθμός περιελίξεων [**Καθαρός αριθμός**]

$l_c$  το μέσο μήκος της μαγνητικής διαδρομής [ $\text{m}$ ]



Εικόνα 3-3 Δακτυλιοειδής πυρήνας.

Όπως αναφέρεται παραπάνω, όταν ο αγωγός είναι τυλιγμένος γύρω από έναν πυρήνα κατασκευασμένο από κάποιο μαγνητικό υλικό, το πεδίο περιορίζεται στον πυρήνα ανάλογα με την τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας (η μαγνητική διαπερατότητα εκφράζει τη δυνατότητα κάθε υλικού να υποστηρίξει μέσα του ένα μαγνητικό πεδίο και εξηγείται αναλυτικότερα παρακάτω) του υλικού τότε το πεδίο ονομάζεται πεδίο  $\mathbf{B}$  και είναι το ίδιο πεδίο εντός του υλικού, με μόνη διαφορά την ένταση του πεδίου η οποία υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_{\sigma\chi} \mathbf{H} = \mu \mathbf{H}$$

Όπου

$\mu = \mu_0 \mu_{\sigma\chi}$  είναι η ειδική μαγνητική διαπερατότητα του κάθε μαγνητικού υλικού

$\mu_0$  είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού  $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \text{ H/m}$

$\mu_{\sigma\chi}$  είναι η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του μαγνητικού υλικού

Το πεδίο  $\mathbf{B}$  αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία ως, πυκνότητα μαγνητικής ροής (*magnetic flux density*) ή μαγνητική επαγωγή (*magnetic induction*). Ο τελευταίος όρος θα χρησιμοποιηθεί σε όλη την πτυχιακή εργασία, ώστε να αποφευχθεί η οποιαδήποτε σύγχυση.

Κάθε μαγνητικό πεδίο δημιουργεί μια μαγνητική ροή (όπως κάθε ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί μια ροή φορτίων), η οποία υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$$

Όπου  $\Phi$  η μαγνητική ροή και  $d\mathbf{S}$  η στοιχειώδη μονάδα επιφάνειας της διατομής του πυρήνα.

Σε περίπτωση που το άνησμα  $\mathbf{B}$  είναι ομοιόμορφο και διέρχεται κάθετα σε όλη την επιφάνεια  $\mathbf{S}$  η παραπάνω εξίσωση παίρνει τη μορφή:

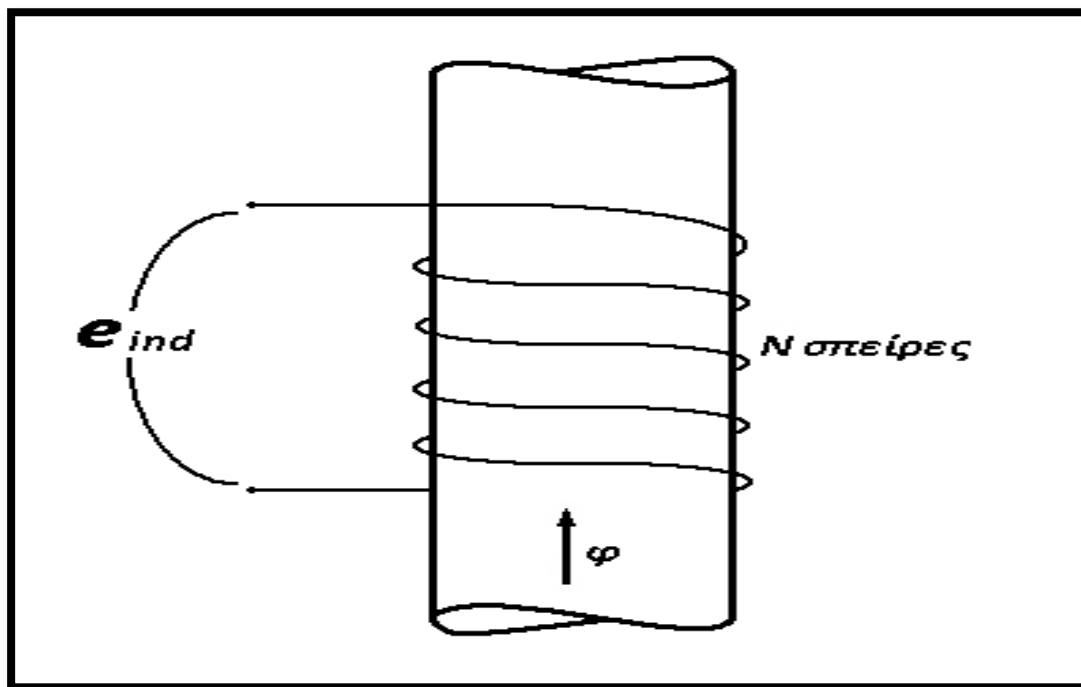
$$\varphi = BS$$

### 3.1.2 - Νόμος Faraday Και Νόμος Lenz

Ο νόμος του *Faraday* εξηγεί ότι, όταν μια μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή περνά μέσα από μια σπείρα (ή  $N$  σπείρες) ενός τυλίγματος επάγει μια τάση στα άκρα του, η τιμή της οποίας υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

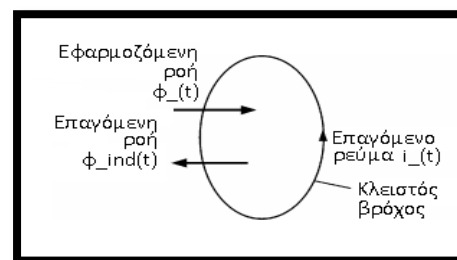
$$e_{ind(t)} = -N * \frac{d\varphi(t)}{dt}, \quad \text{Νομος Faraday}$$

Όπου  $e_{ind(t)}$  η επαγόμενη τάση στα άκρα του τυλίγματος και  $N$  ο αριθμός των σπειρών του.



Εικόνα 3-4 Αναπαράσταση του νόμου του Faraday

Το αρνητικό πρόσημο στην εξίσωση οφείλεται στο νόμο του *Lenz*, ο οποίος αναφέρει ότι κάθε χρονικά μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή που διέρχεται από μια σπείρα (ή περισσότερες) τείνει να δημιουργήσει ένα ρεύμα τέτοιας φοράς, ώστε η χρονικά μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή που αυτό θα δημιουργήσει να αντιτίθεται στην αρχική ροή.



Εικόνα 3-5 Αναπαράσταση του νόμου του Lenz.

### 3.1.3 - Νόμος του Gauss

Ο νόμος του Gauss για τα μαγνητικά κυκλώματα αναφέρει ότι, για οποιαδήποτε κλειστή επιφάνεια  $S$  με αυθαίρετη μορφή η συνολική ροή εισόδου του όγκου που ορίζεται από την  $S$  είναι ακριβώς ίση, με τη συνολική ροή που βγαίνει από τον όγκο. Αυτό σημαίνει ότι η συνολική ροή διαμέσου της επιφάνειας  $S$  είναι μηδέν.

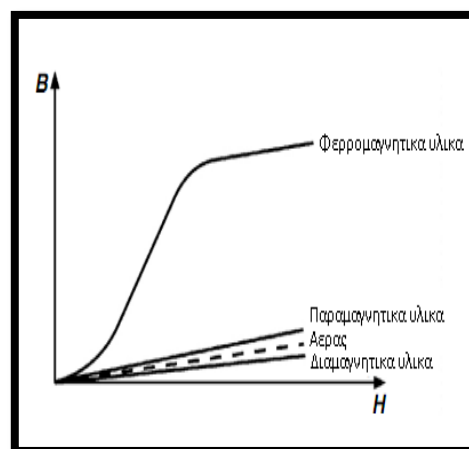
$$\int_S \mathbf{B} \, d\mathbf{S} = 0$$

## 3.2 - Μαγνητικά Υλικά

Τα μαγνητικά υλικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις ομάδες ανάλογα με τις μαγνητικές ιδιότητές τους. Οι τρεις αυτές κατηγορίες είναι:

- Διαμαγνητικά υλικά
- Παραμαγνητικά υλικά
- Φερρομαγνητικά υλικά

Τα διαμαγνητικά υλικά αποτελούνται από άτομα, τα οποία δεν έχουν μόνιμες μαγνητικές στροφορμές. Αντίθετα, τα άτομα των παραμαγνητικών και φερρομαγνητικών υλικών αποτελούνται από άτομα τα οποία έχουν μόνιμες μαγνητικές στροφορμές. Η μαγνητική διαπερατότητα κυμαίνεται κοντά στη μονάδα για τα παραμαγνητικά και διαμαγνητικά υλικά ενώ, είναι εκατοντάδες έως και αρκετές χιλιάδες φορές μεγαλύτερη για τα φερρομαγνητικά υλικά.

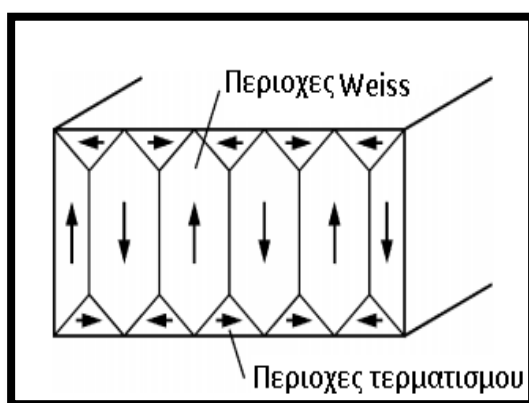


Εικόνα 3-5 Καμπύλες μαγνήτισης μαγνητικών υλικών.

$\mu_{σχ} < \mu_0$  διαμαγνητικά υλικά,

$\mu_{σχ} > \mu_0$  παραμαγνητικά υλικά

### 3.2.1 - Φερρομαγνητικά Υλικά



Εικόνα 3-6 φερρομαγνητικές περιοχές.

Για τη σωστή κατανόηση των φερρομαγνητικών υλικών θα δοθεί μια υποτυπώδη εξήγηση της μαγνητικής συμπεριφοράς και της δομής των μετάλλων. Κάθε ηλεκτρόνιο έχει ένα ηλεκτρικό φορτίο και την προσωπική του μαγνητική στροφορμή (*spin*). Πέρα από το *spin*, κάθε ηλεκτρόνιο έχει μια ακόμα μαγνητική στροφορμή που ονομάζεται τροχιακή στροφορμή και η οποία προκαλείται από την περιστροφή

του γύρω από τον πυρήνα του ατόμου. Στα περισσότερα άτομα τα ηλεκτρόνια είναι

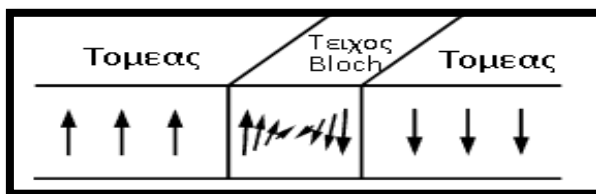
### Κεφάλαιο 3 Μετασχηματιστές

κατανεμημένα με τέτοιο τρόπο ώστε, η ολική μαγνητική στροφορμή του ατόμου να είναι μηδέν. Ωστόσο, περισσότερο από το ένα τρίτο των ατόμων του περιοδικού πίνακα παρουσιάζει μη μηδενική μαγνητική στροφορμή.

Στα μέταλλα υπάρχει μια αλληλεπίδραση μεταξύ των ατόμων, η οποία ορίζει τις μαγνητικές ιδιότητες όλου του υλικού. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι μαγνητικές στροφορμές των ατόμων στο κρυσταλλικό πλέγμα είναι διασυνδεδεμένες από δυνάμεις σύζευξης. Αν αυτές οι μαγνητικές στροφορμές, είναι παράλληλες στο κρυσταλλικό πλέγμα τότε αθροίζονται και έτσι έχουμε ως αποτέλεσμα το φερρομαγνητικό φαινόμενο. Οι δυνάμεις σύζευξης στα φερρομαγνητικά υλικά τεχνικού ενδιαφέροντος είναι αρκετά δυνατές, ακόμα και σε θερμοκρασία δωματίου οι περισσότεροι ατομικοί μαγνήτες είναι παραλληλισμένοι. Ο παραλληλισμός αυτός δεν συμβαίνει σε όλη τη δομή του υλικού, αλλά μόνο σε συγκεκριμένες περιοχές (τομείς) οι οποίες ονομάζονται “φερρομαγνητικές περιοχές” ή “τομείς Weiss”. Το μέγεθος των περιοχών κυμαίνεται από  $0,001\text{mm}^3$  μέχρι  $1\text{mm}^3$ .

Κάθε τομέας περιέχει αρκετά άτομα και χαρακτηρίζεται από τη συνολική μαγνητική στροφορμή του, ως αποτέλεσμα της άθροισης των επιμέρους ατομικών μαγνητών. Η διεύθυνση των περιοχών σε ένα μη μαγνητισμένο κρύσταλλο είναι απολύτως τυχαίες προς όλες τις πιθανές κατευθύνσεις, με σκοπό να ελαχιστοποιείται το ολικό εξωτερικό πεδίο και έτσι να διατηρείται η ενέργεια σε όσο το δυνατόν χαμηλότερα επίπεδα. Το ολικό εξωτερικό πεδίο ελαχιστοποιείται επίσης από την παρουσία των “περιοχών τερματισμού”.

Σε κάθε κρύσταλλο οι περιοχές διαχωρίζονται από όρια τα οποία ονομάζονται “Τείχη περιοχών” ή “τείχη Bloch” πέρα από τα οποία οι μαγνητικές στροφορμές των περιοχών αλλάζουν διεύθυνση.



Εικόνα 3-7 Τείχη Bloch.

Ο παραπάνω μηχανισμός άθροισης των ατομικών μαγνητικών στροφορμών που έχει ως αποτέλεσμα, την αυθόρμητη μαγνήτιση των περιοχών στα φερρομαγνητικά υλικά λειτουργεί μέχρι μια θερμοκρασία ξεχωριστή (και ξεκάθαρα ορισμένη) για κάθε υλικό, η οποία ονομάζεται “θερμοκρασία Curie”  $T_c$ . Όταν η θερμοκρασία του υλικού, ξεπεράσει την θερμοκρασία Curie τότε οι θερμικές ταλαντώσεις των ατομικών μαγνητών αυξάνονται σημαντικά έως ότου ξεπεράσουν τις συζευγμένες δυνάμεις που κρατούν ευθυγραμμισμένους τους ατομικούς μαγνήτες των περιοχών. Όταν το υλικό ψηχθεί, οι μαγνητικές περιοχές επανέρχονται αλλά οι μαγνητικές στροφορμές θα είναι προσανατολισμένες τυχαία, με αποτέλεσμα το εξωτερικό πεδίο στο υλικό να είναι μηδέν. Αυτό σημαίνει ότι, όταν θερμανθεί ένα φερρομαγνητικό υλικό σε θερμοκρασία μεγαλύτερη της θερμοκρασίας Curie απομαγνητίζεται τελείως.

#### 3.2.2 - Παραμαγνητικά Υλικά

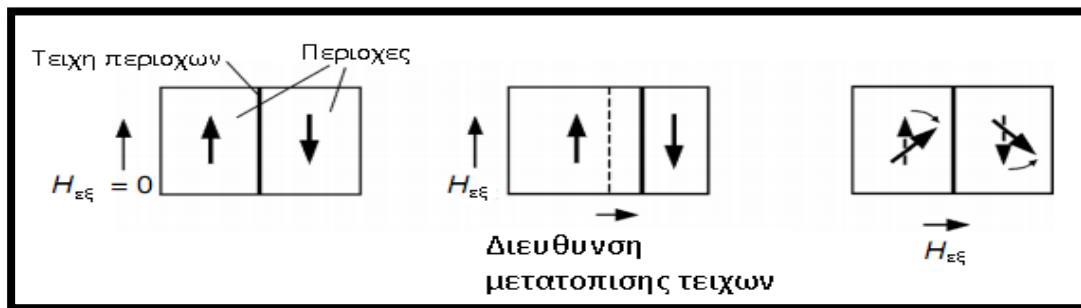
Τα παραμαγνητικά υλικά έχουν σχετική μαγνητική διαπερατότητα, λίγο μεγαλύτερη ή ίση με τη μονάδα λόγω της παρουσίας ατόμων με μόνιμες μαγνητικές στροφορμές. Αυτά τα άτομα αλληλεπιδρούν πολύ αδύναμα μεταξύ τους και έχουν απολύτως τυχαίες διευθύνσεις απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Όταν ένα παραμαγνητικό υλικό τοποθετηθεί σε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, αυτές οι μαγνητικές στροφορμές παραλληλίζονται με το πεδίο. Αυτός όμως ο παραλληλισμός

### Κεφάλαιο 3 Μετασχηματιστές

πρέπει να ανταγωνιστεί τη θερμική κίνηση των ηλεκτρονίων, η οποία τείνει να κάνει τυχαία τη διεύθυνση των μαγνητικών στροφορμών.

#### 3.2.3 - Διαμαγνητικά Υλικά

Όταν ένα διαμαγνητικό υλικό τοποθετηθεί σε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, επάγεται σε αυτό μια μικρή μαγνητική στροφορμή με διεύθυνση αντιπαράλληλη του εξωτερικού πεδίου. Αυτό κάνει τα μαγνητικά υλικά να απωθούνται από τους μαγνήτες. Πιο συγκεκριμένα, ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο αλλάζει την τροχιακή ταχύτητα των ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα και έτσι αλλάζει τη μαγνητική στροφορμή των μαγνητικών δίπολων. Σύμφωνα με το νόμο του Lenz, αυτά τα ηλεκτρόνια αντιτίθενται στις αλλαγές μαγνητικού πεδίου από το εξωτερικό πεδίο. Παρόλο που ο διαμαγνητισμός είναι παρών σε όλα τα υλικά, η επίδρασή του είναι τόσο μικρή σε σχέση με τον φερρομαγνητισμό και τον παραμαγνητισμό που παρατηρείται, μόνο απουσία αυτών των δύο φαινομένων.



Εικόνα 3-8 Διαδικασία μαγνήτισης με μετατόπιση τειχών και περιστροφή της διεύθυνσης των τομέων Weiss

#### 3.2.4 - Διαδικασία Μαγνήτισης

Για να εξηγηθεί η διαδικασία μαγνήτισης ενός υλικού θα θεωρηθεί ένα μη μαγνητισμένο φερρομαγνητικό υλικό. Έστω, ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο  $H_{εξ}$  με διεύθυνση παράλληλη στις περιοχές των μαγνητικών στροφορμών. Καθώς αυξάνεται η ένταση του  $H_{εξ}$  τα τείχη των περιοχών αρχίζουν να μετακινούνται (μετατόπιση τειχών) στην αρχή αργά, έπειτα πιο γρήγορα και στο τέλος με άλματα. Παρουσία του  $H_{εξ}$  οι μαγνητικές στροφορμές υπόκεινται σε ροπή, η οποία τείνει να τις ευθυγραμμίσει με τη διεύθυνση του  $H_{εξ}$ . Σαν αποτέλεσμα αυτού τα τείχη των περιοχών μετακινούνται και οι περιοχές που είναι ευθυγραμμισμένες με το  $H_{εξ}$  αυξάνονται από την κίνηση των τειχών μέσα στις περιοχές, με διεύθυνση αντίθετη του  $H_{εξ}$ . Επομένως, η μαγνήτιση (που ουσιαστικά είναι η μέση τιμή των ατομικών μαγνητών ανά μονάδα όγκου του υλικού) αυξάνεται.

Όταν το εξωτερικό πεδίο είναι μικρής έντασης, η μετατόπιση των τειχών των περιοχών είναι αντιστρεπτή. Όταν όμως, το  $H_{εξ}$  είναι μεγαλύτερης έντασης, υπάρχει μη ελαστική μετατόπιση των τειχών, η οποία προκαλεί υστέρηση (αναλύεται παρακάτω) στη γραφική  $H - B$  του υλικού. Πάνω από ένα συγκεκριμένο όριο του  $H_{εξ}$  τα τείχη των περιοχών πραγματοποιούν “άλματα Barkhausen”. Με αυτά τα άλματα μια περιοχή που έχει την ίδια διεύθυνση με το εφαρμοζόμενο πεδίο, απορροφά μια παρακείμενη περιοχή με διεύθυνση αντίθετη του  $H_{εξ}$ .

Όταν η ένταση του εξωτερικού πεδίου αυξηθεί περαιτέρω, συμβαίνει η διαδικασία της “περιστροφής περιοχών”. Οι περιοχές μαγνητικών στροφορμών

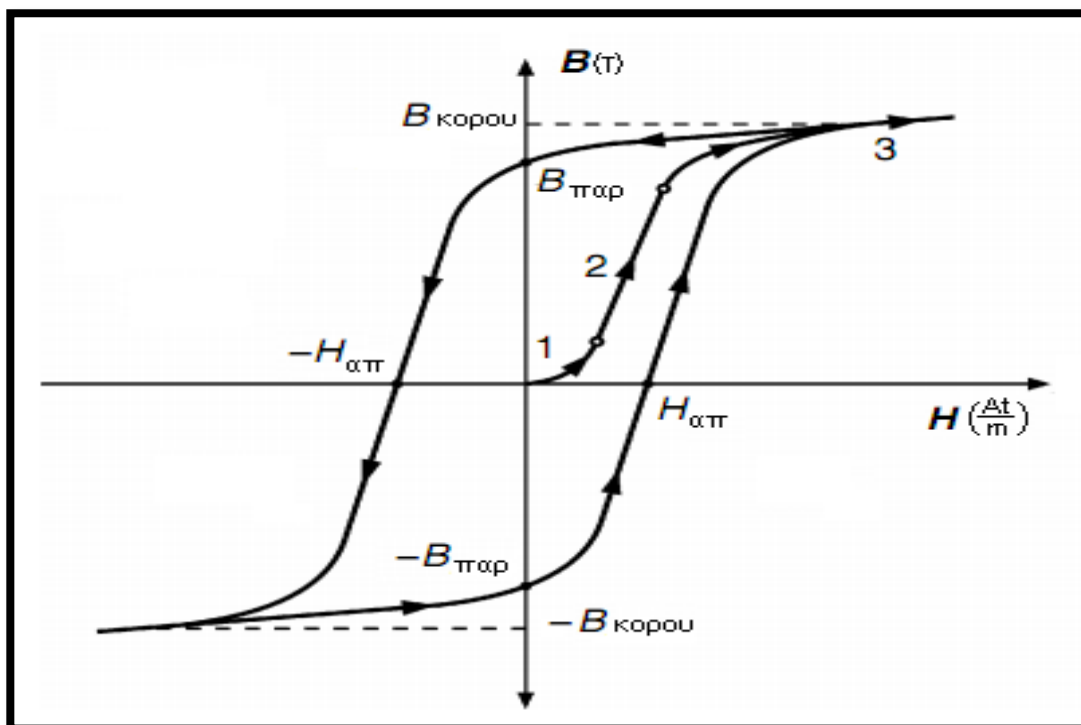
### Κεφάλαιο 3 Μετασχηματιστές

περιστρέφονται με σκοπό να αποκτήσουν τη διεύθυνση του  $\mathbf{H}_{εξ}$  και έτσι να αυξήσουν την ολική μαγνήτιση.

Η διαδικασία μαγνήτισης περιλαμβάνει τη μετατόπιση τειχών, τα *άλματα Barkhausen* και την περιστροφή περιοχών. Στην περίπτωση των φερρομαγνητικών μετάλλων, στην αρχή η διαδικασία πραγματοποιείται κυρίως από τη μετατόπιση τειχών και τα *άλματα Barkhausen*, ενώ η περιστροφή περιοχών συμβαίνει στο τέλος της διαδικασίας, για να γίνει η τελική ευθυγράμμιση στην επιθυμητή διεύθυνση, όπως ορίζεται από το  $\mathbf{H}_{εξ}$ .

#### 3.2.5 - Υστέρηση

Ας θεωρηθεί ένας κυκλικός μαγνητικός πυρήνας (Εικόνα 3-2) με τυλίγματα, έτσι ώστε να μπορέσει να αναλυθεί η καμπύλη μαγνήτισής του. Στην αρχή ενώ το ρεύμα είναι μηδέν δεν υπάρχει μαγνητικό πεδίο, άρα ούτε πυκνότητα μαγνητικής ροής. Ξεκινώντας την αύξηση του ρεύματος στα τυλίγματα, θα αρχίσει σιγά-σιγά να δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο  $\mathbf{H}$  σύμφωνα με το νόμο του *Ampere*. Η μικρή αυτή αρχική αύξηση “1” αντιστοιχεί σε μία αντιστρεπτή μετακίνηση των τειχών των μαγνητικών τομέων του πυρήνα. Συνεχίζοντας την αύξηση “2” του ρεύματος οδηγούμαστε, σε μεγαλύτερης έντασης μαγνητικό πεδίο και επομένως σε μεγαλύτερη πυκνότητα μαγνητικής ροής  $\mathbf{B}$  (σημειώνεται ότι, στο δεύτερο σκέλος της καμπύλης, η αύξηση της μαγνητικής επαγωγής γίνεται με σημαντικά μεγαλύτερο ρυθμό με την αύξηση της έντασης του πεδίου  $\mathbf{H}$  και εξηγείται με τα προαναφερθέντα *άλματα Barkhausen* των τειχών των μαγνητικών τομέων). Περαιτέρω αύξηση της έντασης του πεδίου “3” οδηγεί, σε σχεδόν ασήμαντη αύξηση του  $\mathbf{B}$  και έτσι το τρίτο τμήμα της καμπύλης μαγνήτισης είναι σχεδόν επίπεδο (η αύξηση της μαγνητικής ροής δεν είναι πλέον δυνατή με τον τρόπο της μετακίνησης των τειχών των τομέων και η οποιαδήποτε αύξηση του  $\mathbf{B}$  γίνεται πλέον, με την μέθοδο της περιστροφής περιοχών).



Εικόνα 3-9 Καμπύλη υστέρησης.

### Κεφάλαιο 3 Μετασχηματιστές

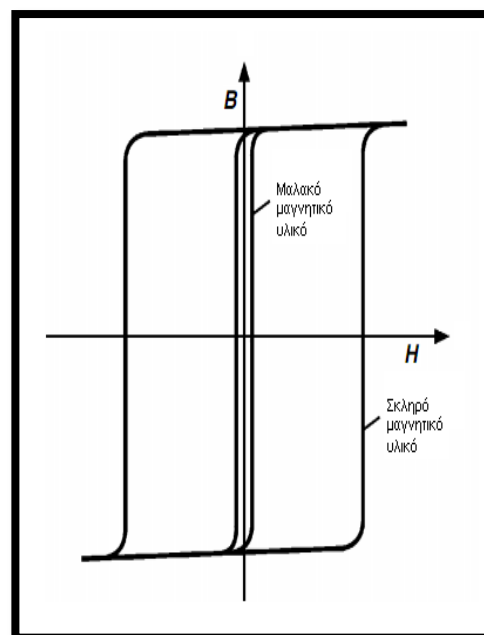
Το υλικό σε αυτή την περιοχή, λέμε ότι έχει φτάσει στον κόρο (η μέγιστη δυνατή τιμή του  $\mathbf{B}$  “τιμή επαγωγής κόρου”  $\mathbf{B}_{\text{κορου}}$  έχει επιτευχθεί) καθώς όλες οι μαγνητικές περιοχές έχουν ευθυγραμμιστεί με τη διεύθυνση του πεδίου  $\mathbf{H}$ .

Με τη μείωση του  $\mathbf{H}$  σε μικρότερες τιμές (πράγμα που σημαίνει τη μείωση του ρεύματος που διαρρέει το τύλιγμα) παρατηρούμε αρχικά, την περιστροφή των περιοχών στις προτιμώμενες διευθύνσεις τους, έπειτα, τη μετακίνηση των τειχών μερικών περιοχών πίσω στις αρχικές τους θέσεις, αλλά σημαντικότερα παρατηρούμε ότι οι περισσότερες περιοχές παραμένουν στις θέσεις που έλαβαν, κατά τη διαδικασία της μετακίνησης τειχών. Ως εκ τούτου, η μαγνητική επαγωγή δεν “επιστρέφει” πάνω στην καμπύλη που ακολουθούσε, αλλά υστερεί σε σχέση με την αρχική διαδρομή μαγνήτισης. Όταν το  $\mathbf{H}$  γίνει μηδέν, παραμένει μια μικρή μαγνητική επαγωγή λόγω της μη ελαστικής μετατόπισης τειχών των τομέων, η οποία ονομάζεται “παραμένοντας μαγνητισμός”  $\mathbf{B}_{\text{παρ}}$ . Για τη μείωση του παραμένοντα μαγνητισμού πρέπει να εφαρμοστεί ένα αντίστροφο πεδίο  $\mathbf{H}$  έντασης, τέτοιας ώστε να εξαναγκάσει τα τείχη των τομέων στις αρχικές τους θέσεις. Η τιμή της έντασης του  $\mathbf{H}$  που χρειάζεται ώστε, να μηδενιστεί η μαγνητική επαγωγή ονομάζεται “απομαγνητίζουσα δύναμη”  $H_{\text{απ}}$ . Μια αύξηση του  $H$  κατά την αντίθετη διεύθυνση, μας οδηγεί σε μια εκ νέου διαδικασία μαγνήτισης αντίθετης πλέον φοράς με μια αρνητική τιμή επαγωγής κόρου  $-\mathbf{B}_{\text{κορου}}$  ( $|\mathbf{B}_{\text{κορου}}| = \mathbf{B}_{\text{κορου}}$ ). Εάν το ρεύμα διέγερσης εναλλάσσεται συνεχώς κυκλικά ανάμεσα στις δύο ακραίες τιμές του, οι οποίες αντιστοιχούν στα δύο αντίθετα μέγιστα της έντασης του πεδίου  $\mathbf{H}$  δημιουργείται ο βρόχος υστέρησης (Εικόνα 3-9).

Ο βρόχος υστέρησης δίνει τη σχέση μεταξύ της μαγνητικής επαγωγής  $\mathbf{B}$  και της έντασης του πεδίου  $\mathbf{H}$  για μια κλειστή αντιστρεπτή κυκλική μαγνήτιση του φερρομαγνητικού υλικού. Η μορφή του βρόχου υστέρησης είναι κυρίως εξαρτώμενη από το υλικό, αλλά επίσης (σε μικρότερο βαθμό) από τη συχνότητα του ρεύματος διέγερσης. Το εμβαδό του βρόχου είναι η απώλεια ενέργειας ανά μονάδα όγκου για κάθε περίοδο.

Σύμφωνα με την τιμή της απομαγνητίζουσας δύναμης  $H_{\text{απ}}$  τα μαγνητικά υλικά διαχωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες.

- Μαλακά μαγνητικά υλικά (μικρή τιμή απομαγνητίζουσας δύναμης) : Τα μαλακά μαγνητικά υλικά χαρακτηρίζονται από την ευκολία αλλαγής του προσανατολισμού των περιοχών μαγνητικής στροφορμής στην κρυσταλλική δομή του μετάλλου. Τα μαλακά μαγνητικά υλικά είναι εξέχουσας σημασίας για τη σύγχρονη βιομηχανία ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών ειδών και απαραίτητα για πολλές συσκευές και εφαρμογές όπως τα



Εικόνα 3-10 Καμπύλες μαγνήτισης μαλακών και σκληρών μαγνητικών υλικών.

ηλεκτρονικά ισχύος, όπου τα περισσότερα μαγνητικά στοιχεία κατασκευάζονται με μαλακούς μαγνητικούς πυρήνες.

- Σκληρά μαγνητικά υλικά (μεγάλη τιμή απομαγνητίζουσας δύναμης) : Στα σκληρά μαγνητικά υλικά (αποκαλούνται επίσης και μόνιμοι μαγνήτες), η αρχική διεύθυνση των μαγνητικών στροφορμών αντιστέκεται στην επιρροή του εξωτερικού πεδίου και η απομαγνητίζουσα δύναμη είναι κατά πολύ ισχυρότερη, σε σύγκριση με τα μαλακά μαγνητικά υλικά. Μία άλλη σημαντική ιδιότητα των μόνιμων μαγνητών είναι, η μεγάλη τιμή παραμένοντος μαγνητισμού  $\mathbf{B}_{\text{παρ}}$ . Οι μόνιμοι μαγνήτες δημιουργούν μαγνητική ροή ακόμα και χωρίς κάποιο εφαρμοζόμενο εξωτερικό πεδίο και χρησιμοποιούνται κυρίως, στους ηλεκτρικούς κινητήρες, στις γεννήτριες, σε αισθητήρες και άλλα.

### 3.2.6 - Μαγνητική Διαπερατότητα $\mu$

Η μαγνητική διαπερατότητα που αναφέρθηκε προηγουμένως είναι μια ιδιότητα των μαγνητικών υλικών, η οποία έχει διαφορετικές ερμηνείες ανάλογα με τις συγκεκριμένες συνθήκες του ορισμού και της μέτρησής της. Ο δείκτης  $\sigma\chi$  που χρησιμοποιήθηκε προηγουμένως παραλείπεται και αναφέρονται μόνο οι δείκτες, των διαφορετικών μορφών της διαπερατότητας.

- Μαγνητική διαπερατότητα πλάτους  $\mu_{\text{πλ}}$  : Είναι η σχετική διαπερατότητα παρουσία εξωτερικών εναλλασσόμενων μαγνητικών πεδίων η οποία δίνει τη σχέση μεταξύ της κορυφαίας τιμής της μαγνητικής επαγωγής  $\mathbf{B}$  και του μαγνητικού πεδίου  $\mathbf{H}$  και ορίζεται από τη σχέση

$$\mu_{\text{πλ}} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\hat{\mathbf{B}}}{\hat{\mathbf{H}}}$$

Όπου  $\hat{\mathbf{B}}$  είναι το πλάτος της μαγνητικής επαγωγής που διέρχεται κατά μέσο όρο από την κάθετη διατομή του πυρήνα και  $\hat{\mathbf{H}}$  είναι το πλάτος του πεδίου που είναι παράλληλο στην επιφάνεια του πυρήνα.

- Αρχική μαγνητική διαπερατότητα  $\mu_{\text{αρχ}}$  : Είναι η σχετική διαπερατότητα για πολύ χαμηλά εφαρμοζόμενα στατικά μαγνητικά πεδία.

$$\mu_{\text{αρχ}} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta \mathbf{B}}{\Delta \mathbf{H}} (\Delta \mathbf{H} \rightarrow 0)$$

- Ενεργή μαγνητική διαπερατότητα  $\mu_{\text{εν}}$  : Σε περίπτωση που υπάρχει διάκενο στο μαγνητικό κύκλωμα, η εμφανής διαπερατότητα του κυκλώματος ονομάζεται, ενεργή μαγνητική διαπερατότητα και είναι πολύ χαμηλότερης τιμής από τη διαπερατότητα του ίδιου πυρήνα χωρίς διάκενο. Εξαρτάται από την αρχική διαπερατότητα του υλικού, από τις διαστάσεις του πυρήνα και όπως αναφέρθηκε, από το διάκενο. Για πυρήνες με σχετικά μικρό διάκενο η ενεργή διαπερατότητα δίνεται από την

$$\mu_{\text{εν}} = \frac{\mu_{\text{αρχ}}}{1 + \frac{\mathbf{A}_{\text{διακενου}}}{\mathbf{I}_{\text{πυρήνα}}}}$$

Όπου  $\mathbf{A}_{\text{διάκ}}$  είναι η κάθετη διατομή του διακένου  $\mathbf{I}_{\text{πυρ}}$  το ενεργό μήκος της μαγνητικής διαδρομής στον πυρήνα.



Σε περίπτωση που το διάκενο είναι μακρύ κάποιο μέρος από τις ροές διαρρέει προς το εξωτερικό περιβάλλον, πράγμα το οποίο έχει ως αποτέλεσμα αυξημένη τιμή της ενεργού διαπερατότητας, σε σχέση με την παραπάνω εξίσωση (η οποία επομένως είναι ορθή μόνο εάν αμελήσουμε τη μαγνητική ροή διαρροής). Η ενεργός διαπερατότητα λέγεται επίσης *διαπερατότητα ισοδύναμου ομογενούς σπειροειδούς πυρήνα*.

- Αυξητική μαγνητική διαπερατότητα  $\mu_{\Delta}$  : Η αυξητική διαπερατότητα ορίζεται όταν ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο  $\mathbf{H}_{AC}$  υπερτίθεται σε ένα στατικό μαγνητικό πεδίο  $\mathbf{H}_{DC}$ . Υπολογίζεται από την

$$\mu_{\Delta} = \left( \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta \mathbf{B}}{\Delta \mathbf{H}} \right)_{H_{DC}}$$

- Αντιστρεπτή μαγνητική διαπερατότητα  $\mu_{αντ}$  : Η οριακή τιμή της αυξητικής διαπερατότητας  $\mu_{\Delta}$  όταν το πλάτος του εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου  $\mathbf{H}_{AC}$  είναι πολύ μικρό ονομάζεται αντιστρεπτή μαγνητική διαπερατότητα.

$$\mu_{αντ} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta \mathbf{B}}{\Delta \mathbf{H}}, \quad \Delta \mathbf{H}_{AC} \rightarrow 0$$

- Μιγαδική μαγνητική διαπερατότητα  $\mu_{μγ}$  : Στην πράξη, ποτέ δεν έχουμε ιδανικές επαγωγές όταν ένας πυρήνας είναι φτιαγμένος από μαγνητικά υλικά. Κάτω από ημιτονοειδή διέγερση, υπάρχει μια αλλαγή φάσης μεταξύ των θεμελιωδών συνιστωσών της επαγωγής  $\mathbf{B}$  και του μαγνητικού πεδίου  $\mathbf{H}$ . Χρησιμοποιώντας μια μιγαδική ποσότητα για τη σχετική μαγνητική διαπερατότητα, αποτελούμενη από ένα φανταστικό και ένα πραγματικό μέρος, αυτό το φαινόμενο παρουσιάζεται με ευκολία. Το φανταστικό μέρος της μιγαδικής διαπερατότητας σχετίζεται με τις απώλειες στο υλικό. Υπάρχουν δύο διαφορετικές μορφές της μιγαδικής διαπερατότητας  $\mu_{μγ}$

- ο Σειριακή αναπαράσταση σύμφωνα με το εν σειρά ισοδύναμο κύκλωμα του μαγνητικού στοιχείου.

$$\mu_{μγ} = \mu'_{\sigma} - j\mu''_{\sigma}$$

Όπου  $\mu'_{\sigma}$  και  $\mu''_{\sigma}$  το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της εν σειρά μιγαδικής αγωγιμότητας

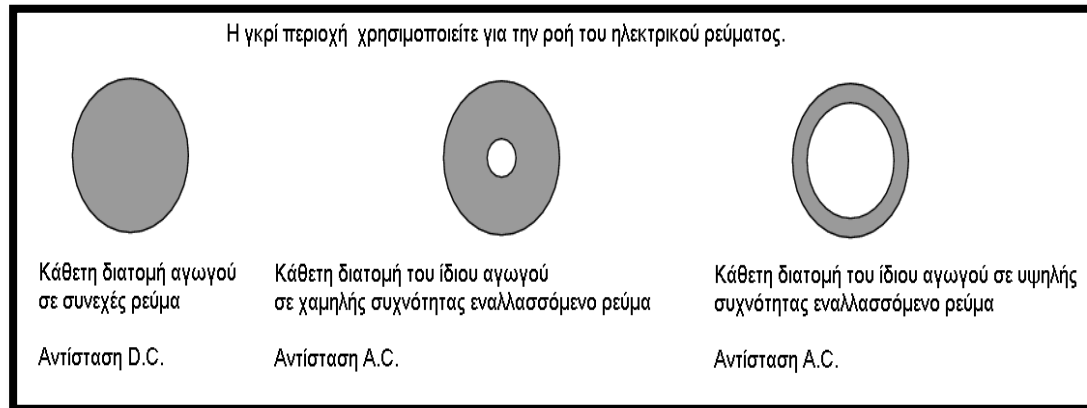
- ο Παράλληλη αναπαράσταση σύμφωνα με το εν παραλλήλω ισοδύναμο κύκλωμα του μαγνητικού στοιχείου.

$$\frac{1}{\mu_{μγ}} = \frac{1}{\mu'_{\pi}} - j \frac{1}{\mu''_{\pi}}$$

Όπου  $\mu'_{\pi}$  και  $\mu''_{\pi}$  το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της εν παραλλήλω μιγαδικής αγωγιμότητας

### 3.2.7 - Δινορεύματα

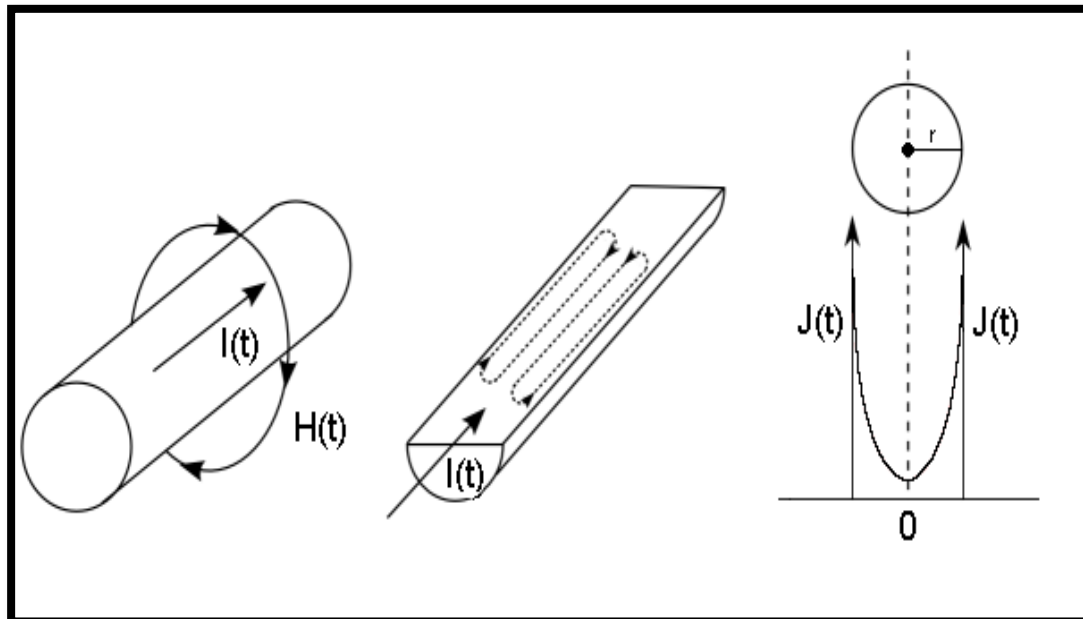
Τα Δινορεύματα είναι παρασιτικά κυκλικά ρεύματα, που επάγονται στα τυλίγματα και τον πυρήνα και προκαλούν ανεπιθύμητες απώλειες. Τα παρακάτω φαινόμενα είναι υπεύθυνα για την ύπαρξή τους.



Εικόνα 3-11 Μείωση της διατομής του αγωγού λόγω του φαινομένου των δινορευμάτων.

#### 3.2.7.a - Επιδερμικό Φαινόμενο

Όταν ένας αγωγός τοποθετηθεί στην πορεία ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος, θα αρχίσει να διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα. Το εναλλασσόμενο ρεύμα δημιουργεί με τη σειρά του, ένα μαγνητικό πεδίο γύρω του με φορά αντίθετη από αυτή του εξωτερικού πεδίου. Η ένταση του πεδίου (το οποίο περιβάλλει τον αγωγό με τη μορφή ομόκεντρων κύκλων) είναι μεγαλύτερη στο κέντρο του αγωγού και ελαττώνεται καθώς απομακρύνεται από αυτό. Σε χαμηλές συχνότητες, ο αγωγός διαρρέεται από ρεύμα κατά μήκος ολόκληρης της ενεργού διατομής του. Όσο η συχνότητα αυξάνει, το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο αυξάνει και προβάλλει αντίσταση στην κίνηση των φορέων του ρεύματος. Η αντίσταση αυτή είναι ανάλογη του



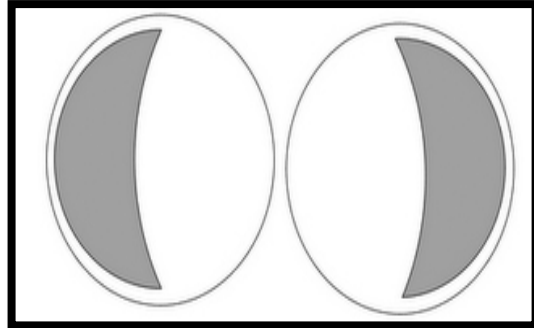
Εικόνα 3-12 Μείωση διαμέτρου λόγω δινορευμάτων στο εσωτερικό του αγωγού.

### Κεφάλαιο 3 Μετασχηματιστές

μεγέθους του πεδίου κι επομένως είναι πολύ μεγάλη στο κέντρο του αγωγού και ελαττώνεται καθώς αυξάνει η απόσταση από αυτό. Η κίνηση επομένως του ρεύματος εννοείται σε μια μικρή περιοχή γύρω από την επιφάνεια του υλικού, όπου η αντίσταση είναι μικρότερη.

#### 3.2.7.β - Φαινόμενο Γειτνίασης

Ένας άλλος λόγος δημιουργίας δινορευμάτων, είναι το φαινόμενο γειτνίασης. Όταν δύο αγωγοί διαρρέονται από εναλλασσόμενο ρεύμα δημιουργούν γύρω τους χρονικά μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία τα οποία με τη σειρά τους επάγουν παρασιτικά ρεύματα στους γύρω αγωγούς. Δηλαδή τα δινορευμάτα σε έναν αγωγό είναι μεγαλύτερα όταν



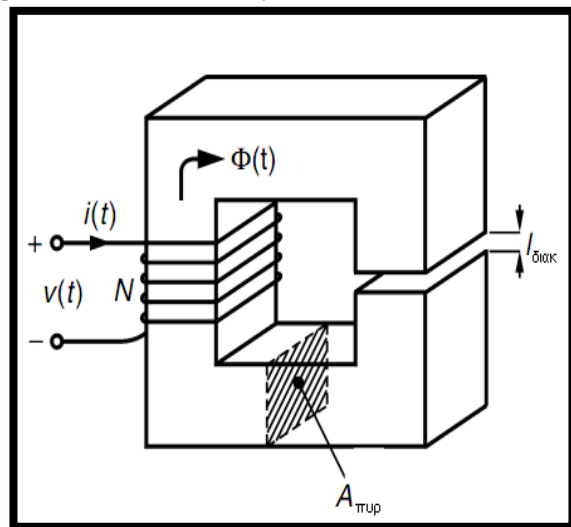
Εικόνα 3-13 Φαινόμενο γειτνίασης.

αυτός ο αγωγός ‘γειτονεύει’ με άλλους αγωγούς και μικρότερα όταν είναι μόνος ή στο κέντρο μιας συναξονικής ομάδας αγωγών. Το αποτέλεσμα του φαινομένου γειτνίασης είναι, η ανομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος μέσα στον αγωγό όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3-13.

### 3.3 - Βασικοί κανόνες Μαγνητικών Κυκλωμάτων

Στα ηλεκτρικά κυκλώματα, η αιτία δημιουργίας ηλεκτρικού ρεύματος είναι η τάση ή αλλιώς η *Ηλεκτρεγερτική δύναμη (HEΔ)*. Ανάλογα στα μαγνητικά κυκλώματα υπάρχει ένα μέγεθος που ονομάζεται *Μαγνητρεγερτική δύναμη (ΜΕΔ)*, το οποίο είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία μαγνητικής ροής  $\Phi$ , συμβολίζεται με  $\mathcal{F}$  και είναι ίση με την “ισοδύναμη” ένταση του ρεύματος που εφαρμόζεται στον πυρήνα δηλαδή:

$$\mathcal{F} = Ni = HI_c, \text{ [Ampere * turns]}$$



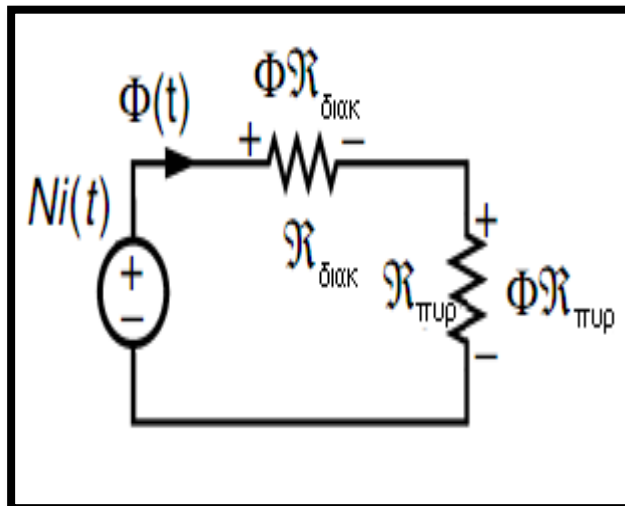
Εικόνα 3-14 Μαγνητικός πυρήνας με διάκενο.

Αντίστοιχα με το νόμο του *Ohm*, στα ηλεκτρικά κυκλώματα η σχέση που συνδέει τη *ΜΕΔ* με τη μαγνητική ροή (ισοδύναμο του ηλεκτρικού ρεύματος) είναι:

$$\mathcal{F} = \phi \mathfrak{R}$$

Όπου  $\mathfrak{R}$  η μαγνητική αντίσταση (*reluctance*) του κυκλώματος που είναι το μαγνητικό ανάλογο, της ηλεκτρικής αντίστασης και έχει μονάδες *Ampere\*turns/Weber* και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\mathfrak{R} = \frac{l_c}{\mu A}$$



Εικόνα 3-15 Ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα του πυρήνα της εικόνας 3-14.

Για ένα κύκλωμα με διάκενο (Εικόνες 3-15,16) απλά διαχωρίζουμε σε δύο μέρη την εξίσωση του *Ampere* για κάθε μέσο (μαγνητικός πυρήνας και διάκενο) και έτσι έχουμε:

$$H_{\pi\tau\upsilon\rho} I_{\pi\tau\upsilon\rho} + H_{\delta\alpha\kappa} I_{\delta\alpha\kappa} = Ni$$

Οπού  $H_{\pi\tau\upsilon\rho}$  και  $H_{\delta\alpha\kappa}$  η ένταση του πεδίου στον πυρήνα και στο διάκενο αντίστοιχα, ενώ  $I_{\pi\tau\upsilon\rho}$  το μέσο μήκος της μαγνητικής διαδρομής στον πυρήνα και  $I_{\delta\alpha\kappa}$  το ισοδύναμο μήκος της μαγνητικής διαδρομής στο διάκενο.

Η εφαρμογή του νόμου *Gauss* για μια κλειστή διαδρομή, που διατρέχει τον πυρήνα και το διάκενο και συμπεριλαμβάνει τη συνολική επιφάνεια μετάβασης μεταξύ τους δίνει την έκφραση:

$$\int \mathbf{B}_{\pi\tau\upsilon\rho} d\mathbf{S} + \int \mathbf{B}_{\delta\alpha\kappa} d\mathbf{S} = 0$$

η οποία αποφέρει

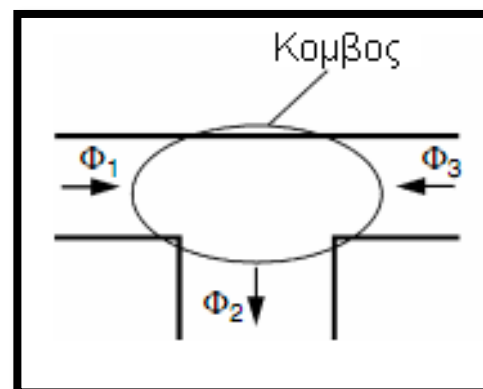
$$\Phi_{\pi\tau\upsilon\rho} = \Phi_{\delta\alpha\kappa} = \Phi, \quad (1)$$

$$\Phi_{\pi\tau\upsilon\rho} R_{\pi\tau\upsilon\rho} + \Phi_{\delta\alpha\kappa} R_{\delta\alpha\kappa} = Ni \Rightarrow \Phi (R_{\pi\tau\upsilon\rho} + R_{\delta\alpha\kappa}) = Ni$$

Όπου  $\Phi_{\pi\tau\upsilon\rho}$ ,  $\Phi_{\delta\alpha\kappa}$  η μαγνητική ροή και  $R_{\pi\tau\upsilon\rho}$ ,  $R_{\delta\alpha\kappa}$  η μαγνητική αντίσταση στον πυρήνα και στο διάκενο.

Οι παραπάνω εξισώσεις έχουν ισχύ μόνο για μικρά διάκενα. Σε μεγαλύτερου μήκους διάκενα, η ροή τείνει να σκεδάζει προς το εξωτερικό περιβάλλον γιατί σε αντίθεση με τα ηλεκτρικά κυκλώματα δεν υπάρχει κάποιος αληθινός μονωτής, καθώς η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του αέρα είναι ίση με τη μονάδα, δηλαδή μη μηδενική.

Εφαρμόζοντας αυτή τη φορά το νόμο *Gauss*, σε ένα μαγνητικό κόμβο, παίρνουμε ως αποτέλεσμα ότι τα αλγεβρικά αθροίσματα των ροών που εξέρχονται του κόμβου είναι μηδέν



Εικόνα 3-16 Αναπαράσταση του νόμου Gauss.

$$\int_S \mathbf{B} \, ds = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n \varphi_i = 0$$

Που είναι κάτι ανάλογο του νόμου ρευμάτων του *Kirchoff* στα ηλεκτρικά κυκλώματα.

Ένα ακόμα θέμα που αξίζει να αναφερθεί είναι ότι, η μαγνητική ροή δεν μεταφέρεται εξολοκλήρου μέσα από το μαγνητικό υλικό διότι, λόγω της μικρής διαφοράς στην κλίμακα τιμών της μαγνητικής διαπερατότητας ένα ποσοστό σκεδάζει προς το εξωτερικό περιβάλλον και δεν συνδέει τη  $n$  με τη  $n + 1$  σπείρα του τυλίγματος. Αυτή η ροή ονομάζεται ροή διαρροής.

Επομένως, μια πιο σωστή διατύπωση του νόμου του *Faraday* είναι:

$$V_{(t)} = -N * \frac{d\varphi_{i(t)}}{dt}$$

Όπου  $\varphi_i$  η μαγνητική ροή σε κάθε σπείρα του τυλίγματος.

Έτσι λοιπόν μπορούμε να ορίσουμε την *πεπλεγμένη ροή*  $\Psi$  ως, το άθροισμα των ροών κάθε σπείρας:

$$\Psi = \sum_{i=1}^N \varphi_i$$

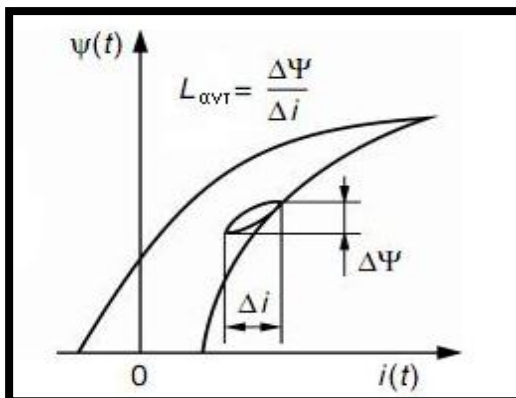
### 3.3.1 - Επαγωγή

#### 3.3.1.a - Επαγωγή: Ορισμοί

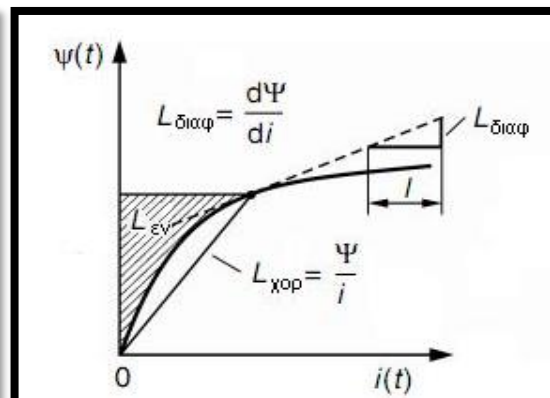
Ο όρος επαγωγή μπορεί να οριστεί με διαφορετικούς τρόπους ανάλογα, με την εξάρτηση από τη μη γραμμικότητα της  $\mathbf{B} - \mathbf{H}$  χαρακτηριστικής του υλικού.

*Επαγωγή χορδής ή επαγωγή εύρους  $L_{\text{χορ}}$* : Η κλίση της χορδής στην καμπύλη της πεπλεγμένης ροής (η ροή που συνδέει όλες τις σπείρες του τυλίγματος, αναλύεται παρακάτω)  $\Psi = \Psi_{(t)}$

$$L_{\text{χορ}} = \frac{\Psi}{i}$$



Εικόνα 3-17 Γραφική αναπαράσταση αντιστρεπτής επαγωγής.



Εικόνα 3-18 Γραφική αναπαράσταση Διαφορικής επαγωγής και επαγωγής χορδής.

Διαφορική επαγωγή  $L_{\text{διαφ}}$ : Η παράγωγος της πεπλεγμένης ροής. Αυτή η επαγωγή παρατηρείται όταν μικρά σήματα υπερτίθενται στο ρεύμα του τυλίγματος.

$$L_{\text{διαφ}} = \frac{d\Psi}{di}$$

Σημειώνεται ότι, στα υλικά που παρουσιάζουν υστέρηση, ένας μικρός βρόχος παρατηρείται με αποτέλεσμα μια μικρότερη επαγωγή χαμηλού σήματος, η οποία ονομάζεται *αντιστρεπτή επαγωγή*.

$$L_{\text{αντ}} = \frac{\Delta\Psi}{\Delta i}$$

Αμελώντας τις απώλειες η διαφορική επαγωγή είναι ίση με την αντιστρεπτή.

Ενεργή επαγωγή  $L_{\text{εν}}$ : στην εικόνα 3-18 η σκιαγραφημένη περιοχή εκπροσωπεί την αποθηκευμένη επαγωγική ενέργεια και επομένως ορίζεται

$$L_{\text{εν}} = \frac{2 \int_0^{\Psi} i d\Psi}{i^2}$$

Η σχέση ανάμεσα στις διαφορετικής μορφής επαγωγές, για μια κανονική καμπύλη κόρου είναι  $L_{\text{διαφ}} < L_{\text{εν}} < L_{\text{χορ}}$  η οποία είναι χρήσιμη στους μετατροπείς, οι οποίοι αποθηκεύουν ενέργεια και μετά την εναποθέτουν στο φορτίο.

Η επαγωγή σε μια κλασική δοκιμή χωρίς φορτίο πρώτα με ημιτονοειδές τάση  $\alpha$  (μη ημιτονοειδές ρεύμα) και έπειτα με ημιτονοειδές ρεύμα  $\beta$  (μη ημιτονοειδές τάση) η μετρούμενη επαγωγή κάθε φορά είναι

$$\alpha) L_V = \frac{V_{\text{rms}}}{\omega I_{\text{rms}}}, \quad \beta) L_I = \frac{V_{\text{rms}}}{\omega I_{\text{rms}}}, \quad \text{οπου } \omega = 2\pi f$$

Κοντά στον κόρο ενός πυρήνα μπορεί κανείς να περιμένει τις παρακάτω σχέσεις  $L_{\text{διαφ}} < L_V < L_I < L_{\text{χορ}}$ .

### 3.3.1.β - Αυτεπαγωγή και Αμοιβαία Επαγωγή

Η αυτεπαγωγή  $L$  εκφράζει το λόγο της ροής, η οποία παράγεται από μια σπείρα ως προς το ρεύμα της σπείρας.

$$L = \frac{\Psi}{i} = \frac{N\phi}{i} = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} = N^2 \Lambda$$

Η μαγνητική σύζευξη μεταξύ των τυλιγμάτων μιας μαγνητικής συσκευής εκφράζεται από την αμοιβαία επαγωγή  $M$  και ορίζεται από τον παρακάτω τύπο

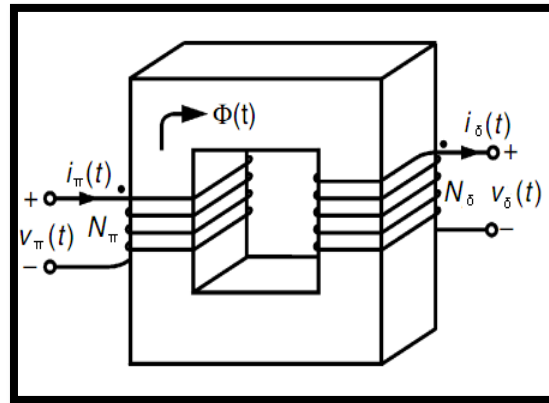
$$M = \frac{N_1 \Phi_{12}}{i_2} = \frac{N_2 \Phi_{21}}{i_1}$$

### 3.4 - Ανάλυση Λειτουργίας Μετασχηματιστών

#### 3.4.1 - Ιδανικός Μετασχηματιστής

Σε έναν ιδανικό μετασχηματιστή, η μαγνητική αντίσταση είναι μηδέν και οι αντιστάσεις των τυλιγμάτων αμελούνται. Επομένως, η *ΜΕΔ* είναι μηδέν και ο νόμος του *Ampere* γίνεται:

$$0 = N_{\pi} i_{\pi} + N_{\delta} i_{\delta}$$



Οπότε εφαρμόζοντας το νόμο του *Faraday* παίρνουμε

Εικόνα 3-19 Μετασχηματιστής με πυρήνα.

$$v_{\pi} = N_{\pi} \frac{d\phi_{\pi\rho\rho}}{dt} \quad v_{\delta} = N_{\delta} \frac{d\phi_{\pi\rho\rho}}{dt}, \quad v_{\pi} = e_{\pi}, \quad v_{\delta} = e_{\delta}$$

Όπου  $\phi_{\pi\rho\rho}$  η ροή του πυρήνα, την οποία εάν εξαλείψουμε από την εξίσωση παίρνουμε

$$\frac{e_{\pi}}{N_{\pi}} = \frac{e_{\delta}}{N_{\delta}}$$

Για τον ιδανικό Μ/Σ της Εικόνα 3-29 μπορούμε να γράψουμε με βάση τα παραπάνω

$$\frac{e_{\pi}}{e_{\delta}} = \frac{N_{\pi}}{N_{\delta}}, \quad \frac{i_{\pi}}{i_{\delta}} = -\frac{N_{\delta}}{N_{\pi}}$$

Σε αυτό το σημείο μπορούμε να ορίσουμε το λόγο μετασχηματισμού (*turns ratio*) ως:

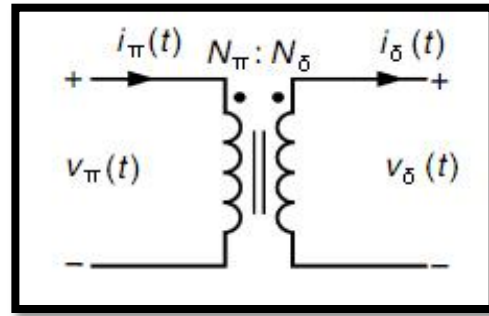
$$\alpha = \frac{N_{\pi}}{N_{\delta}}$$

Με βάση τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι, ο ιδανικός μετασχηματιστής είναι μια συσκευή χωρίς απώλειες με μηδενική μαγνητική αντίσταση ο οποίος λειτουργεί ως, μετατροπέας τάσης σύμφωνα με τα παρακάτω

- Όταν ο Μ/Σ τροφοδοτείται με τάση σε ένα τύλιγμα χαμηλής τάσης και τροφοδοτεί ένα τύλιγμα υψηλής τάσης ο Μ/Σ ονομάζεται *ανυψωτής (step-up transformer)*
- Όταν ο Μ/Σ τροφοδοτείται με τάση σε ένα τύλιγμα υψηλής τάσης και τροφοδοτεί ένα τύλιγμα χαμηλής τάσης ο Μ/Σ ονομάζεται *υποβιβαστής (step-down transformer)*
- Όταν ο Μ/Σ λειτουργεί με δύο τυλίγματα ίδιων περιελίξεων  $N_1 = N_2$  ο Μ/Σ ονομάζεται *ένα προς ένα (one to one transformer)*

### Κεφάλαιο 3 Μετασχηματιστές

Ένα πράγμα που πρέπει να αναφερθεί είναι, οι τελείες πολικότητας στους μετασχηματιστές. Με βάση όλα τα παραπάνω, μπορεί κανείς να υπολογίσει την τάση και τα ρεύματα στο πρωτεύον και το δευτερεύον ενός Μ/Σ αφήνοντας άλυτο το θέμα της πολικότητας. Ο μόνος τρόπος για να γίνει αυτό είναι να ανοιχθεί το κέλυφος του Μ/Σ και να μελετηθούν τα τυλίγματα, ως προς τη φορά περιέλιξής τους γύρω από το μαγνητικό πυρήνα, πράγμα το οποίο είναι δύσκολο έως αδύνατο. Για να αποφευχθεί μια τέτοια διαδικασία στα κυκλωματικά διαγράμματα τοποθετούνται τελείες που δείχνουν την πολικότητα της τάσης και του ρεύματος με βάση τις παρακάτω συμβάσεις:



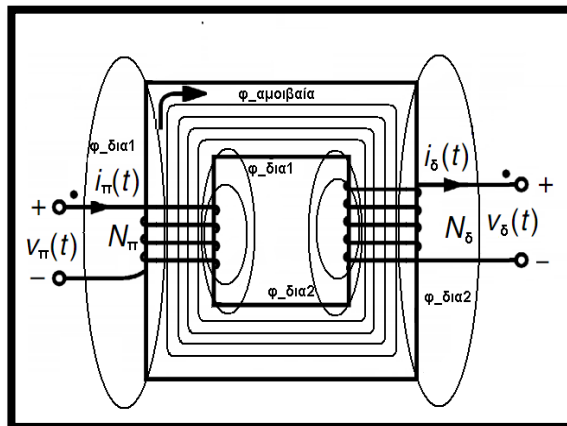
Εικόνα 3-30 Ισοδύναμο κύκλωμα ιδανικού μετασχηματιστή.

1. Οι πολικότητες των τάσεων στα σημειωμένα με τελεία άκρα των τυλιγμάτων είναι η ίδια, δηλαδή αν η τάση στο σημειωμένο με τελεία άκρο του πρωτεύοντος είναι θετικότερη σε σχέση με το μη σημειωμένο άκρο του, τότε και στο δευτερεύον το σημειωμένο άκρο είναι θετικότερο σε σχέση με το μη σημειωμένο.

2. Τα ρεύματα στο πρωτεύον και δευτερεύον έχουν αντίθετη φορά ως προς τα σημειωμένα με τελεία άκρα τους. Δηλαδή, αν το ρεύμα του πρωτεύοντος έχει φορά προς το σημειωμένο άκρο, τότε το ρεύμα δευτερεύοντος έχει φορά προς το μη σημειωμένο άκρο του.

#### 3.4.2 - Πραγματικός Μετασχηματιστής

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η μαγνητική ροή δεν μεταφέρεται εξολοκλήρου μέσα από το μαγνητικό υλικό και δεν συνδέει η ίδια ροή όλες τις σπείρες ενός τυλίγματος. Για αυτό το λόγο, ορίσαμε προηγουμένως την πεπλεγμένη ροή  $\Psi$ . Η πεπλεγμένη ροή όμως δεν είναι ακριβώς ίση με  $N\Phi$  διότι σε κάθε σπείρα, ανάλογα με τη θέση της στον πυρήνα, διέρχεται ροή διαφορετικού μεγέθους. Έτσι λοιπόν για πρακτικούς λόγους ορίζουμε τη μέση τιμή ροής ανά σπείρα του τυλίγματος ως:



Εικόνα 3-21 Αναπαράσταση αμοιβαίας μαγνητικής ροής και μαγνητικής ροής διαρροής.

$$\bar{\Phi} = \frac{\Psi}{N}$$

Όμως όπως ακριβώς κάποιο ποσοστό μαγνητικής ροής διαρρέει στο περιβάλλον και δεν ενώνει όλες τις σπείρες του ίδιου τυλίγματος, έτσι ακριβώς κάποιο ποσοστό της μέσης ροής σκεδάζει και δεν εμφανίζεται στο δευτερεύον του μετασχηματιστή. Έτσι λοιπόν χωρίζουμε τη μέση ροή σε δύο τμήματα:



## Κεφάλαιο 3 Μετασχηματιστές

- $\Phi_{\text{διαρροής}}$  η ροή διαρροής που σκεδάζει εξωτερικά του πυρήνα (*Leakage flux*).
- $\Phi_{\text{αμοιβαία}}$  η ροή που συνδέει το πρωτεύον με το δευτερεύον του Μ/Σ και ονομάζεται *αμοιβαία ροή* (*Mutual flux*).

$$\bar{\Phi}_{\pi} = \Phi_{\text{διαρ}} + \Phi_{\text{αμοιβαία}}$$

Με βάση τα παραπάνω είναι προφανές ότι, η *αμοιβαία ροή* παίζει το σημαντικότερο ρόλο στην επαγωγή της τάσης στο δευτερεύον. Έτσι λοιπόν αφού χωρίσουμε τη μέση ροή σε αμοιβαία και διαρροής μπορούμε να γράψουμε:

$$\begin{aligned} e_{\pi(t)} &= N_{\pi} \left( \frac{d\Phi_{\text{διαρ}1(t)}}{dt} + \frac{d\Phi_{\text{αμοιβαία}(t)}}{dt} \right) \Rightarrow \\ \Rightarrow e_{\pi(t)} &= N_{\pi} \frac{d\Phi_{\text{διαρ}1(t)}}{dt} + N_{\pi} \frac{d\Phi_{\text{αμοιβαία}(t)}}{dt} \xrightarrow{\Phi_{\text{διαρ}1(t)} \ll \Phi_{\text{αμοιβαία}(t)}} \\ \Rightarrow e_{\pi(t)} &= N_{\pi} \frac{d\Phi_{\text{αμοιβαία}(t)}}{dt} \text{ και ομοίως } e_{\delta(t)} = N_{\delta} \frac{d\Phi_{\text{αμοιβαία}(t)}}{dt} \end{aligned}$$

Και συνδυάζοντας τις παραπάνω καταλήγουμε

$$\frac{e_{\pi(t)}}{N_{\pi}} = \frac{e_{\delta(t)}}{N_{\delta}} \Rightarrow \frac{e_{\pi(t)}}{e_{\delta(t)}} = \frac{N_{\pi}}{N_{\delta}} = \alpha$$

Που σημαίνει ότι, ο λόγος της τάσης των τυλιγμάτων που οφείλεται στη ροή διασύνδεσης είναι ίσος με το λόγο μετασχηματισμού.

### 3.4.2.α - Ρεύμα Διέγερσης

Εάν το πρωτεύον του μετασχηματιστή τροφοδοτηθεί με εναλλασσόμενη τάση, τότε ακόμα και χωρίς φορτίο ένα ρεύμα διαρρέει το πρωτεύον, το οποίο ονομάζουμε *ρεύμα διέγερσης*  $i_{\delta i \epsilon}$ . Από το νομο του Ampere, αυτό το ρεύμα είναι απαραίτητο για την ανάπτυξη μαγνητικής ροής στο κύκλωμα και το χωρίζουμε σε δύο συνιστώσες:

- Το ρεύμα μαγνήτισης  $i_{\mu \alpha \gamma \nu}$  που είναι η αιτία ανάπτυξης μαγνητικής ροής.
- Το ρεύμα απωλειών πυρήνα  $i_{\alpha \pi}$  που είναι το ρεύμα που μεταφέρει την ισχύ, η οποία καταναλώνεται στον πυρήνα με τη μορφή των απωλειών υστέρησης και δινορευμάτων.

Στους πραγματικούς μετασχηματιστές, η μαγνητική αντίσταση είναι μη μηδενική, επομένως η ροή είναι:

$$\bar{\Phi}_{\text{πυρήνα}} = \frac{N_{\pi} i_{\pi} + N_{\delta} i_{\delta}}{\mathfrak{R}_{\text{πυρήνα}}}$$

Και αντικαθιστώντας τη ροή  $\Phi_{\text{πυρήνα}}$  στην  $e_{\pi} = N_{\pi} \frac{d\Phi_{\text{πυρήνα}}}{dt}$  παίρνουμε μετά από κατάλληλη επίλυση

$$e_{\pi} = \frac{N_{\pi}^2}{\mathfrak{R}_{\text{πυρήνα}}} \frac{d(i_{\pi} + i_{\delta} \frac{N_{\delta}}{N_{\pi}})}{dt}$$

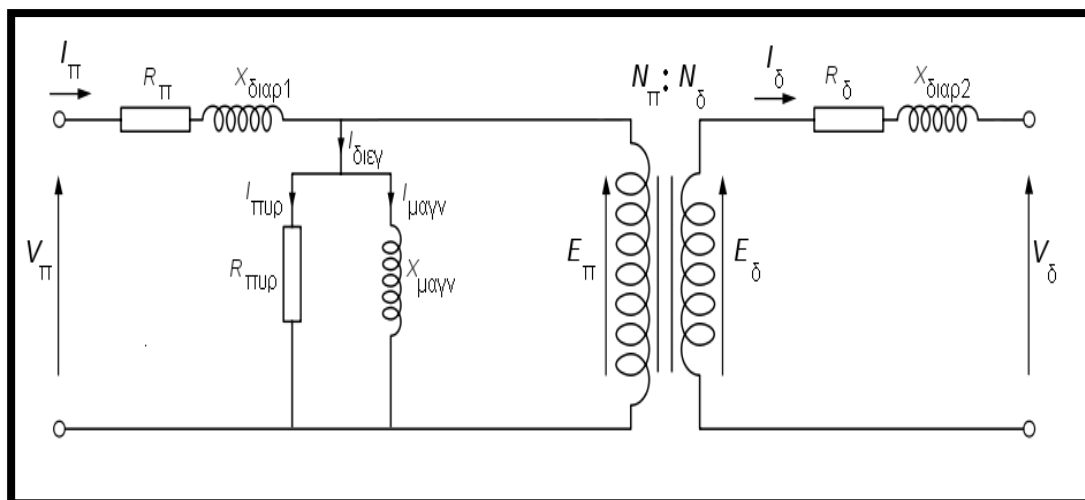
Σε αυτή την εξίσωση ξεχωρίζουμε δύο όρους. Πρώτα τον όρο  $\frac{N_{\pi}^2}{\mathfrak{R}_{\text{πυρήνα}}}$  που είναι ισοδύναμος με μια επαγωγή την οποία ονομάζουμε επαγωγή μαγνήτισης  $L_{\text{μαγν}}$  και δεύτερον το ρεύμα  $i_{\pi} + i_{\delta} \frac{N_{\delta}}{N_{\pi}}$  που οποίο είναι το ρεύμα μαγνήτισης  $i_{\text{μαγν}}$ . Και οι δύο αυτοί όροι αναφέρονται στο πρωτεύον του Μ/Σ.

### 3.4.2.β - Ισοδύναμο Κύκλωμα Μετασχηματιστή

Για να κατασκευάσουμε ένα μοντέλο που να περιγράφει την λειτουργία ενός μετασχηματιστή, πρέπει να λάβουμε υπόψη, όλες τις απώλειες που εμφανίζονται κατά τη λειτουργία του. Οι βασικότερες από αυτές είναι οι παρακάτω

- Απώλειες χαλκού ( $I^2R$ ): Θερμικές απώλειες, λόγω των ωμικών αντιστάσεων των καλωδίων των τυλιγμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Αυτού του είδους οι απώλειες μοντελοποιούνται με την τοποθέτηση δύο ωμικών αντιστάσεων  $R_{\pi}$ ,  $R_{\delta}$ .
- Απώλειες δινορευμάτων: Θερμικές απώλειες, που καταναλώνονται στην αντίσταση του μετάλλου του πυρήνα, λόγω του φαινομένου των δινορευμάτων.
- Απώλειες υστέρησης: Απώλειες λόγω της αναδιάταξης των μαγνητικών τομέων στο εσωτερικό του μαγνητικού υλικού, που επαναλαμβάνονται σε κάθε περίοδο.
- Ροή διαρροής: Πρόκειται για απώλειες λόγω της σκέδασης προς το εξωτερικό περιβάλλον των μαγνητικών ροών πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Αυτές οι ροές παράγουν τις αυτεπαγωγές  $L_{\text{διαρροής}1}$ ,  $L_{\text{διαρροής}2}$  των τυλιγμάτων του πυρήνα.

Οι απώλειες χαλκού που είναι οι ωμικές απώλειες στις αντιστάσεις των τυλιγμάτων, μοντελοποιούνται με την τοποθέτηση δύο ωμικών αντιστάσεων  $R_{\pi}$ ,  $R_{\delta}$  για το πρωτεύον και το δευτερεύον αντίστοιχα.



Εικόνα 3-22 Ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικού μετασχηματιστή.

### Κεφάλαιο 3 Μετασχηματιστές

Επειδή τα Φερρομαγνητικά υλικά είναι τα ίδια αγωγοί, η χρονικά μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή προκαλεί μικρά κυκλικά ρεύματα στον πυρήνα που όπως έχει αναφερθεί, ονομάζονται δινορεύματα. Αυτά τα ρεύματα εκπροσωπούν απώλειες ισχύος που είναι ανεξάρτητες του ρεύματος φορτίου. Επίσης, η συνεχής αλλαγή των μαγνητικών στροφορμών των τομέων στο μαγνητικό υλικό είναι άλλη μία μορφή απωλειών. Ο συνδυασμός των απωλειών υστέρησης και δινορευμάτων είναι οι ολικές απώλειες πυρήνα και επειδή το ρεύμα που σχετίζεται με τις απώλειες πυρήνα είναι επιπλέον του ρεύματος φορτίου, οι απώλειες πυρήνα παρίστανται σαν μια αντίσταση  $\mathbf{R}_{\text{πυρήνα}}$  εν παραλλήλω με το πρωτεύον του μετασχηματιστή.

Οι ροές διαρροής που αναφέρθηκαν προηγουμένως παράγουν κάποιες τάσεις στο πρωτεύον και το δευτερεύον:

$$\mathbf{e}_{\text{διαρροής1}} = N_{\pi} \frac{d\Phi_{\text{διαρροής1}}}{dt}, \quad \mathbf{e}_{\text{διαρροής2}} = N_d \frac{d\Phi_{\text{διαρροής2}}}{dt}$$

Επειδή οι διαδρομές των ροών αυτών είναι μέσω αέρα, του οποίου η μαγνητική αντίσταση είναι σταθερή και κατά πολύ μεγαλύτερη της μαγνητικής αντίστασης του πυρήνα, οι ροές είναι ανάλογες των ρευμάτων που τις προκαλούν δηλαδή:

$$\Phi_{\text{διαρροής1}} = \frac{N_{\pi} i_{\pi}}{\mathfrak{R}_{\text{αερα}}}, \quad \Phi_{\text{διαρροής2}} = \frac{N_{\delta} i_{\delta}}{\mathfrak{R}_{\text{αερα}}}$$

Με κατάλληλη αντικατάσταση και επίλυση καταλήγουμε

$$\mathbf{e}_{\text{διαρροής1}} = N_{\pi} \frac{d}{dt} \left( \frac{N_{\pi} i_{\pi}}{\mathfrak{R}_{\text{αερα}}} \right) = \frac{N_{\pi}^2}{\mathfrak{R}_{\text{αερα}}} \frac{di_{\pi}}{dt} \text{ και ομοίως } \mathbf{e}_{\text{διαρροής2}} = \frac{N_{\delta}^2}{\mathfrak{R}_{\text{αερα}}} \frac{di_{\delta}}{dt}$$

Όπου  $\mathbf{L}_{\text{διαρροής1}} = \frac{N_{\pi}^2}{\mathfrak{R}_{\text{αερα}}}$  και  $\mathbf{L}_{\text{διαρροής2}} = \frac{N_{\delta}^2}{\mathfrak{R}_{\text{αερα}}}$  οι αυτεπαγωγές διαρροής του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος αντίστοιχα, που τοποθετούνται σε σειρά με τα εν λόγο τυλίγματα στο ισοδύναμο κύκλωμα.

Ένα τελευταίο πράγμα που τοποθετείται στο ισοδύναμο κύκλωμα είναι, η αυτεπαγωγή μαγνήτισης  $\mathbf{L}_{\text{μαγν}}$  η οποία τοποθετείται στον κλάδο μαγνήτισης παράλληλα με την αντίσταση πυρήνα  $\mathbf{R}_{\text{πυρήνα}}$ . Αυτό γίνεται επειδή, το ρεύμα μαγνήτισης είναι ανάλογο της τάσης που εφαρμόζεται στο πρωτεύον ενώ, η κυματομορφή της τάσης είναι σε διαφορά φάσης  $90^{\circ}$ .

### 3.5 - Βιβλιογραφία

- Ηλεκτρικές μηχανές AC/DC, Stephen Chapman, 3<sup>η</sup> έκδοση, εκδοτικός οίκος ΤΖΙΟΛΑ.
- Ηλεκτρονικά Ισχύος, Mohan/Underland/Robbins, Β έκδοση, εκδοτικός οίκος ΤΖΙΟΛΑ.
- Inductors and transformers for power electronics, Alex Van den Bossche/Vencislav Cekov Valchen, εκδοτικός οίκος Taylor & Francis Group.
- Practical\_design\_of\_power\_supplies, Ron Lenk, IEEE Press.
- Magnetics design for switching power supplies, Lloyd H. Dixon

# Κεφάλαιο 4

## Προσομοίωση του Μετατροπέα Forward με το Pspice.

---

### Εισαγωγή

Το Pspice είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης αναλογικών και ψηφιακών κυκλωμάτων για ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Το όνομα είναι ένα αρκτικόλεξο για το “*πρόγραμμα προσωπικής προσομοίωσης με έμφαση στα ολοκληρωμένα κυκλώματα*” (**Personal Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis**). Το Pspice αναπτύχθηκε αρχικά από την microSIM η οποία εξαγοράστηκε από την OrCAD (Oregon Computer Aided Design) και η οποία με τη σειρά της εξαγοράστηκε από την εταιρία Cadence Design Systems. Το Pspice παρέχει ένα εργαλείο στους ηλεκτρολόγους / ηλεκτρονικούς μηχανικούς που έχει την δυνατότητα εξομοίωσης ενός ηλεκτρικού/ηλεκτρονικού κυκλώματος. Το κύκλωμα μπορεί να μελετηθεί σε διάφορες καταστάσεις όπως ως προς τη συχνότητα, το χρόνο, τη θερμοκρασία και άλλα. Επίσης παρέχονται από την Cadence (και από εταιρίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, μαγνητικών πυρήνων κτλ...) βιβλιοθήκες προσομοίωσης για όλα τα στοιχεία που υπάρχουν στην αγορά. Μια προσομοίωση βοηθά τον κατασκευαστή να δοκιμάσει διαφορετικά στοιχεία και να εντοπίσει / αντιμετωπίσει τυχόν προβλήματα πριν το στάδιο εκτύπωσης οιαδήποτε πλακέτας. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναληθί ο Forward Converter με την τεχνική της συντονισμένης απομαγνήτησης.

## 4.1 - Το Ιδανικό Κύκλωμα

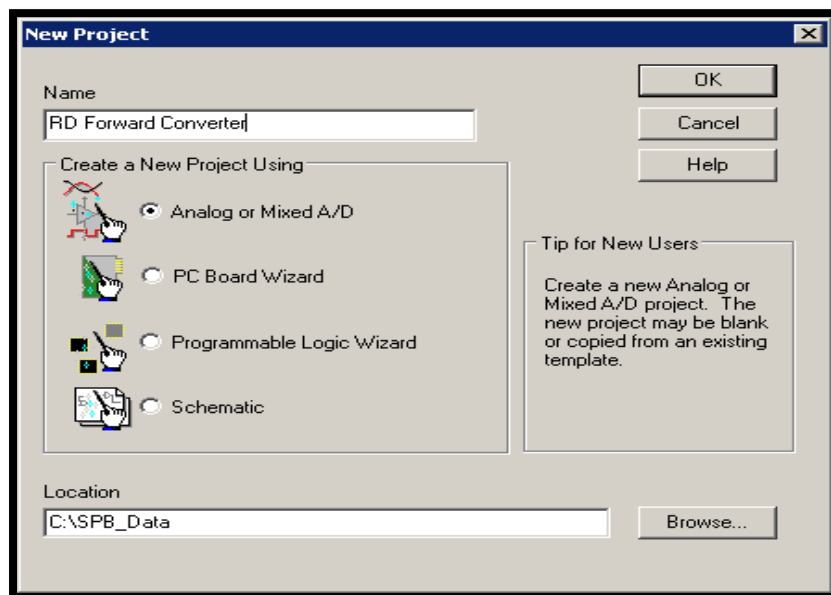
Πρώτα θα προσομοιωθεί το κατά προσέγγιση ιδανικό κύκλωμα με χρήση των διαφόρων εξαρτημάτων που βρίσκονται στη βιβλιοθήκη **Breakout** του Pspice. η εν λόγω βιβλιοθήκη προσφέρει ηλεκτρονικά στοιχεία με σχεδόν ιδανικές τιμές για την καλύτερη μελέτη των κυκλωμάτων.

### 4.1.1 - Ξεκινώντας με το Pspice

Η διαδικασία ξεκινά ανοίγοντας το Pspice και δημιουργώντας ένα καινούργιο project

*File → New → Project*

Στο αναδυόμενο παράθυρο επιλέγουμε *Create a New Project Using → Analog or Mixed A/D* και σαν όνομα του Project γράφουμε *RD Forward Converter*. Στο επόμενο παράθυρο αφού επιλέξουμε *Create a Blank Project* μεταφερόμαστε στην πρώτη σελίδα του σχηματικού διαγράμματος. Για να αποφευχθούν ασάφειες ο φάκελος *Schematic 1* καθώς και το εσωτερικό *Page* μετονομάζονται σε *Ideal* και *RD Forward* αντίστοιχα κάνοντας δεξί κλικ και επιλέγοντας μετονομασία.

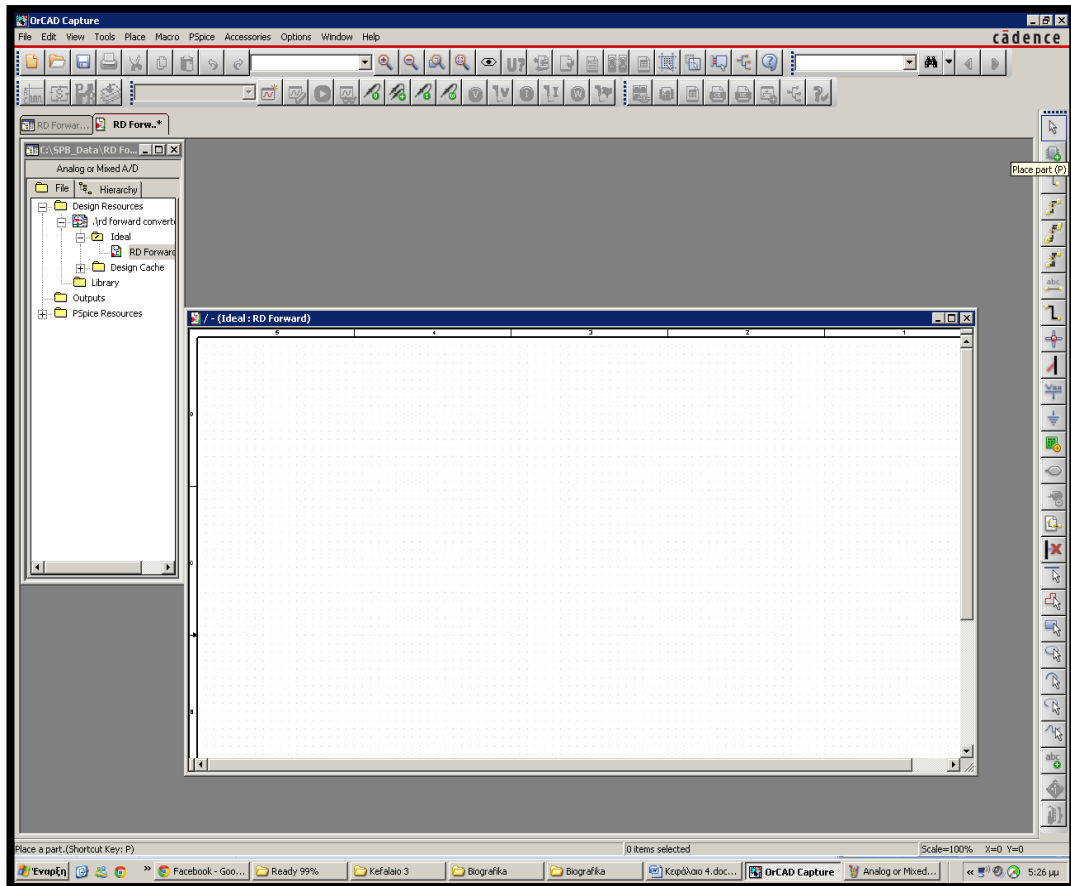


Εικόνα 4-1 Μενού επιλογής νέου Project.

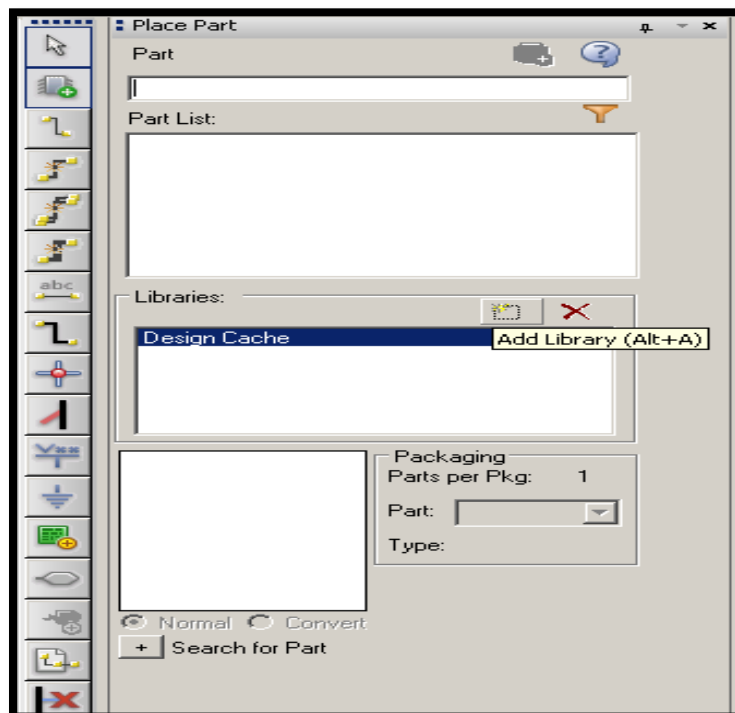
Πρώτα από όλα πρέπει να φορτώσουμε όλες της απαραίτητες βιβλιοθήκες. Αυτές είναι οι εξής :

- **Source.olb** : Για την πηγή εισόδου συνεχούς τάσης καθώς και για τους παλμούς οδήγησης του διακόπτη.
- **Analog.olb** : Για της αντιστάσεις, πηνία και πυκνωτές του κυκλώματος
- **Magnetics.olb** : Για τον μαγνητικό πυρήνα του μετασχηματιστή.
- **Breakout.olb** : Για τα “ιδανικά” στοιχεία του κυκλώματος (διακόπτης, δίοδοι).
- **Special.olb** : Για το Param Block.

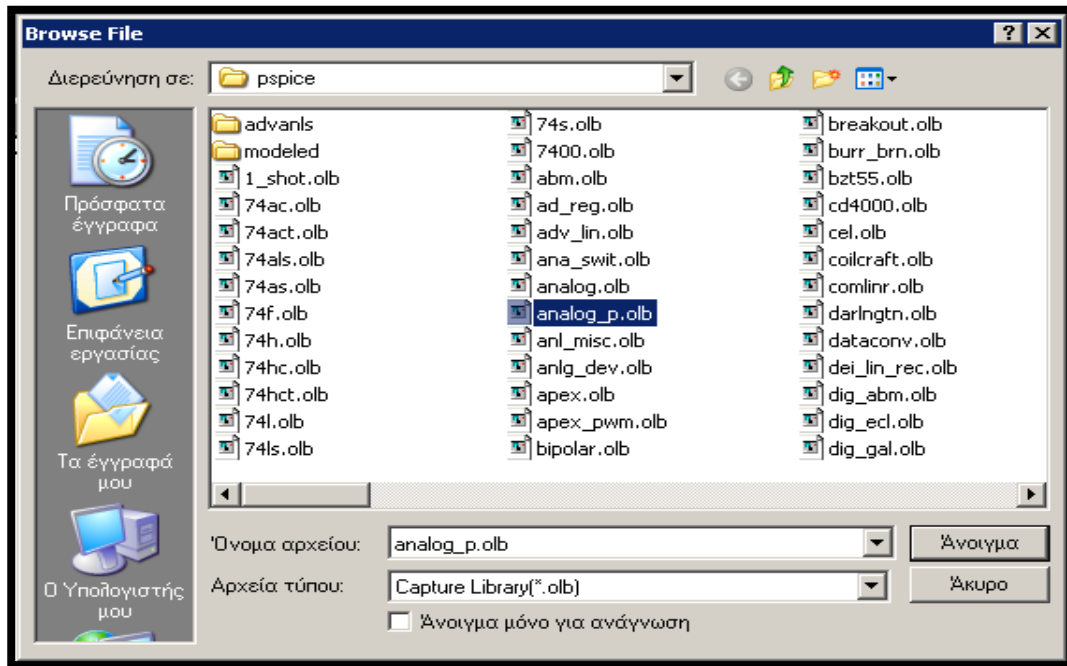
## Κεφάλαιο 4 Προσομοίωση του μετατροπέα Forward με το Pspice.



Εικόνα 4-2 Πρώτη οθόνη νέου Project. Πατώντας το κουμπί Place Part (πλήκτρο P) εμφανίζεται το μενού τοποθέτησης εξαρτημάτων.



Εικόνα 4-3 Μενού τοποθέτησης εξαρτημάτων. Πατώντας το κουμπί Add Library (Πλήκτρα Alt+A) αναδύεται το παράθυρο επιλογής βιβλιοθήκης.



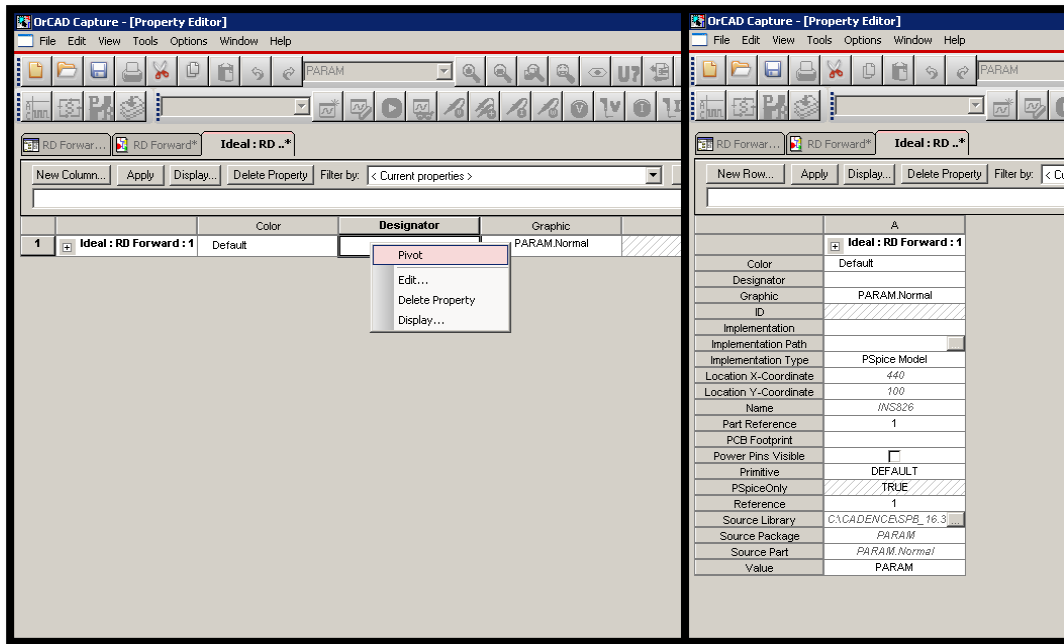
Εικόνα 4-4 Παράθυρο επιλογής βιβλιοθηκών. Φαίνεται η βιβλιοθήκη *analog.olb* πάνω από την επιλεγμένη στην εικόνα βιβλιοθήκη *analog\_p.olb*.

Αφού προστεθούν οι βιβλιοθήκες τοποθετούμε τα κατάλληλα στοιχεία στη σελίδα RD Forward Converter. Αυτά είναι ο διακόπτης Sbreak και δυο δίοδοι Dbreak από την Breakout library, τρία πηνία, δυο πυκνωτές και μια αντίσταση από την Analog library, μια πηγή συνεχούς τάσης Vdc και μια πηγή τετραγωνικών παλμών Vpulse από την Source library, ένα Coupling block E30\_17\_5\_3F3 της FerroxCube από την Magnetic library και τέλος το PARAM block που βοηθά στην σωστή ομαδοποίηση των ονομαστικών τιμών όλων των στοιχείων από την Special library. Αφού κατασκευαστή το κύκλωμα της εικόνας 14 του δευτέρου κεφαλαίου (σημειώνεται ότι στο εν λόγω κύκλωμα η επαγωγή  $L_m$  έχει προστεθεί για λόγους σαφήνειας και παραλείπεται για την προσομοίωση αυτή) κάνουμε διπλό κλικ στο PARAM block και στο παράθυρο που εμφανίζεται κάνουμε δεξί κλικ σε ένα από τα στοιχεία και επιλεγούμε *Pivot* ώστε ο πίνακας να περιστραφεί κατά 180 μοίρες (Βλέπετε Εικόνα 4-X), στη συνέχεια κάνουμε κλικ στο κουμπί *New Row* και προσθέτουμε τα παρακάτω στη στήλη ονομάτων, τέλος κάνοντας δεξί κλικ στα καινούργια αυτά στοιχεία του πίνακα επιλέγουμε *Display* και στο παράθυρο που εμφανίζεται διαλέγουμε την επιλογή *Display Name and Value* ώστε να εμφανίζονται στο σχηματικό διάγραμμα.

- |             |               |          |
|-------------|---------------|----------|
| • V_DC      | • Pulse_Width | • Lo     |
| • Frequency | • Lp          | • Co     |
| • Period    | • Ls          | • Cres   |
| • D         | • V_pulse     | • R_load |



## Κεφάλαιο 4 Προσομοίωση του μετατροπέα Forward με το Pspice.



Εικόνα 4-5 Περιστροφή του μενού των στοιχείων.

#### 4.1.2 - Υπολογίζοντας τα απαραίτητα στοιχεία

Τώρα πρέπει να υπολογιστούν οι τιμές των παραπάνω στοιχείων με βάση τους τύπους που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2. Καταρχάς διαλέγουμε τάση πηγής με τιμή 10 Volt, συχνότητα κυκλώματος 100 kHz, χρόνο αγωγής 40%, περιελίξεις πρωτεύοντος και δευτερεύοντος 10 (χάριν απλότητας των εξισώσεων) άνω τάση πηγής τετραγωνικών παλμών 2 Volt (διότι ο διακόπτης Sbreak κλίνει όταν η τάση στους ακροδέκτες υπ'αριθμόν 1 και 2 γίνει ίση ή μεγαλύτερη αυτής της τιμής). Αυτό μπορούμε να το δούμε στο παράθυρο Pspice Model Editor κάνοντας δεξί κλικ στο διακόπτη και επιλέγοντας Edit Pspice Model). Επίσης διαλέγουμε κυμάτωση τάσης εξόδου 0,5 Volt, κυμάτωση ρεύματος 0,5 Ampere και αντίσταση φορτίου 2 Ohm. Με βάση τα παραπάνω υπολογίζονται η τιμές των υπολοίπων στοιχείων παρακάτω.

Έχουμε

$$V_o = \frac{V_{\text{source}} * D}{\alpha} \Rightarrow V_o = \frac{10 * 0,4}{1} \Rightarrow V_o = 4 \text{ V}$$

Για την κυμάτωση του ρεύματος έχουμε

$$\Delta i_{L_o} = \frac{V_o(1 - D)}{f_s L_o} \Rightarrow L_o = \frac{V_o(1 - D)}{f_s \Delta i_{L_o}}$$

Κάνοντας αντικατάσταση παίρνουμε

$$L_o = \frac{4 \text{ V} * (1 - 0,4)}{100 \text{ kHz} * 0,5 \text{ Amp}} \Rightarrow L_o = 48 \mu\text{H}$$

Κεφάλαιο 4 Προσομοίωση του μετατροπέα Forward με το Pspice.

Για την κυμάτωση της τάσης έχουμε

$$\Delta v_r \approx \frac{V_o(1-D)}{8f_s^2 LC} \Rightarrow C \approx \frac{V_o(1-D)}{8f_s^2 L \Delta v_r}$$

Κάνοντας αντικατάσταση παίρνουμε

$$C \approx \frac{4 V * (1 - 0,4)}{8 * (100 kHz)^2 * 48 * 10^{-6} H * 0,5 V} \Rightarrow C = 1,25 \mu F$$

Ο πυκνωτής συντονισμού υπολογίζεται από την

$$C_R = C_{D_{for}} \left( \frac{N_s}{N_p} \right)^2 + C_{Switch} + C_{Transformer}$$

Όπου  $C_{D_{for}}$  η εσωτερική χωρητικότητα της διόδου  $D_{for}$ ,  $C_S$  το σύνολο της εξωτερικής και εσωτερικής χωρητικότητας του διακόπτη ( $C_{Sw\_internal} + C_{res}$ ), και  $C_T$  η παρασιτική χωρητικότητα του  $M/\Sigma$ . Από το Pspice Model Editor μενού βλέπουμε ότι ο διακόπτης έχει μηδενική τιμή εσωτερικής χωρητικότητας ενώ οι δυο διόδοι έχουν  $1 pF$ . Από της δυο διόδους η μια μόνο χρησιμεύει στην δημιουργία της  $C_R$ . Επίσης η εσωτερική χωρητικότητα του μετασχηματιστή θεωρείται μηδενική.

Για να υπολογίσουμε την απαραίτητη εξωτερική χωρητικότητα του διακόπτη πρέπει πρώτα να υπολογίσουμε την επαγωγή μαγνήτισης του μετασχηματιστή. Από το Pspice Model Editor μενού βλέπουμε ότι ο μετασχηματιστής δεν έχει κάποιο διάκενο. Για να αποφύγουμε πιθανή λειτουργία στον κόρο προσθέτουμε ένα διάκενο  $580 \mu m$ . Αυτό το επιτυγχάνουμε μέσω του Pspice Model Editor του πυρήνα E30\_17\_5\_3F3 γράφοντας «+GAP =0.058» (η μονάδες είναι cm από το Pspice). Από το Datasheet της Ferroxcube για τον εν λόγω πυρήνα βλέπουμε ότι ο πυρήνας έχει ενεργή μαγνητική διαπερατότητα  $\mu_{ev} \approx 142$  για το συγκεκριμένο διάκενο και παράγοντα επαγωγής  $A_L$  (το αντίστροφο της μαγνητικής αντίστασης. Ορίζει τα nanoHenry ανά περιέλιξη)  $160 nH/turn^2$ . Επομένως με 10 περιελίξεις ο μετασχηματιστής θα έχει επαγωγή μαγνήτισης με τιμή

$$L_m = N^2 * A_L \Rightarrow L_m = 10^2 \text{ turns}^2 * 160 \frac{nH}{\text{turns}^2} \Rightarrow \\ \Rightarrow L_m = 16 * 10^{-6} H$$

Με αυτή την τιμή επαγωγής μαγνήτισης έχουμε μια κυμάτωση ρεύματος μαγνήτισης με τιμή

$$\Delta i_{L_m} = \frac{V_{source} D}{f_s L_m} = \frac{10 V * 0.4}{100^2 kHz * 16 * 10^{-6} H} \Rightarrow \\ \Rightarrow \Delta i_{L_m} = 2.5 A$$

Με ακραίες τιμές ρεύματος μαγνήτισης

$$i_1 = -1.25 A, \quad i_2 = 1.25 A$$

Κεφάλαιο 4 Προσομοίωση του μετατροπέα Forward με το Pspice.

Επιστρέφοντας στην εξωτερική χωρητικότητα που τοποθετείτε στο διακόπτη τώρα που υπολογίστηκε η τιμή της επαγωγής μαγνήτισης, από τον τύπο

$$T_{res} = 2\pi\sqrt{L_m C_R}$$

και δεδομένου ότι θέλουμε μόνο μια ημιπερίοδο στη συχνότητα συντονισμού κατά το χρονικό διάστημα αποκοπής του διακόπτη

$$t_{off} \geq \frac{T_{res}}{2} \Leftrightarrow t_{off} \geq \pi\sqrt{L_m C_R}$$

Επομένως

$$\begin{aligned} t_{off} &= \pi\sqrt{L_m C_R} \Rightarrow t_{off}^2 = \pi^2 \sqrt{L_m C_R}^2 \Rightarrow C_R = \frac{t_{off}^2}{\pi^2 L_m} \\ \Rightarrow C_{D_{for}} \left(\frac{N_s}{N_p}\right)^2 + (C_{Sw\_internal} + C_{res}) + C_{Transformer} &= \frac{t_{off}^2}{\pi^2 L_m} \Rightarrow \\ \Rightarrow C_{res} &= \frac{t_{off}^2}{\pi^2 L_m} - C_{D_{for}} \left(\frac{N_s}{N_p}\right)^2 - C_{Sw\_internal} - C_{Transformer} \Rightarrow \\ \Rightarrow C_{res} &= \frac{16 * 10^{-12} \text{ sec}}{3,14^2 * 16 * 10^{-6} \text{ H}} - 10^{-12} \text{ F} * \left(\frac{1}{1}\right)^2 - 10^{-12} \text{ F} - 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow C_{res} &= 101 * 10^{-9} \text{ F} \end{aligned}$$

Τέλος θέτουμε τιμή στην αντίσταση εξόδου 2 Ohm έτσι ώστε να πάρουμε ρεύμα εξόδου

$$\begin{aligned} I_{out} &= \frac{V_{out}}{R_{Load}} \Rightarrow I_{out} = \frac{4 \text{ V}}{2 \text{ Ohm}} \Rightarrow \\ \Rightarrow I_{out} &= 2 \text{ A} \end{aligned}$$

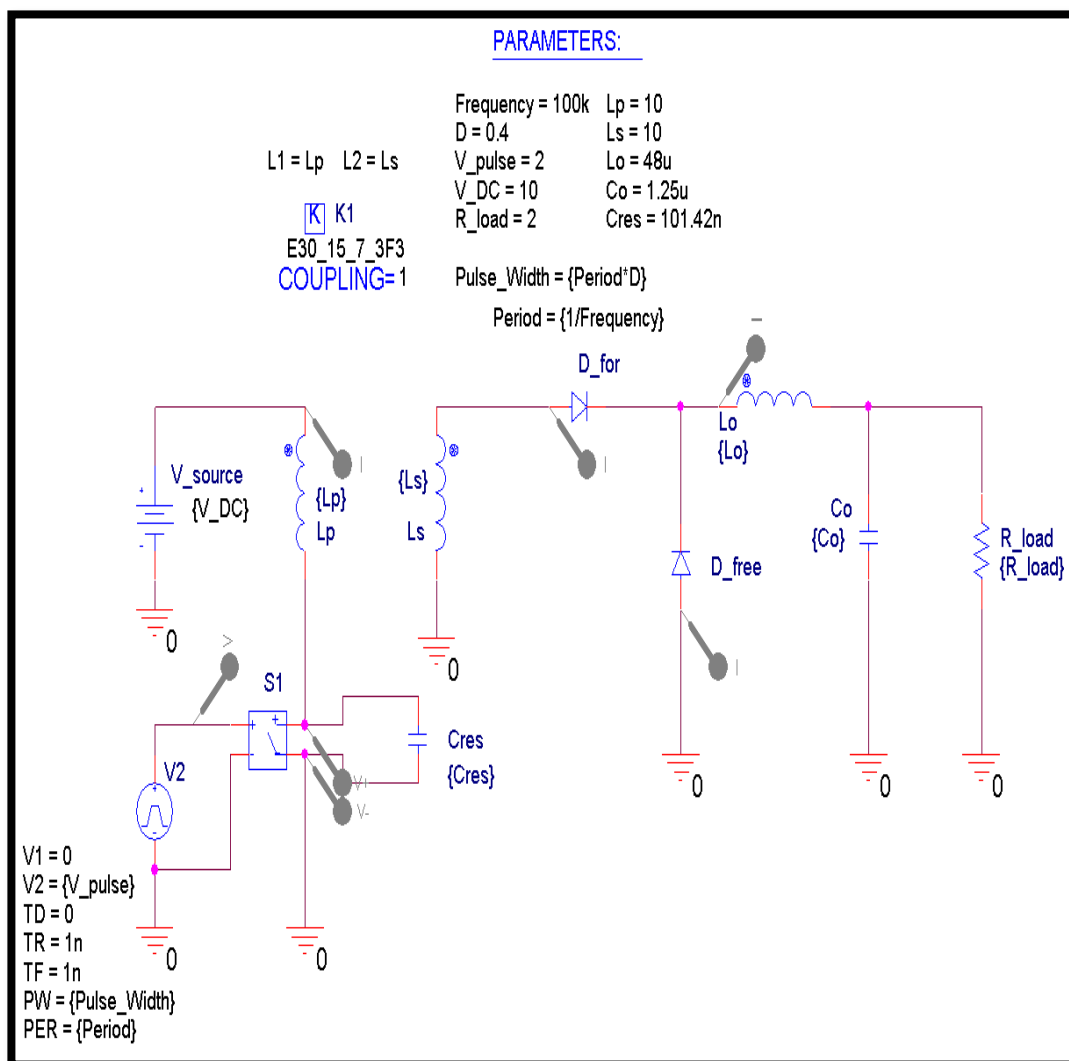
Έχοντας πλέον υπολογίσει όλες της παραμέτρους επιστρέφουμε στο Schematic και κάνουμε διπλό κλικ και δίνουμε της κατάλληλες τιμές σε όλα τα πεδία που προστέθηκαν στο block PARAM

- V\_DC = 2 V
- Frequency = 100 kHz
- Period = {1/Frequency}
- D = 0.4
- Pulse\_Width = {Period\*D}
- Lp = 10
- Ls = 10
- V\_pulse = 2 V
- Lo = 48 uH
- Co = 1.25 uF
- Cres = 101.42 nF
- R\_load = 2 Ohm

## Κεφάλαιο 4 Προσομοίωση του μετατροπέα Forward με το Pspice.

Προτού ξεκινήσουμε την προσομοίωση κάνουμε διπλό κλικ στις τιμές των στοιχείων στο σχηματικό διάγραμμα και γράφουμε εγκλεισμένα σε αγκύλες τα ονόματα των ανάλογων πεδίων από το PARAM block όπως φαίνεται παρακάτω

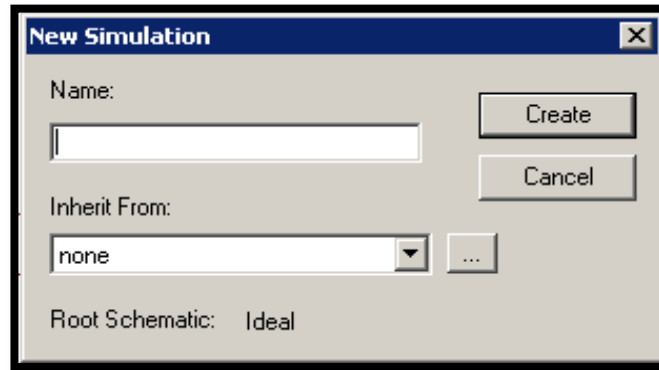
- $L_p$  value =  $\{L_p\}$
- $L_s$  value =  $\{L_s\}$
- $L_o$  value =  $\{L_o\}$
- $C_o$  value =  $\{C_o\}$
- $C_{res}$  value =  $\{C_{res}\}$
- **Frequency** value =  $\{Frequency\}$
- $V_{source}$  value =  $\{V_{DC}\}$
- $R_{load}$  value =  $\{R_{load}\}$
- $V1$  value = 0
- $V2$  value =  $\{V_{pulse}\}$
- $TD$  value = 0
- $TR$  value = 1n
- $TF$  value = 1n
- $PW$  value =  $\{Pulse\_Width\}$
- $PER$  value =  $\{Period\}$



Εικόνα 4-6 Τελική μορφή σχηματικού διαγράμματος. Στην εικόνα φαίνονται τα διάφορα probes που τοποθετήθηκαν για την εμφάνιση των κυματομορφών. ΠΡΟΣΟΧΗ! α) Τα probes ρεύματος τοποθετούνται με βάση τη φορά του ηλεκτρικού ρεύματος (συμβατική φορά) στο σημείο όπου το ρεύμα εισέρχεται στο στοιχείο, β) Ομοίως όταν χρησιμοποιούνται τα διαφορικά probe τάσης το θετικό probe (πρώτο που τοποθετείται) πρέπει να τοποθετείτε στο σημείο θετικότερης τάσης. Σε αντίθετη περίπτωση το Pspice εμφανίζει αντίστροφη κυματομορφή (Π.Χ.:  $-I_{L_p}$  αντί  $I_{L_p}$ ).

### 4.1.3 - New Simulation Profile

Έχοντας πραγματοποιήσει όλα τα παραπάνω το μόνο που μένει είναι η δημιουργία ενός simulation profile. Κάνοντας δεξί κλικ στο συνώνυμο κουμπί (αριστερά από τα κουμπιά των probes)



Εικόνα 4-7 Παράθυρο New Simulation.

Στο αναδυόμενο παράθυρο δίνουμε όνομα simu1. Στο επόμενο παράθυρο στην πρώτη καρτέλα (Analysis) βάζουμε της παρακάτω επιλογές

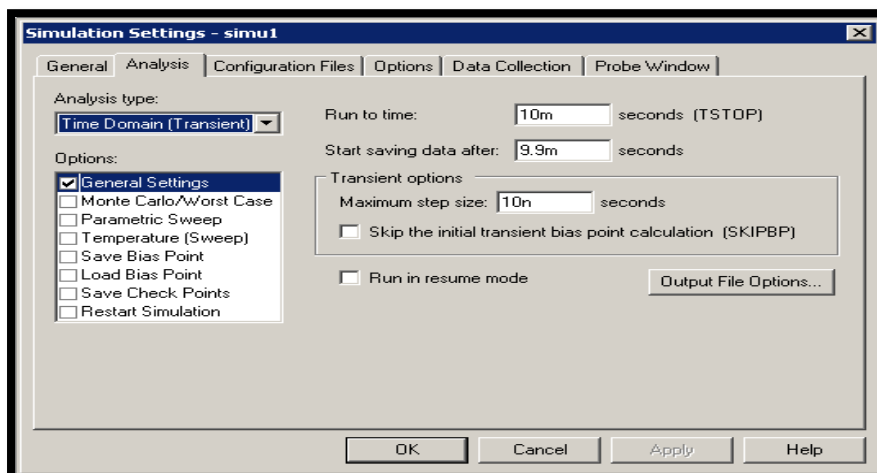
Analysis type → Time Domain (Transient)

Run to time → 10 mSec

Start saving data after → 9.9 mSec

Maximum step size → 10 nSec

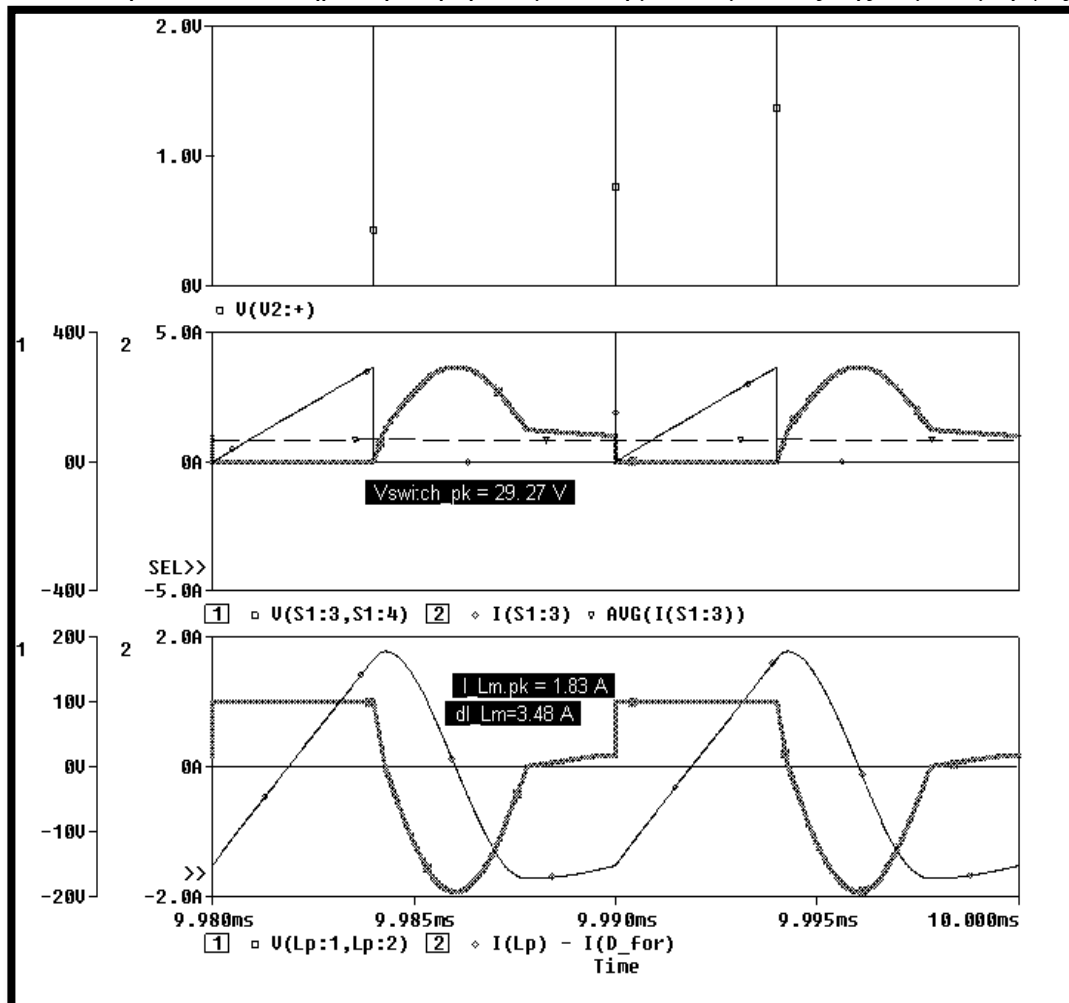
Έπειτα στην καρτέλα Options δεξί κλικ στο κουμπί Autoconverge και δεξί κλικ στην επιλογή Autoconverge στο παράθυρο Autoconverge Options και στην καρτέλα Probe Window δεξί κλικ στην επιλογή Nothing ώστε μετά από κάθε εξομοίωση να εμφανίζεται ένα κενό παράθυρο. Τέλος κλικ στο κουμπί Run Pspice και αναμονή μέχρι την ολοκλήρωση της προσομοίωσης.



Εικόνα 4-8 Παράθυρο Simulation Settings με συμπληρωμένα τα απαραίτητα πεδία.

#### 4.1.4 - Κυματομορφές

Τώρα που ολοκληρώθηκε η προσομοίωση μελετάμε όλες της κυματομορφές.



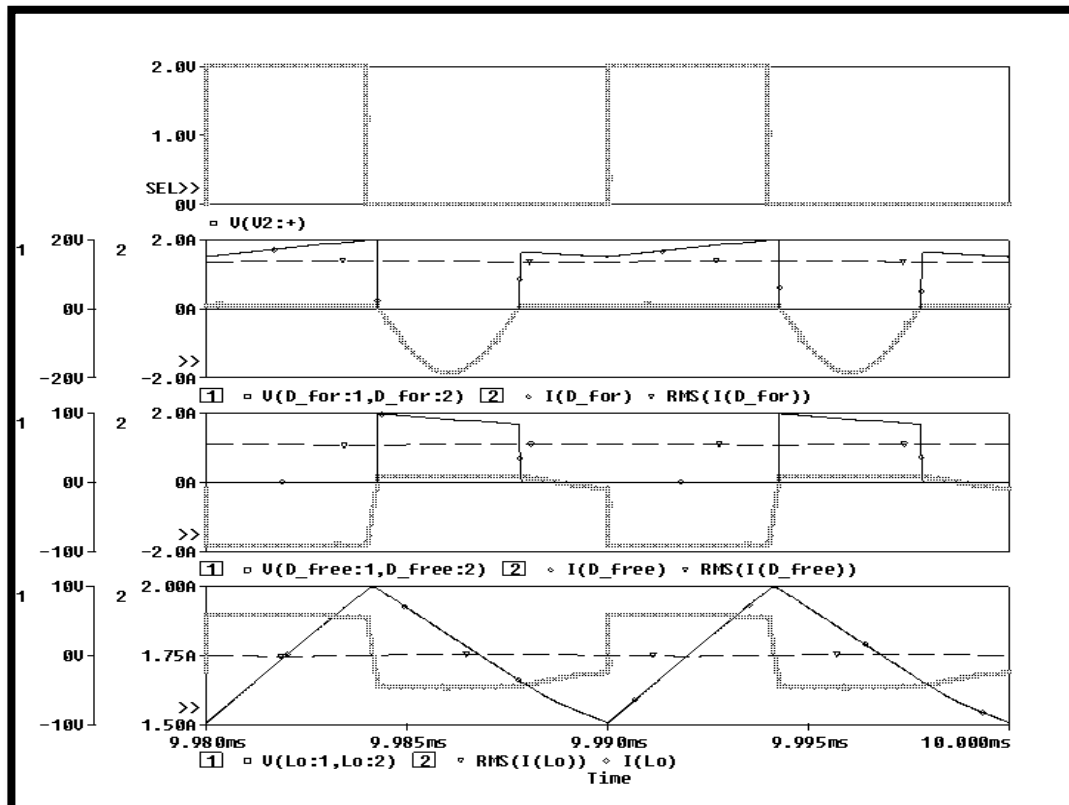
Εικόνα 4-9 Από πάνω προς τα κάτω. Κυματομορφές τάσης - ρεύματος πηγής τετραγωνικών παλμών, διακόπτη και πρωτεύοντος (= δευτερεύοντος). Επίσης φαίνεται η RMS τιμή του ρεύματος διακόπτη (διακεκομμένη). [Στη συγκεκριμένη εικόνα χρησιμοποιήθηκε η AVG() εντολή του Pspice επειδή το υπέρυμμα μου παρουσιάζεται στο ρεύμα διακόπτη δημιουργεί μια τεράστια απόκλιση μεταξύ των δυο τιμών (RMS και AVG) η οποία δεν θα έπρεπε να υπάρχει σε τέτοιο βαθμό]

Χρησιμοποιώντας από το Κεφάλαιο 2 την παρακάτω εξίσωση υπολογίζουμε την μέγιστη τιμή της τάσης Απαγωγού – Πηγής του διακόπτη.

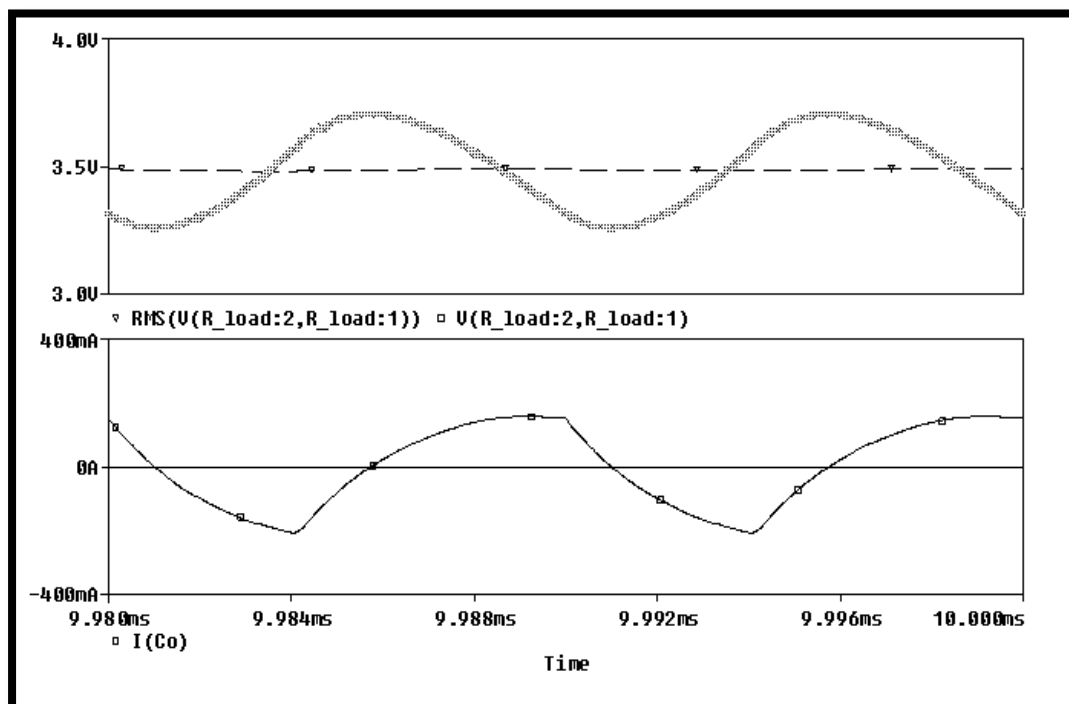
$$V_{DS} = V_{source} + I_2 \sqrt{\frac{L_m}{C_R}} \Rightarrow V_{DS} = 10 \text{ V} + 1.25 \text{ A} * \sqrt{\frac{16 * 10^{-6} \text{ H}}{101 * 10^{-9} \text{ F}}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{DS} = 25.74 \text{ V}$$

## Κεφάλαιο 4 Προσομοίωση του μετατροπέα Forward με το Pspice.



Εικόνα 4-10 Από πάνω προς τα κάτω. Κυματομορφές τάσης - ρεύματος πηγής τετραγωνικών παλμών, διόδου ορθής διέλευσης, ανάστροφης διέλευσης και πηνίου εξόδου. Επίσης φαίνονται οι RMS τιμές των ρευμάτων (διακεκομμένες).



Εικόνα 4-11 Από πάνω προς τα κάτω. Κυματομορφή τάσης εξόδου (RMS τιμή διακεκομμένη) και κυματομορφή ρεύματος πυκνωτή εξομάλυνσης τάσης εξόδου.

## 4.2 - Το Πραγματικό Κύκλωμα

Το πραγματικό κύκλωμα που θα αναλυθεί είναι ένας μετατροπέας RR Forward με τάση εισόδου 120 V, συχνότητα λειτουργίας 150 KHz και τάση εξόδου 15 V. Θα χρησιμοποιηθεί ένας μαγνητικός πυρήνας E30/15/7 3F3 της Ferroxcube, ένα mosfet ισχύος IRFP460 της International Rectifiers και δυο δίοδοι MUR1640CT της On Semiconductors.

Όπως στην προηγούμενη ενότητα έτσι και εδώ πρέπει πρώτα να υπολογιστούν κάποια στοιχεία του κυκλώματος όπως ο αριθμός περιελίξεων του μετασχηματιστή (σε σχέση φυσικά με την επιθυμητή τιμή της κυμάτωσης ρεύματος καθώς ο αριθμός περιελίξεων έχει άμεση σχέση με την τιμή της αυτεπαγωγής μαγνητικής). Καταρχάς οι υπολογισμοί θα πραγματοποιηθούν για διάφορες τιμές του λόγου αγωγής  $D$  και του λόγου μετασχηματισμού  $a$ .

### 4.2.1 - $D=20\%$

Για λόγο αγωγής 20% και με συχνότητα 150 kHz πρώτα θα υπολογιστούν οι χρόνοι  $t_{on}$  και  $t_{off}$

$$T_s = \frac{1}{f_s} \Rightarrow T_s = \frac{1}{150 * 10^3 \text{ Hz}} \Rightarrow T_s = 6.67 * 10^{-6} \text{ Sec}$$

$$T_{on} = \frac{D\%}{100\%} T_s \Rightarrow T_{on} = 0.2 * 6.67 * 10^{-6} \text{ Sec} \Rightarrow T_{on} = 1.33 * 10^{-6} \text{ Sec}$$

$$T_{off} = \left(1 - \frac{D\%}{100\%}\right) T_s \Rightarrow T_{off} = 0.8 * 6.67 * 10^{-6} \text{ Sec} \Rightarrow T_{off} = 5.33 * 10^{-6} \text{ Sec}$$

Στη συνέχεια ανοίξουμε το Magnetic Parts Editor πατάμε New και επιλέγουμε στο πρώτο βήμα Forward Transformer (Single Switch Topology) και μετά Next. Στη συνέχεια στο δεύτερο βήμα θέτουμε της προδιαγραφές εισόδου και εξόδου ως εξής :

- Αριθμός δευτερευόντων : 1
- Υλικό Μόνωσης : Myller 500
- Πυκνότητα ρεύματος : 4 A/μm<sup>2</sup>
- Απόδοση : 95%

Next για το τρίτο βήμα

Εδώ θέτουμε την τάση πρωτεύοντος 120 V, την RMS τάση και το RMS ρεύμα δευτερευόντος 15 V και 3,4 A αντίστοιχα όπως επίσης την συχνότητα λειτουργίας 150kHz, το πάχος του μονωτή 10m, το είδος παλμών Pulse. Το μέγιστο λόγο αγωγής 20% και αν θα υπαρχή τύλιγμα Reset (όχι καθώς κατασκευάζουμε έναν Resonant Reset Forward) Πατάμε Next για το βήμα 4.

Εδώ επιλέγουμε εταιρία κατασκευής Ferroxcube, είδος πυρήνα EE, Υλικό πυρήνα 3F3, μαγνητική επαγωγή  $B=180$  mTesla και utilization factor ως έχει. Πατάμε Propose part και επιλέγουμε τον πυρήνα E30\_7\_15. Next για το βήμα 5.

Θέτουμε τη διατομή του καλωδίου περιελίξεων πρωτεύοντος και δευτερευόντος 30 Gauge. Πατάμε Next και βλέπουμε τον παρακάτω πίνακα.



## Κεφάλαιο 4 Προσομοίωση του μετατροπέα Forward με το Pspice.

Input Parameters		Output Parameters				
<b>Electrical Specifications</b>		<b>Winding Parameters</b>		<b>Calculated Values</b>		
Primary Voltage (V)	120	Winding Name	P0	S0	Core Loss (Watts)	444.65541m
Secondary Voltage 1 (V)	15	Peak Current (A)	0.4473684210526	0.05882352941176	Achieved Efficiency (%)	98.65945
Power (Watts)	51	RMS Current (A)	1.61975561251	1.5205262247	Achieved Regulation (%)	
Frequency (Hz.)	150k	No. of Turns	19	12	Window Occupied (%)	13.6763953058
Efficiency (%)	95	Min. Inductance (H)	0.0005776		Temperature Rise (C)	25.31616
Duty Cycle (%)	20	Wire Gauge*	30	30	Total Buildup (mm)	4.48500
Component Type	Forward Transformer-Single	Turns.Layer	7	8	Total Copper Loss (Watts)	248.31667m
		No of layer	3	2	AC Flux Density (Tesla)	98.71485m
Design Status	Success	Inter layer Insulation (mm)*	1	1		
		End Insulation (mm)*	1	1		
		Winding Buildup (mm)	2.885	1.59		
Core Details		Winding resistance (Ohm)	0.04950147471193	0.05123018827964		
Vendor Name	Ferrocube	Copper Loss (Watts)	0.1298724771572	0.1184441953025		
Part Number	E30_15_7	Leakage Inductance (H)	2.172274250905e-006			
Core Type	EE	Voltage Drop (V)	0.08018029149218	0.0778968447755		
Core Material	3F3					
Bobbin Part Number	NO_NAME					
GAP (mm)						
Voltage Isolation (mm)*	10m	No. Of Strands*	6	5		
Operating Flux Density (Tesla)*	0.18	Foil Thickness (mm)				
Current Density (A/mm2)*	4	Foil Width (mm)				
Insulation Material*	MYLER					
Wire Type	AWG					

Εικόνα 4-12 Αποτελέσματα Magnetics Part Editor για D=20%.

Τώρα πρέπει να υπολογιστεί η εξωτερική χωρητικότητα που προστίθεται στον διακόπτη. Στα Datasheet των στοιχείων του κυκλώματος βρίσκουμε της εσωτερικές χωρητικότητες οι οποίες δίνονται μαζί με τα υπόλοιπα ονομαστικά στοιχεία στους παρακάτω πίνακες.

Στοιχείο	Μοντέλο / Εταιρία	Μέγιστη Ανάστροφη Τάση (Volt)	Μέγιστο Ορθό Ρεύμα (Amp)	Χρόνος Αγωγής (nSec)		Χρόνος Αποκοπής (nSec)		Αντίσταση σε κατάσταση αγωγμότητας (Ohm)	Εσωτερική χωρητικότητα (pF)
				T <sub>on_delay</sub>	18	T <sub>off_delay</sub>	110		
Power Mosfet	IRFP460 της International Rectifiers	500	20	T <sub>rise</sub>	59	T <sub>fall</sub>	58	0.27	870
Power Diode	MUR1640 CT της On Semiconductors	100	16	Maximum reverse recovery time		60		0.048	~180

Με βάση τα παραπάνω και θεωρώντας την εσωτερική χωρητικότητα του μετασχηματιστή μηδέν προκύπτει

$$C_{res} = \frac{t_{off}^2}{\pi^2 L_m} - C_{D_{for}} \left( \frac{N_s}{N_p} \right)^2 - C_{Sw\_internal} - C_{Transformer}$$

Με μοναδικό άγνωστο την αυτεπαγωγή μαγνήτισης  $L_m$  καθώς τα  $C_{D_{for}}$ ,  $C_{Sw\_internal}$  και  $C_{Transformer}$  είναι παρασιτικά στοιχεία των εξαρτημάτων του κυκλώματος (επομένως αφαιρώντας το πρώτο μέρος της εξίσωσης μπορούμε να

Κεφάλαιο 4 Προσομοίωση του μετατροπέα Forward με το Pspice.

ορίσουμε ως συνολική εσωτερική χωρητικότητα του κυκλώματος  $C_{\text{εσωτερικό}} = -C_{D_{\text{for}}} \left(\frac{N_s}{N_p}\right)^2 - C_{S_{\text{w\_internal}}} - C_{\text{Transformer}}$ . Θέτουμε κυμάτωση ρεύματος μαγνήτισης  $\Delta i_{L_m} = 1 \text{ A}$  και υπολογίζουμε την απαραίτητη αυτεπαγωγή.

$$\Delta i_{L_m} = \frac{V_{\text{source}} D}{f_s L_m} \Rightarrow L_m = \frac{V_{\text{source}} D}{f_s \Delta i_{L_m}} \Rightarrow L_m = \frac{120 * 0.2}{150 * 10^3 * 1} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow L_m = 160 * 10^{-6} \text{ H}$$

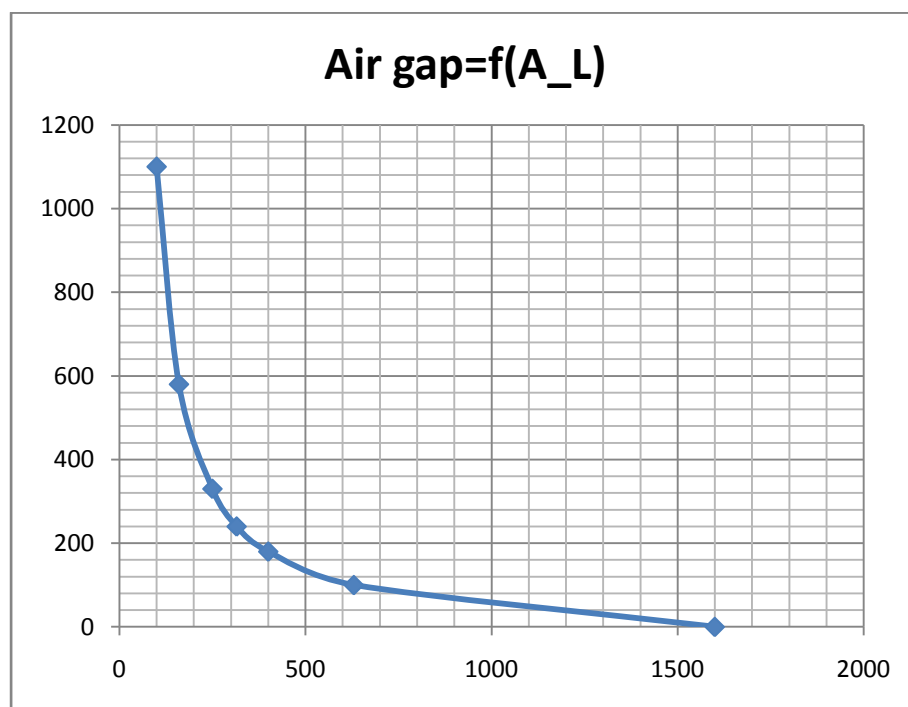
Και αντικαθιστώντας

$$C_{\text{res}} = \frac{(5,33 * 10^{-6} \text{ Sec})^2}{\pi^2 * 160 * 10^{-6} \text{ H}} - 870 * 10^{-12} \text{ F} - 180 * 10^{-12} \text{ F} * \left(\frac{12}{19}\right)^2 - 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C_{\text{res}} = 17990 * 10^{-12} - 941 * 10^{-12} \Rightarrow C_{\text{res}} = 17191 * 10^{-12} \text{ F}$$

Magnetic Core E30/15/7 3F3 της Ferroxcube		
Μαγνητική Διαπερατότητα $\mu_e$	Παράγοντας Επαγωγής $A_L$ (nH)	Διάκενο (μm)
1420	1600	0
560	630	100
355	400	180
280	315	240
222	250	330
142	160	580
89	100	1100

Από τον παραπάνω πίνακα κατασκευάζουμε ένα γράφημα που να δείχνει τη μαγνητική διαπερατότητα και το διάκενο σε σχέση με τον παράγοντα επαγωγής.



Εικόνα 4-13 Γραφική παράσταση Διάκενου- παράγοντα επαγωγής.

Κεφάλαιο 4 Προσομοίωση του μετατροπέα Forward με το Pspice.

Από την επιθυμητή τιμή της αυτεπαγωγής και τον αριθμό περιελίξεων πρωτεύοντος υπολογίζουμε τον παράγοντα επαγωγής.

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} \Rightarrow A_L = \frac{L}{N^2} \Rightarrow A_L = \frac{160 * 10^{-6} \text{ H}}{19^2 \text{ turns}^2} \Rightarrow A_L = 443.2 * 10^{-9} \frac{\text{H}}{\text{turns}^2}$$

Τώρα έχοντας το παραπάνω γράφημα (η μονάδες στο άξονα x,x' είναι nH/turn<sup>2</sup> ενώ στον άξονα y,y' είναι μm) βρίσκουμε το απαραίτητο διάκενο που θα χρειαστεί ο πυρήνας από τη τιμή του παράγοντα επαγωγής.

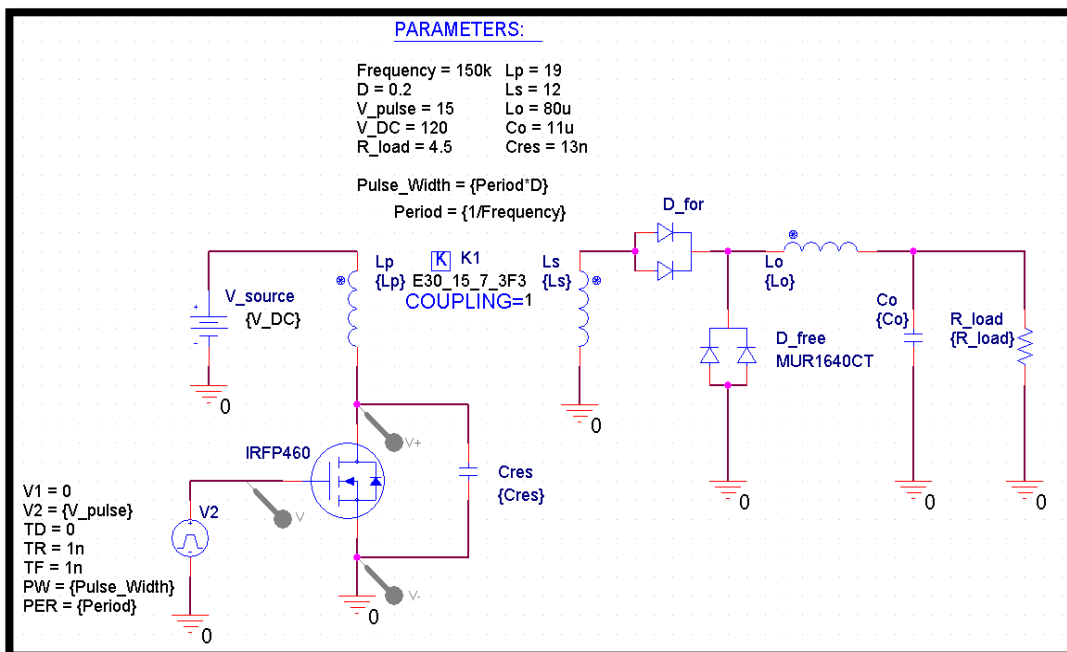
$$\text{Air Gap} \cong 160 \mu\text{m}$$

Τώρα υπολογίζουμε της απαραίτητες τιμές του πηνίου και του πυκνωτή εξόδου για κυμάτωση τάσης και ρεύματος 0,1 V και 1 Amp αντίστοιχα.

$$\Delta i_{L_o} = \frac{V_o(1-D)}{f_s L_o} \Rightarrow L_o = \frac{V_o(1-D)}{f_s \Delta i_{L_o}} \Rightarrow L_o = \frac{15 \text{ V} * (1-0,2)}{150 * 10^3 \text{ Hz} * 0,2 \text{ A}} \Rightarrow L_o = 80 * 10^{-6} \text{ H}$$

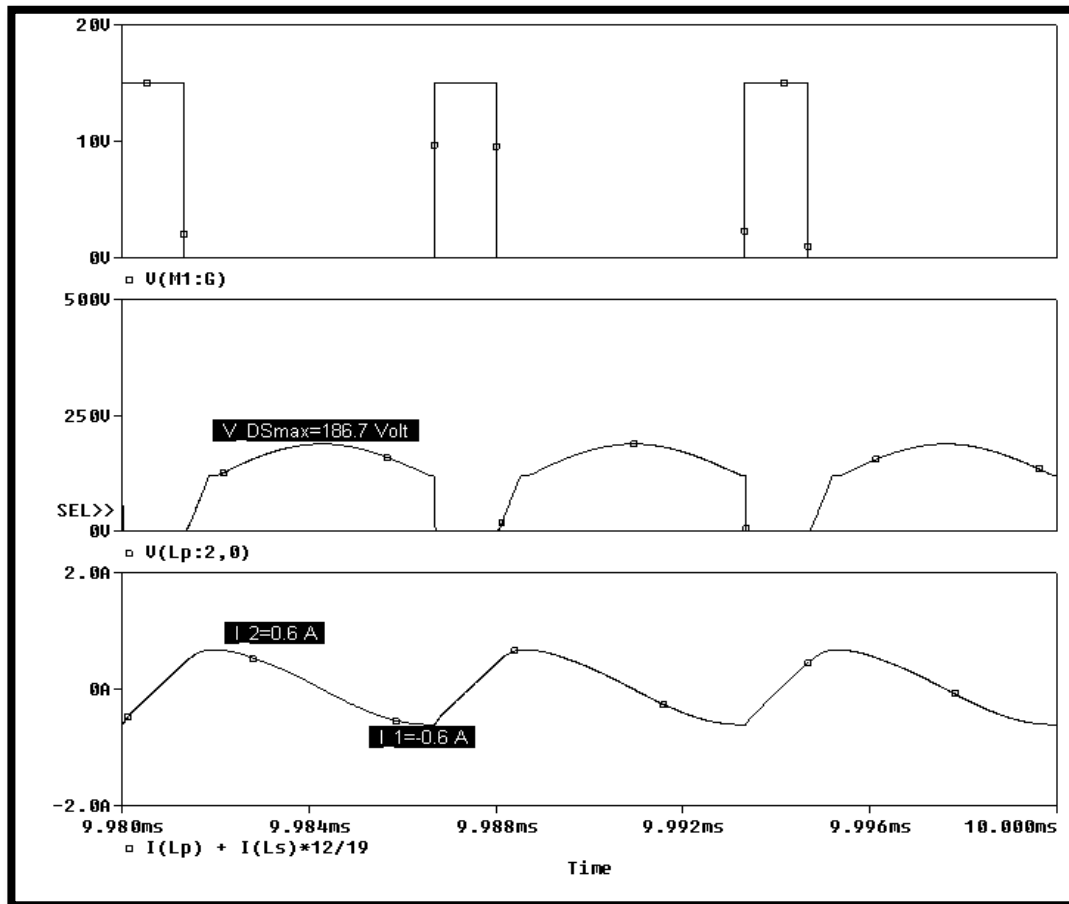
$$\Delta v_r \approx \frac{V_o(1-D)}{8f_s^2 LC} \Rightarrow C \approx \frac{V_o(1-D)}{8f_s^2 L \Delta v_r} \Rightarrow C \approx \frac{15 * (1-0,2)}{8 * (150 * 10^3)^2 * 80 * 10^{-6} * 0,1} \Rightarrow C \approx 11,11 * 10^{-6} \text{ F}$$

Τέλος περνάμε όλες της παραπάνω τιμές στο σχηματικό διάγραμμα, δημιουργούμε ένα καινούργιο Simulation Profile όπως έγινε στην προηγούμενη ενότητα και τρέχουμε την προσομοίωση.



Εικόνα 4-14 Κύκλωμα RR Forward πριν την εκκίνηση της προσομοίωσης με συμπληρωμένες όλες της απαραίτητες τιμές D=20%.

## Κεφάλαιο 4 Προσομοίωση του μετατροπέα Forward με το Pspice.



Εικόνα 4-15 Κυματομορφές (από πάνω προς τα κάτω) Πηγής τετραγωνικών παλμών, Διακόπτη και ρεύματος μαγνήτισης για D=20%.

Οι δυο ακραίες τιμές του ρεύματος μαγνήτισης.

$$I_1 = -\frac{V_{\text{source}} T_{\text{on}}}{2L_M} \Rightarrow I_1 = -\frac{120 \text{ V} * 1.33 * 10^{-6} \text{ Sec}}{2 * 160 * 10^{-6} \text{ H}} \Rightarrow \begin{cases} I_1 = -0.5 \text{ A} \\ I_2 = +0.5 \text{ A} \end{cases}$$

Η μέγιστη ανάστροφη τάση του διακόπτη υπολογίζεται με βάση την χωρητικότητα που τοποθετήθηκε από την παρακάτω σχέση (όπως φαίνεται στο παραπάνω κύκλωμα τοποθετήθηκε  $C_{res}$  μικρότερη από αυτή που υπολογίστηκε. Αυτό γίνεται για δυο λόγους  $1^{ov}$  η παρασιτική χωρητικότητα του μετασχηματιστή δεν είναι μηδέν όπως θεωρήθηκε αρχικά και  $2^{ov}$  για να είμαστε σίγουροι ότι ο χρόνος απομαγνήτισης θα είναι μικρότερος του χρόνου αποκοπής).

$$C_{R_{\text{eff}}} = C_{res_{\text{used}}} + C_{\text{εσωτερικο}} \Rightarrow C_{R_{\text{eff}}} = 13 * 10^{-9} + 941 * 10^{-12} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C_{R_{\text{eff}}} = 13,9 * 10^{-9}$$

$$V_{DS_{\text{MAX}}} = V_{\text{source}} + I_2 \sqrt{\frac{L_m}{C_{R_{\text{eff}}}}} \xrightarrow{I_2 = \delta i_{L_m} / 2} V_{DS_{\text{MAX}}} = 120 \text{ V} + 0,5 \text{ A} * \sqrt{\frac{160 * 10^{-6} \text{ H}}{13,9 * 10^{-9} \text{ F}}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{DS_{\text{MAX}}} = 173,56 \text{ V}$$

Ανάλυση και κατασκευή διακοπτικού μετατροπέα Forward με την τεχνική Resonant Reset. Κολλάρος Ματθαίος – Νικόλαος.

Κεφάλαιο 4 Προσομοίωση του μετατροπέα Forward με το Pspice.

#### 4.2.2 - D=30%

Για λόγο αγωγής 30% επαναλαμβάνεται η προηγούμενη διαδικασία.

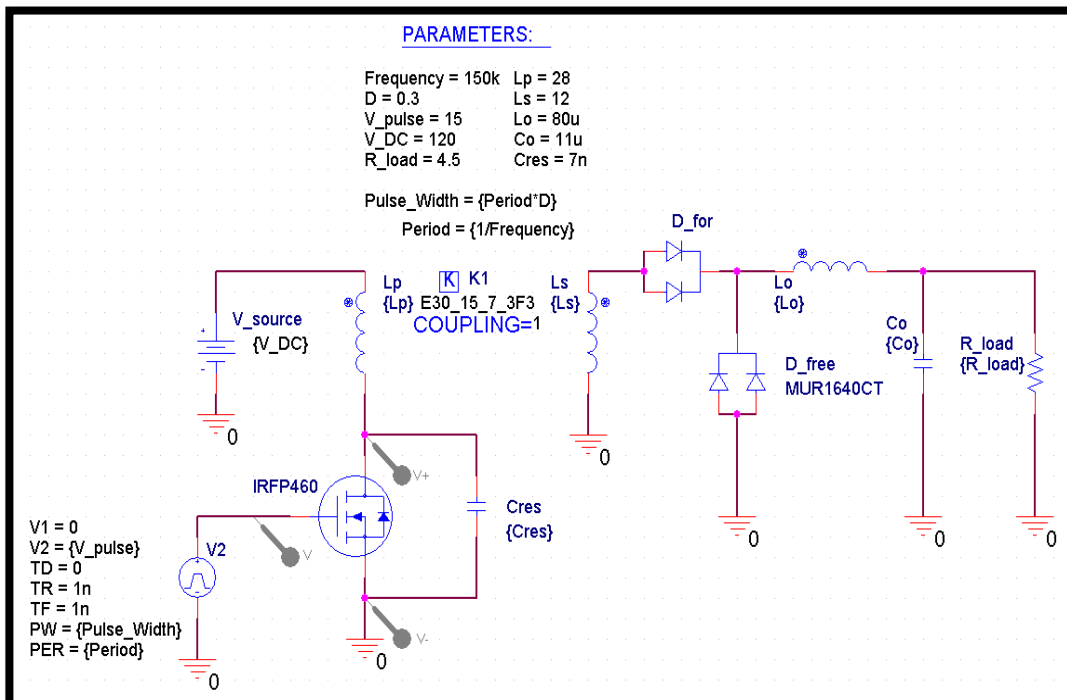
$$T_s = 6.67 * 10^{-6} \text{ Sec}, \quad T_{on} = 2 * 10^{-6} \text{ Sec}, \quad T_{off} = 4.67 * 10^{-6} \text{ Sec}$$

$$C_{res} = 8.3 * 10^{-9} \text{ F}, \quad C_{res\_used} = 7 * 10^{-9} \text{ F}, \quad C_{R\_eff} = 7,9 * 10^{-9} \text{ F}$$

$$L_m = 240 * 10^{-6} \text{ H}, \quad A_L = 306 * 10^{-9} \frac{\text{H}}{\text{turns}^2}, \quad \text{Air Gap} \cong 260 \mu\text{m}$$

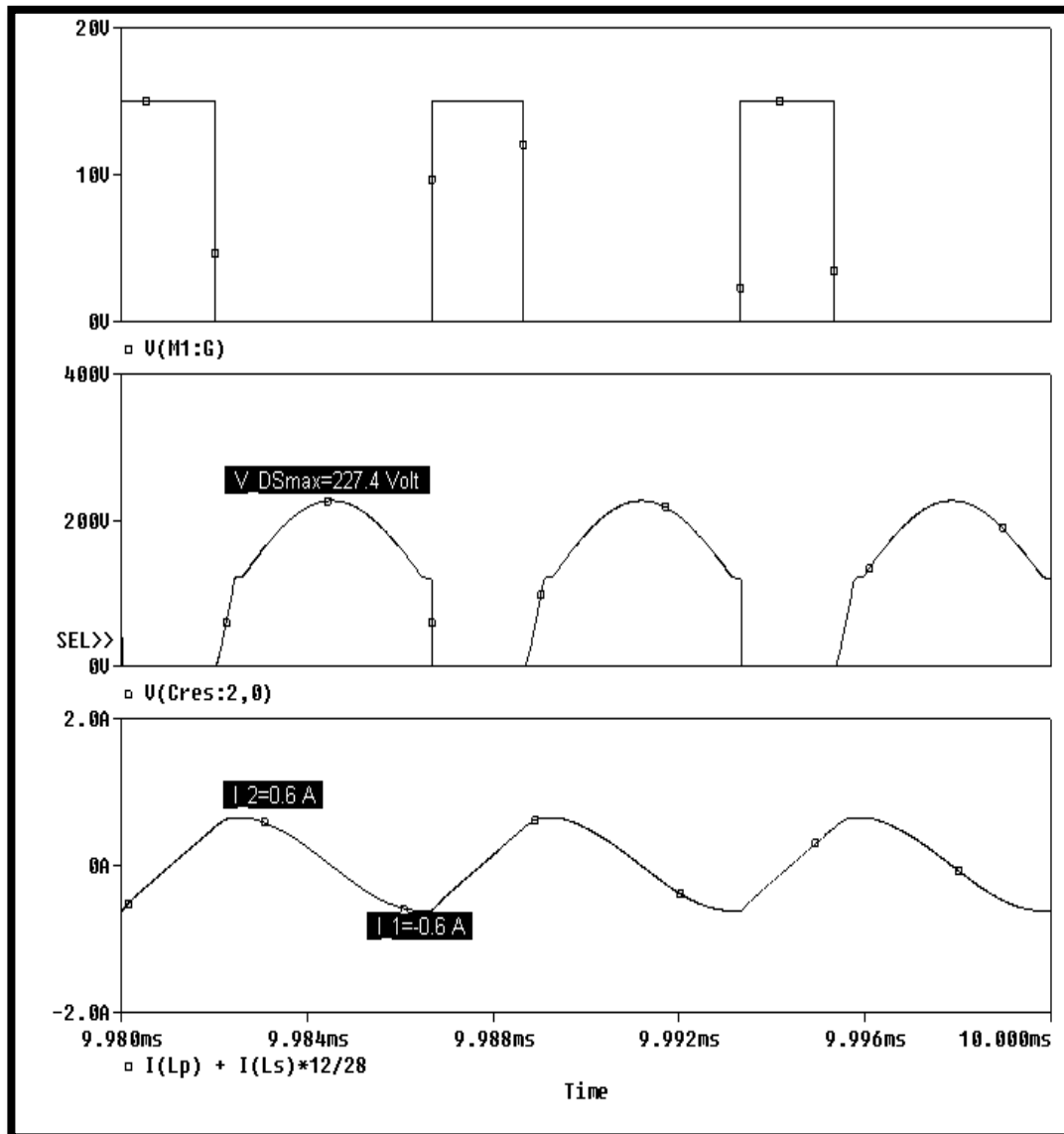
Input Parameters		Output Parameters				
<b>Electrical Specifications</b>		<b>Winding Parameters</b>		<b>Calculated Values</b>		
Primary Voltage (V)	120	Winding Name	P0	S0	Core Loss (Watts)	461.59188m
Secondary Voltage 1 (V)	15	Peak Current (A)	0.4473684210526	0.08823529411765	Achieved Efficiency (%)	98.53543
Power (Watts)	51	RMS Current (A)	1.166092107972	1.862256695518	Achieved Regulation (%)	
Frequency (Hz.)	150k	No. of Turns	28	12	Window Occupied (%)	15.34361660792
Efficiency (%)	95	Min. Inductance (H)	0.0012544		Temperature Rise (C)	27.26389
Duty Cycle (%)	30	Wire Gauge <sup>1</sup>	30	30	Total Buildup (mm)	4.48500
Component Type	Forward Transformer-Single	Turns/Layer	11	7	Total Copper Loss (Watts)	296.43842m
		No of layer	3	2	AC Flux Density (Tesla)	100.47761m
Design Status	Success	Inter layer Insulation (mm) <sup>1</sup>	1	1		
		End Insulation (mm) <sup>1</sup>	1	1		
<b>Core Details</b>		Winding Buildup (mm)	2.885	1.59		
Vendor Name	Ferroxcube	Winding resistance (Ohm)	0.1076728729514	0.0432606671873		
Part Number	E30_15_7	Copper Loss (Watts)	0.1464104290516	0.1500279938055		
Core Type	EE	Leakage Inductance (H)	4.717626073988e-006			
Core Material	3F3	Voltage Drop (V)	0.1255564873913	0.0805624671221		
Bobbin Part Number	NO_NAME					
GAP (mm)						
Voltage Isolation (mm) <sup>1</sup>	10m	No. Of Strands <sup>1</sup>	4	6		
Operating Flux Density (Tesla) <sup>1</sup>	0.18	Foil Thickness (mm)				
Current Density (A/mm2) <sup>1</sup>	4	Foil Width (mm)				
Insulation Material <sup>1</sup>	MYLER					
Wire Type	AWG					

Εικόνα 4-16 Αποτελέσματα Magnetics Part Editor για D=30%.



Εικόνα 4-17 Κύκλωμα RR Forward πριν την εκκίνηση της προσομοίωσης με συμπληρωμένες όλες της απαραίτητες τιμές D=30%.

Ανάλυση και κατασκευή διακοπτικού μετατροπέα Forward με την τεχνική Resonant Reset. Κολλάρος Ματθαίος – Νικόλαος.



Εικόνα 4-18 Κυματομορφές (από πάνω προς τα κάτω) Πηγής τετραγωνικών παλμών, Διακόπτη και ρεύματος μαγνήτισης για  $D=30\%$ .

Οι δυο ακραίες τιμές του ρεύματος μαγνήτισης.

$$I_1 = -0.5 \text{ A}, \quad I_2 = 0.5 \text{ A}$$

Και η μέγιστη ανάστροφη τάση του διακόπτη

$$V_{DS\_MAX} = 207,1 \text{ V}$$

Κεφάλαιο 4 Προσομοίωση του μετατροπέα Forward με το Pspice.

### 4.2.3 - D=40%

Για λόγο αγωγής 40% επαναλαμβάνεται η προηγούμενη διαδικασία.

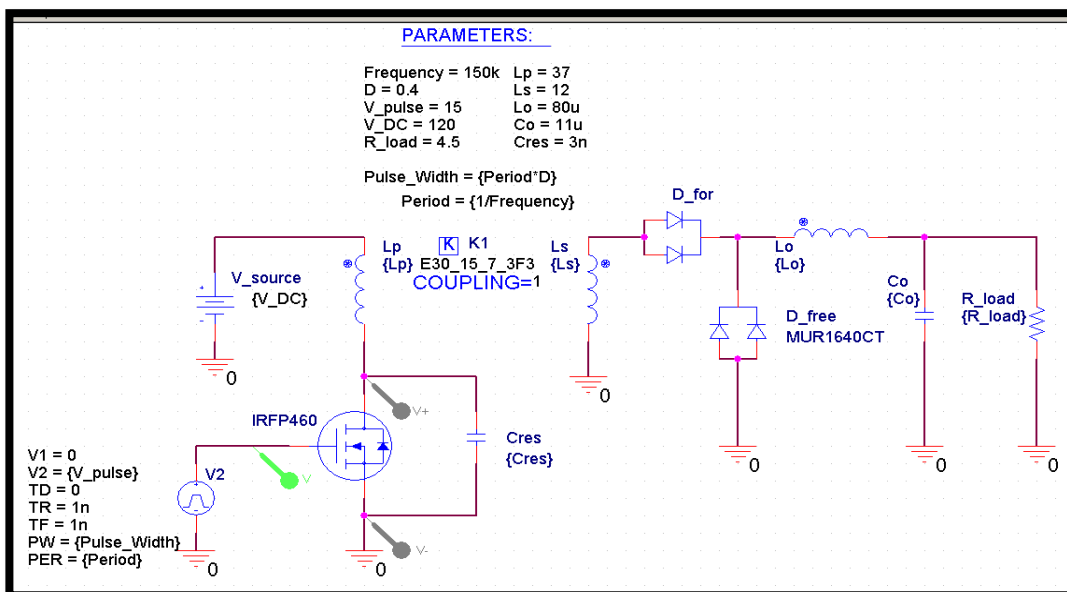
$$T_s = 6.67 * 10^{-6} \text{ Sec}, \quad T_{on} = 2,67 * 10^{-6} \text{ Sec}, \quad T_{off} = 4 * 10^{-6} \text{ Sec}$$

$$C_{res} = 4,1 * 10^{-9} \text{ F}, \quad C_{res\_used} = 4 * 10^{-9} \text{ F}, \quad C_{R\_eff} = 4,9 * 10^{-9} \text{ F}$$

$$L_m = 320 * 10^{-6} \text{ H}, \quad A_L = 233 * 10^{-9} \frac{\text{H}}{\text{turns}^2}, \quad \text{Air Gap} \cong 360 \mu\text{m}$$

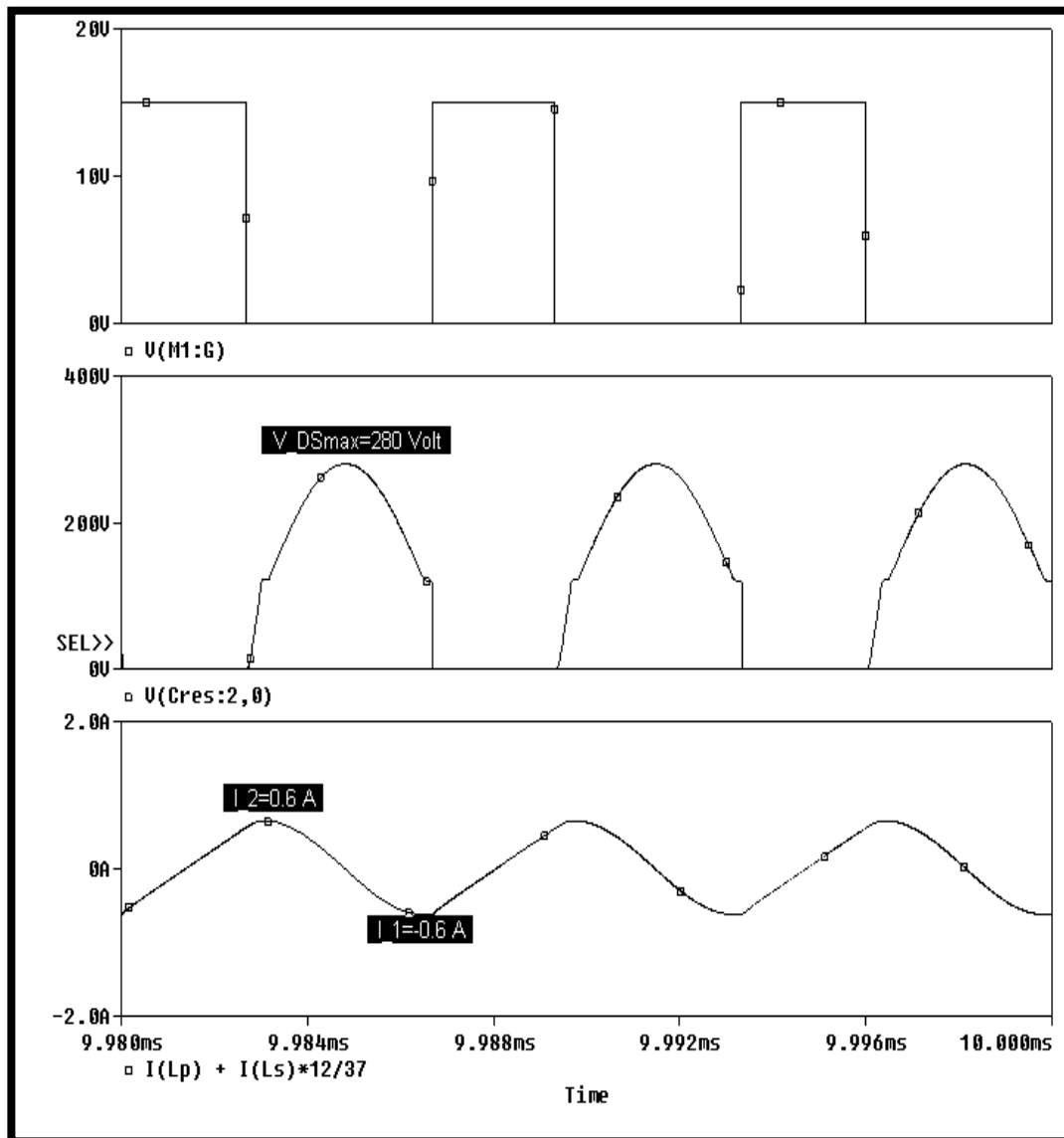
Input Parameters		Output Parameters				
<b>Electrical Specifications</b>		<b>Winding Parameters</b>		<b>Calculated Values</b>		
Primary Voltage (V)	120	Winding Name	P0	S0	Core Loss (Watts)	470.41861m
Secondary Voltage 1 (V)	15	Peak Current (A)	0.4473684210526	0.1176470588235	Achieved Efficiency (%)	98.43702
Power (Watts)	51	RMS Current (A)	0.9383433759023	2.150348808914	Achieved Regulation (%)	
Frequency (Hz.)	150k	No. of Turns	37	12	Window Occupied (%)	16.88508275175
Efficiency (%)	95	Min. Inductance (H)	0.0021904		Temperature Rise (C)	28.79226
Duty Cycle (%)	40	Wire Gauge*	30	30	Total Buildup (mm)	4.48500
Component Type	Forward Transformer-Single	Turns.Layer	15	6	Total Copper Loss (Watts)	339.35674m
		No of layer	3	2	AC Flux Density (Tesla)	101.38282m
Design Status	Success	Inter layer Insulation (mm)*	1	1		
		End Insulation (mm)*	1	1		
<b>Core Details</b>		Winding Buildup (mm)	2.885	1.59		
Vendor Name	Ferroxcube	Winding resistance (Ohm)	0.1881247117799	0.03756815212134		
Part Number	E30_15_7	Copper Loss (Watts)	0.1656416059887	0.1737151354091		
Core Type	EE	Leakage Inductance (H)	8.23779348889e-006			
Core Material	3F3	Voltage Drop (V)	0.1765255771422	0.08078463116724		
Bobbin Part Number	NO_NAME					
GAP (mm)						
Voltage Isolation (mm)*	10m	No. Of Strands*	3	7		
Operating Flux Density (Tesla)*	0.18	Foil Thickness (mm)				
Current Density (A/mm2)*	4	Foil Width (mm)				
Insulation Material*	MYLER					
Wire Type	AWG					

Εικόνα 4-19 Αποτελέσματα Magnetics Part Editor για D=40%.



Εικόνα 4-20 Κύκλωμα RR Forward πριν την εκκίνηση της προσομοίωσης με συμπληρωμένες όλες της απαραίτητες τιμές D=40%.

Ανάλυση και κατασκευή διακοπτικού μετατροπέα Forward με την τεχνική Resonant Reset. Κολλάρος Ματθαίος – Νικόλαος.



Εικόνα 4-21 Κυματομορφές (από πάνω προς τα κάτω) Πηγής τετραγωνικών παλμών, Διακόπτη και ρεύματος μαγνήτισης για  $D=40\%$ .

Οι δυο ακραίες τιμές του ρεύματος μαγνήτισης.

$$I_1 = -0.5 \text{ A}, \quad I_2 = 0.5 \text{ A}$$

Και η μέγιστη ανάστροφη τάση του διακόπτη

$$V_{DS\_MAX} = 247 \text{ V}$$



Κεφάλαιο 4 Προσομοίωση του μετατροπέα Forward με το Pspice.

#### 4.2.4 - D=50%

Για λόγο αγωγής 50% επαναλαμβάνεται η προηγούμενη διαδικασία.

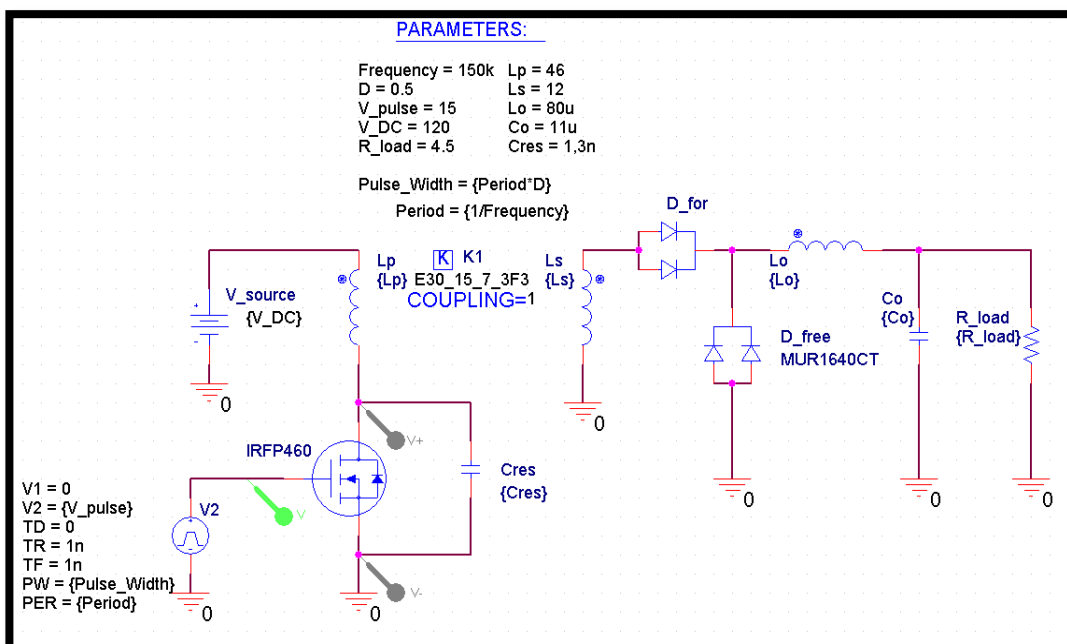
$$T_s = 6.67 * 10^{-6} \text{ Sec}, \quad T_{on} = 3.33 * 10^{-6} \text{ Sec}, \quad T_{off} = 3.33 * 10^{-6} \text{ Sec}$$

$$C_{res} = 1.93 * 10^{-9} \text{ F}, \quad C_{res\_used} = 1.7 * 10^{-9} \text{ F}, \quad C_{R\_eff} = 2.58 * 10^{-9} \text{ F}$$

$$L_m = 400 * 10^{-6} \text{ H}, \quad A_L = 189 * 10^{-9} \frac{\text{H}}{\text{turns}^2}, \quad \text{Air Gap} \cong 455 \mu\text{m}$$

Input Parameters		Output Parameters				
<b>Electrical Specifications</b>		<b>Winding Parameters</b>		<b>Calculated Values</b>		
Primary Voltage (V)	120	Winding Name	P0	S0	Core Loss (Watts)	475.83452m
Secondary Voltage 1 (V)	15	Peak Current (A)	0.4473684210526	0.1470588235294	Achieved Efficiency (%)	98.35347
Power (Watts)	51	RMS Current (A)	0.7997602117728	2.404163056034	Achieved Regulation (%)	
Frequency (Hz.)	150k	No. of Turns	46	12	Window Occupied (%)	18.31236879979
Efficiency (%)	95	Min. Inductance (H)	0.0033856		Temperature Rise (C)	30.07889
Duty Cycle (%)	50	Wire Gauge*	30	30	Total Buildup (mm)	4.48500
Component Type	Forward Transformer-Single	Turns.Layer	23	5	Total Copper Loss (Watts)	377.95347m
		No of layer	2	3	AC Flux Density (Tesla)	101.93381m
Design Status	Success	Inter layer Insulation (mm)*	1	1		
		End Insulation (mm)*	1	1		
Core Details		Winding Buildup (mm)	1.59	2.885		
Vendor Name	Ferroxcube	Winding resistance (Ohm)	0.3285500190832	0.02903243866488		
Part Number	E30_15_7	Copper Loss (Watts)	0.2101459792218	0.167807495483		
Core Type	EE	Leakage Inductance (H)	1.237088892709e-005			
Core Material	3F3	Voltage Drop (V)	0.26276123284	0.06979871646468		
Bobbin Part Number	NO_NAME					
GAP (mm)						
Voltage Isolation (mm)*	10m	No. Of Strands*	2	8		
Operating Flux Density (Tesla)*	0.18	Foil Thickness (mm)				
Current Density (A/mm2)*	4	Foil Width (mm)				
Insulation Material*	MYLER					
Wire Type	AWG					

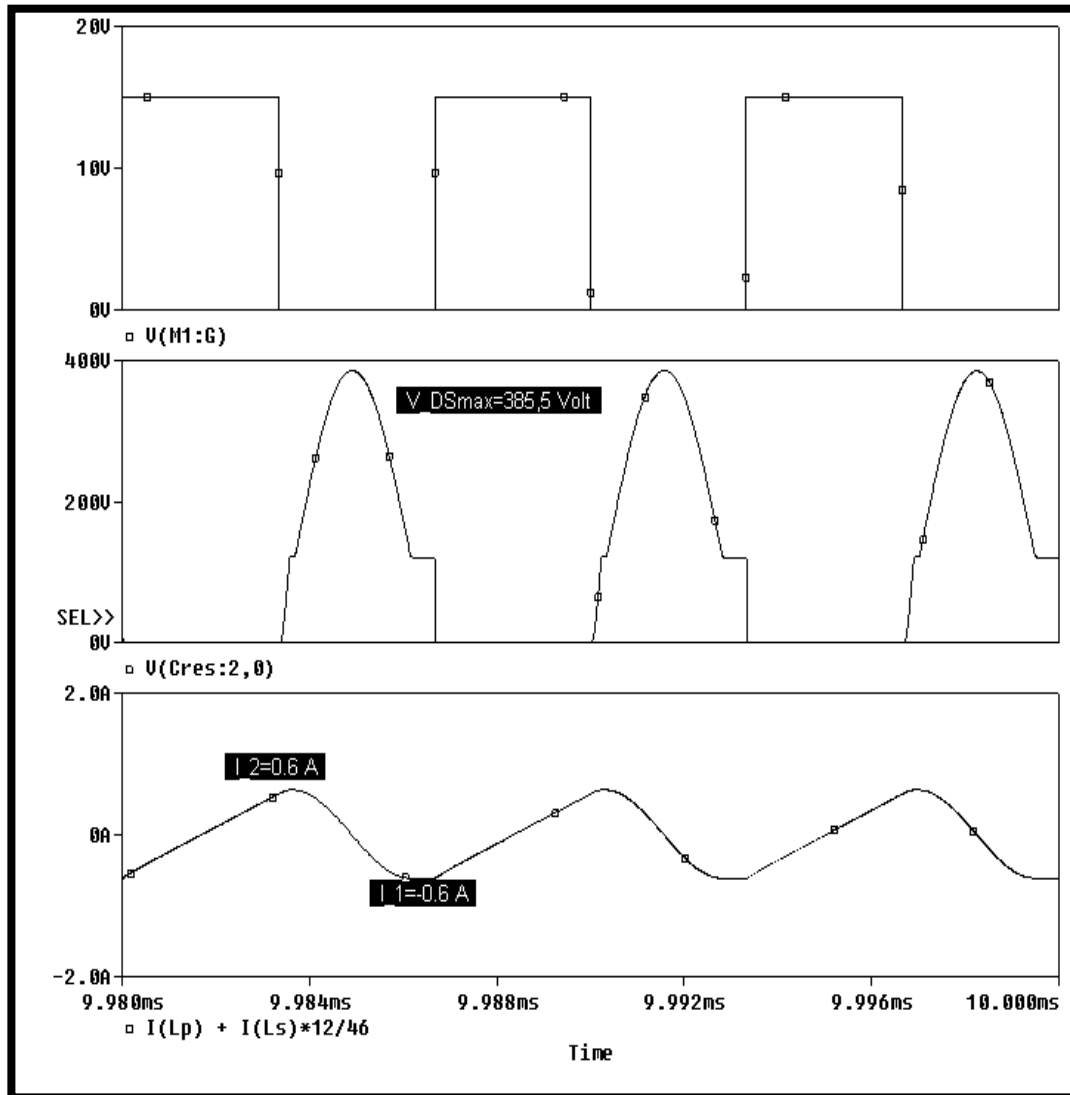
Εικόνα 4-2 Αποτελέσματα Magnetics Part Editor για D=50%.



Εικόνα 4-23 Κύκλωμα RR Forward πριν την εκκίνηση της προσομοίωσης με συμπληρωμένες όλες της απαραίτητες τιμές D=50%.

Ανάλυση και κατασκευή διακοπτικού μετατροπέα Forward με την τεχνική Resonant Reset.  
Κολλάρος Ματθαίος – Νικόλαος.

## Κεφάλαιο 4 Προσομοίωση του μετατροπέα Forward με το Pspice.



Εικόνα 4-24 Κυματομορφές (από πάνω προς τα κάτω) Πηγής τετραγωνικών παλμών, Διακόπτη και ρεύματος μαγνήτισης για  $D=50\%$ .

Οι δυο ακραίες τιμές του ρεύματος μαγνήτισης.

$$I_1 = -0.5 \text{ A}, \quad I_2 = 0.5 \text{ A}$$

Και η μέγιστη ανάστροφη τάση του διακόπτη

$$V_{DS\_MAX} = 316,8 \text{ V}$$

Κεφάλαιο 4 Προσομοίωση του μετατροπέα Forward με το Pspice.

#### 4.2.5 - D=60%

Για λόγο αγωγής 60% επαναλαμβάνεται η προηγούμενη διαδικασία.

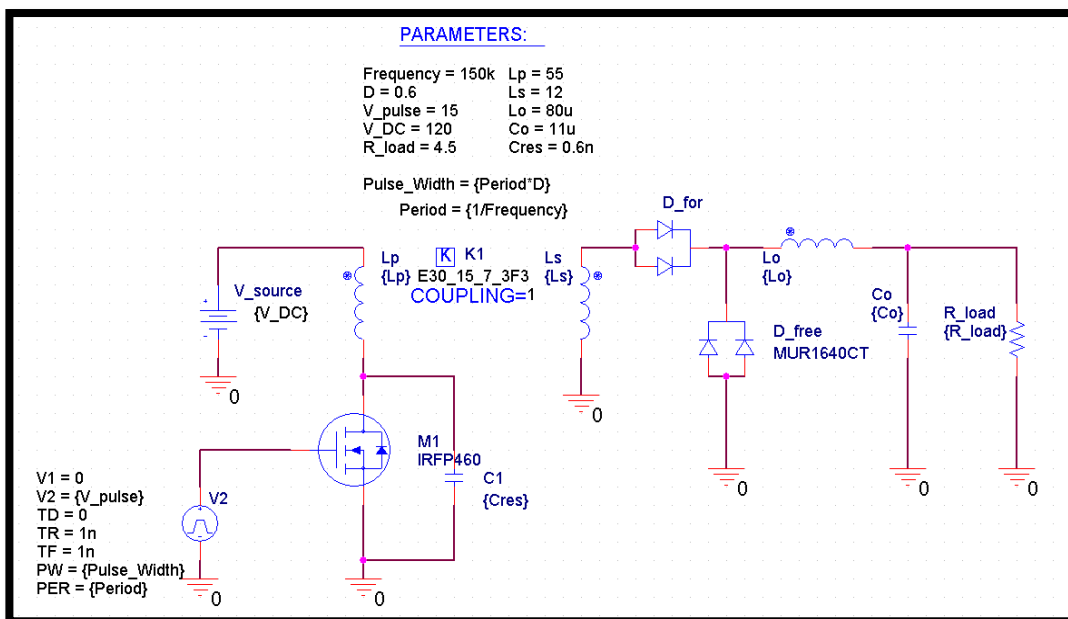
$$T_s = 6.67 * 10^{-6} \text{ Sec}, \quad T_{on} = 4 * 10^{-6} \text{ Sec}, \quad T_{off} = 2.67 * 10^{-6} \text{ Sec}$$

$$C_{res} = 0,62 * 10^{-9} \text{ F}, \quad C_{res\_used} = 0,6 * 10^{-9} \text{ F}, \quad C_{R\_eff} = 1,47 * 10^{-9} \text{ F}$$

$$L_m = 480 * 10^{-6} \text{ H}, \quad A_L = 158 * 10^{-9} \frac{\text{H}}{\text{turns}^2}, \quad \text{Air Gap} \cong 600 \mu\text{m}$$

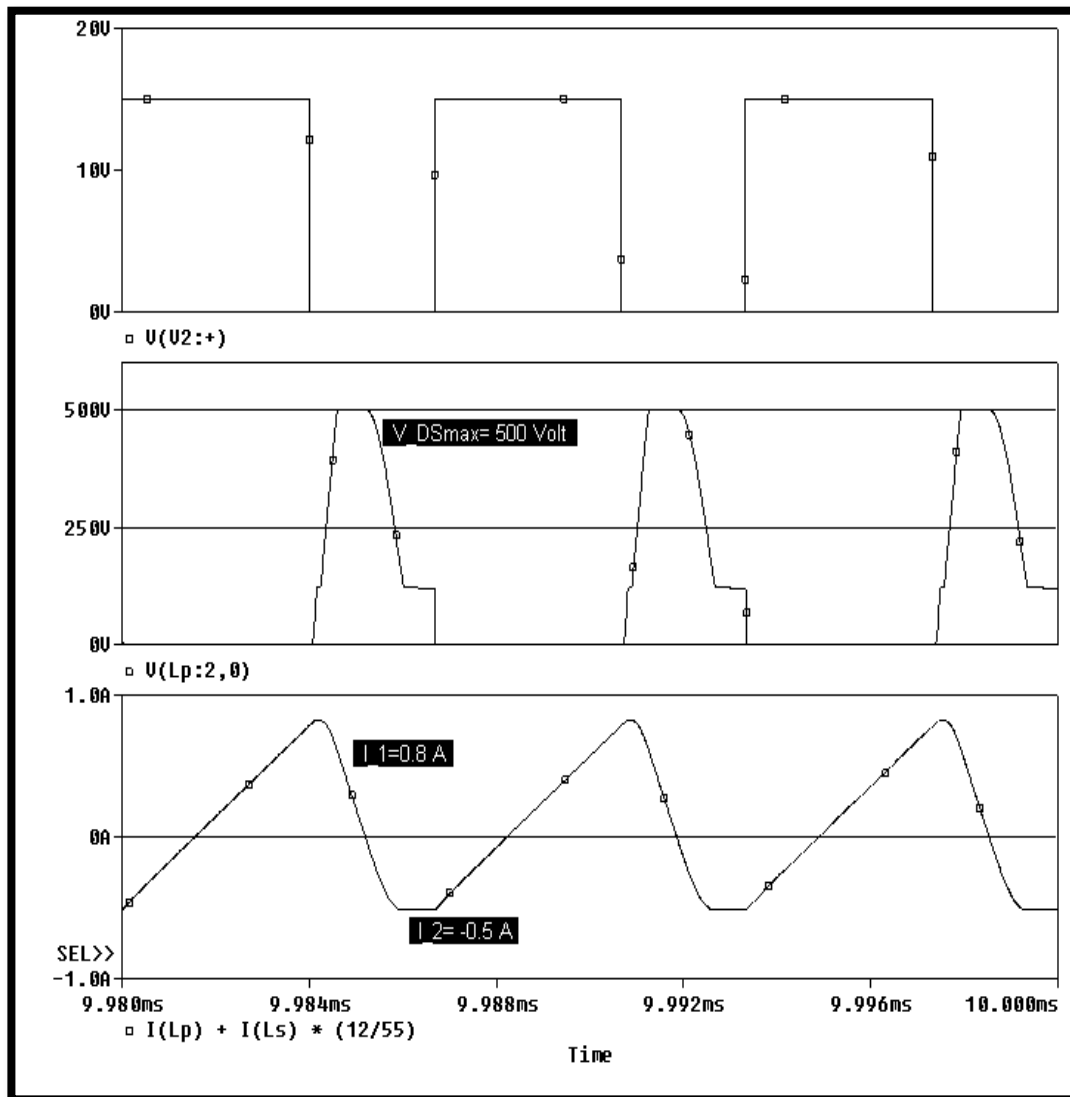
Input Parameters		Output Parameters				
<b>Electrical Specifications</b>		<b>Winding Parameters</b>		<b>Calculated Values</b>		
Primary Voltage (V)	120	Winding Name	P0	S0	Core Loss (Watts)	479.49632m
Secondary Voltage 1 (V)	15	Peak Current (A)	0.4473684210526	0.1764705882353	Achieved Efficiency (%)	98.05648
Power (Watts)	51	RMS Current (A)	0.7055826554313	2.633628675421	Achieved Regulation (%)	
Frequency (Hz.)	150k	No. of Turns	55	12	Window Occupied (%)	19.64361961661
Efficiency (%)	95	Min. Inductance (H)	0.00484		Temperature Rise (C)	34.58071
Duty Cycle (%)	60	Wire Gauge*	32	32	Total Buildup (mm)	4.20500
Component Type	Forward Transformer-Single	Turns.Layer	19	6	Total Copper Loss (Watts)	531.34268m
		No of layer	3	2	AC Flux Density (Tesla)	102.30448m
<b>Design Status</b>	Success	Inter layer Insulation (mm)*	1	1		
		End Insulation (mm)*	1	1		
<b>Core Details</b>		Winding Buildup (mm)	2.717	1.478		
Vendor Name	Ferroxcube	Winding resistance (Ohm)	0.4483411626618	0.04442580898395		
Part Number	E30_15_7	Copper Loss (Watts)	0.2232052506412	0.3081374111127		
Core Type	EE	Leakage Inductance (H)	1.67232174648e-005			
Core Material	3F3	Voltage Drop (V)	0.3163417480901	0.1170010844689		
Bobbin Part Number	NO_NAME					
GAP (mm)						
Voltage Isolation (mm)*	10m	No. Of Strands*	3	9		
Operating Flux Density (Tesla)*	0.18	Foil Thickness (mm)				
Current Density (A/mm2)*	4	Foil Width (mm)				
Insulation Material*	MYLER					
Wire Type	AWG					

Εικόνα 4-25 Αποτελέσματα Magnetics Part Editor για D=60%.



Εικόνα 4-26 Κύκλωμα RR Forward πριν την εκκίνηση της προσομοίωσης με συμπληρωμένες όλες της απαραίτητες τιμές D=60%.

Ανάλυση και κατασκευή διακοπτικού μετατροπέα Forward με την τεχνική Resonant Reset. Κολλάρος Ματθαίος – Νικόλαος.



Εικόνα 4-27 Κυματομορφές (από πάνω προς τα κάτω) Πηγής τετραγωνικών παλμών, Διακόπτη και ρεύματος μαγνήτισης για  $D=60\%$ .

Οι δυο ακραίες τιμές του ρεύματος μαγνήτισης.

$$I_1 = -0.5 \text{ A}, \quad I_2 = 0.5 \text{ A}$$

Και η μέγιστη ανάστροφη τάση του διακόπτη

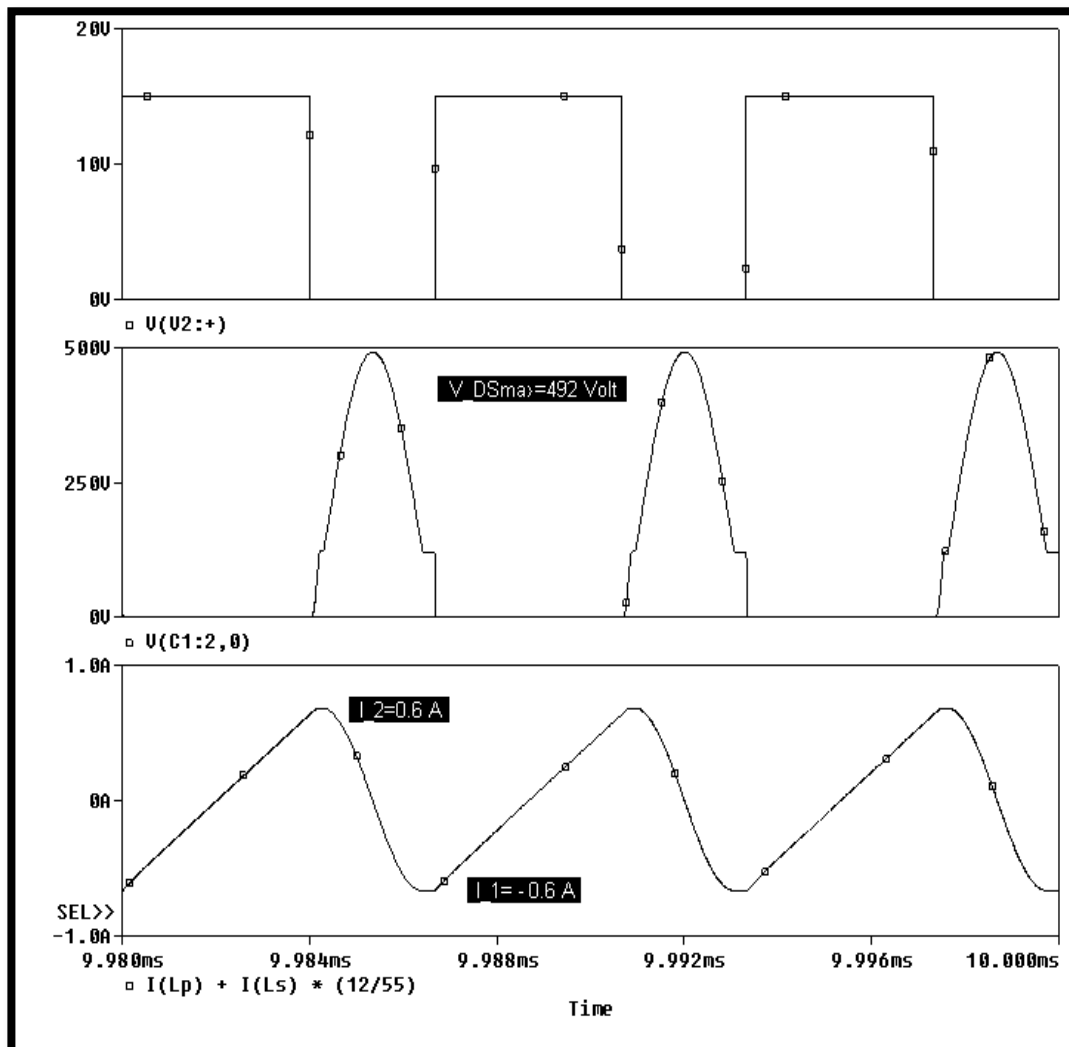
$$V_{DS\_MAX} = 402 \text{ V}$$

Από της παραπάνω κυματομορφές φαίνεται ότι η μέγιστη ανάστροφη τάση του διακόπτη ξεπέρα την ονομαστική τιμή του. Με το Pspice μπορεί να βρεθεί ότι η συχνότητα συντονισμού είναι 250 kHz. Όμως με βάση τα υπολογισμένα στοιχεία του κυκλώματος θα έπρεπε να είναι

$$f_{res} = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{1,47 * 10^{-9} \text{ F} * 480 * 10^{-6} \text{ H}}} = 189,5 \text{ kHz}$$

## Κεφάλαιο 4 Προσομοίωση του μετατροπέα Forward με το Pspice.

Η διαφορά αυτή οφείλεται στη παρασιτικά στοιχεία του μετασχηματιστή (χωρητικότητες και αυτεπαγωγές) και στις παρασιτικές χωρητικότητες του MOSFET οι οποίες μεταβάλλονται κατά τη λειτουργία του. Αυξάνοντας την τιμή του πυκνωτή που τοποθετείτε στο διακόπτη θα μειωθεί η συχνότητα συντονισμού και η μέγιστη τάση του διακόπτη. Πρώτα θα δοκιμαστή η τιμή  $C_{res} = 1,1 \text{ nC}$



Εικόνα 4-28 Κυματομορφές (από πάνω προς τα κάτω) Πηγής τετραγωνικών παλμών, Διακόπτη και ρεύματος μαγνήτισης για  $D=60\%$  και  $C_{res}=1,1\text{nC}$ .

Επομένως η λειτουργία του κυκλώματος δεν είναι δυνατή για λόγο αγωγής μεγαλύτερο του 60% με αυτά τα ημιαγωγικά στοιχεία εκτός και αν γίνει δεκτή η μεγάλη κυμάτωση του ρεύματος μαγνήτισης.

Κεφάλαιο 4 Προσομοίωση του μετατροπέα Forward με το Pspice.

### **4.3 - Βιβλιογραφία**

- Εργαστηριακές σημειώσεις «Προσομοίωση Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων» Ε. Δρακάκης
- OrCAD Pspice Documentation

# Κεφάλαιο

# 5

## Η Κατασκευή.

---

### Εισαγωγή.

Το τελευταίο στάδιο στη δημιουργία ενός κυκλώματος είναι η σχεδίαση της πλακέτας και η κατασκευή της. Υπάρχουν διάφορα προγράμματα στην αγορά που βοηθούν σε αυτό το σκοπό. Μερικά από αυτά είναι το Eagle (Easily Applicable Graphical Layout) της Electronics Lab και το Altium της ομώνυμης εταιρείας. Τα προγράμματα αυτά οδηγούν το χρήστη στην κατασκευή ενός PCB (Printed Circuit Board), αφού πρώτα κατασκευαστεί μέσω αυτών ένα βασικό Schematic ως οδηγός. Όλες σχεδόν οι εταιρείες προσφέρουν ειδικές βιβλιοθήκες για όλα τα στοιχεία τους, ώστε να μην υπάρχουν ασυμμετρίες τοποθετηθούν και κολληθούν τα εξαρτήματα στην πλακέτα. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα εστιάσουμε περισσότερο στην κατασκευή (επιλογή εξαρτημάτων και προϋποθέσεις) και όχι στη χρήση των προγραμμάτων. Πρώτα θα γίνει η κατασκευή ενός μετατροπέα υποβιβασμού τάσης και έπειτα η κατασκευή του RR Forward converter. Επίσης, θα εξηγηθεί η κατασκευή των μαγνητικών στοιχείων των κυκλωμάτων (choke transformer). Λόγω έλλειψης απαραίτητων εξαρτημάτων, όπως καλώδια περιελίξεων κατάλληλης διατομής (μονόκλινα ή πεπλεγμένα Litz) για τη μείωση των απωλειών στα τυλίγματα και μαγνητικής πλάνης και διαμαντοτρύπανου για την κοπή του κατάλληλου διακένου στον πυρήνα η κατασκευή θα γίνει για εργαστηριακούς σκοπούς.

## Αρχικοί υπολογισμοί

Πρώτα από όλα πρέπει να οριστούν κάποιες βασικές παράμετροι των κυκλωμάτων. Αυτές είναι οι εξής

$$\begin{aligned} V_{\text{source.Buck}} &= 50 \text{ V}, & V_{\text{sourceFor}} &= 120 \text{ V} \\ D &= 50\%, & V_{\text{out.Buck}} &= 25 \text{ V}, & V_{\text{out.For}} &= 10 \text{ V} \\ f_s &= 150 \text{ kHz}, & T_s &= 6,67 \text{ }\mu\text{Sec} \\ V_{\text{ripple}} &= 0,5 \text{ V}, & I_{\text{ripple}} &= I_{\text{mag.ripple}} = 0,5 \text{ A} \end{aligned}$$

Πραγματοποιώντας τους απαραίτητους υπολογισμούς καταλήγουμε στα παρακάτω :

$$\begin{aligned} L_{\text{out.for}} &= 70 * 10^{-6} \text{ H}, & L_{\text{out.Buck}} &= 165 * 10^{-6} \text{ H}, & L_{\text{mag}} &= 800 * 10^{-6} \text{ H} \\ C_{\text{out.for}} &= 0,79 * 10^{-6} \text{ F}, & C_{\text{out.buck}} &= 0,84 * 10^{-6} \text{ F} \end{aligned}$$

Επομένως, στο κάθε κύκλωμα θα τοποθετηθεί πυκνωτής 1μF.

## Μαγνητικά στοιχεία

Στην προηγούμενη ενότητα, υπολογίστηκαν οι τιμές της αυτεπαγωγής των μαγνητικών στοιχείων. Τώρα θα εξηγηθεί, η διαδικασία κατασκευής με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στα κεφάλαια 3 και 4. Για την κατασκευή επιλέγεται ο πυρήνας ETD34 της Ferroxcube κατασκευασμένος από το υλικό 3F3 με  $A_L=2500 \text{ nH}$  και  $\mu=1750$  σε μηδενικό διάκενο. Στην αρχή για μηδενικό διάκενο, θα υπολογίσουμε των απαραίτητο αριθμό περιελίξεων για κάθε στοιχείο.

### Choke για το μετατροπέα Buck.

Επειδή στο συγκεκριμένο πυρήνα δεν δίνονται το  $A_L$  και το  $\mu$  για διάφορες τιμές διάκενου, δεν μπορεί να κατασκευαστεί η γραφική παράσταση που χρησιμοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Έτσι λοιπόν, θα πρέπει να θέσουμε σχεδόν «αυθαίρετα» τον αριθμό περιελίξεων  $N$ . Πρώτα θα υπολογίσουμε το  $N$  χωρίς διάκενο για την επιθυμητή τιμή αυτεπαγωγής.

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} \Rightarrow N = \sqrt{\frac{165 * 10^{-6} \text{ H}}{2500 * 10^{-9} \text{ H/turns}^2}} \Rightarrow N = 8 \text{ turns}$$

Επειδή στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι πολύ πιθανό να υπάρξει λειτουργία στον κόρο, θα προσθέσουμε ένα διάκενο με χαρτί ανάμεσα στα «πόδια» των δυο μισών του πυρήνα. Επίσης, θα αυξήσουμε το  $N$  διότι όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3, το επιπρόσθετο διάκενο μειώνει την αυτεπαγωγή του πηνίου. Θα επιλεγεί αριθμός περιελίξεων  $N=18 \text{ turns}$ .

$$L = N^2 * A_L \Rightarrow L = 18^2 \text{ turns} * 2500 * 10^{-9} \text{ H/turns}^2 \Rightarrow L = 810 * 10^{-6} \text{ H}$$

Σε αυτό το σημείο θα δοκιμάσουμε τρία διαφορετικά διάκενα, προσθέτοντας ένα κομμάτι χαρτί στα «πόδια» του πυρήνα. Πρώτα τοποθετείται σε ένα από τα δύο ακριανά «πόδια», έπειτα και στα δύο ακριανά και τέλος στο μεσαίο. Τα



αποτελέσματα δίνονται στον παρακάτω πίνακα. Το καλώδιο που χρησιμοποιείται είναι διατομής  $4,4 \text{ mm}^2$  με βαριά μόνωση βερνικιού, ενώ η διατομή χωρίς τη μόνωση είναι  $3,8 \text{ mm}^2$ .

-	L	A <sub>L</sub>
Χωρίς διάκενο	810 μH	2500 nH/turns <sup>2</sup>
Διάκενο στο ακριανό «πόδι»	355 μH	1095 nH/turns <sup>2</sup>
Διάκενο και στα δύο «πόδι»	200 μH	617 nH/turns <sup>2</sup>
Διάκενο στο μεσαίο «πόδι»	165 μH	509 nH/turns <sup>2</sup>

Επομένως, θα χρησιμοποιηθεί το πηνίο με το διάκενο στο μεσαίο «πόδι».

### Choke για το μετατροπέα Forward.

Ομοίως

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} \Rightarrow N = \sqrt{\frac{70 * 10^{-6} \text{ H}}{2500 * 10^{-9} \text{ H/turns}^2}} \Rightarrow N = 5 \text{ turns}$$

Επιλέγεται N=13 (έπειτα από πολλές κατασκευές μετασχηματιστών και αρκετού πειραματισμού και μετρήσεων παρατηρήθηκε ότι με διάκενο στο μεσαίο πόδι, η τιμή της αυτεπαγωγής είναι περίπου 20% της τιμής χωρίς διάκενο.) Το καλώδιο που χρησιμοποιείται είναι διατομής  $4,4 \text{ mm}^2$  με βαριά μόνωση βερνικιού, ενώ η διατομή χωρίς τη μόνωση είναι  $3,8 \text{ mm}^2$ .

-	L	A <sub>L</sub>
Χωρίς διάκενο	422 μH	2500 nH/turns <sup>2</sup>
Διάκενο στο ακριανό «πόδι»	183 μH	1082 nH/turns <sup>2</sup>
Διάκενο και στα δύο «πόδι»	104 μH	615 nH/turns <sup>2</sup>
Διάκενο στο μεσαίο «πόδι»	104 μH	615 nH/turns <sup>2</sup>

Επειδή ακόμα και με το διάκενο χαρτιού στο μεσαίο ποδαράκι δεν έχουμε την επιθυμητή τιμή αυτεπαγωγής, θα τοποθετήσουμε διπλό χαρτί. Έτσι καταλήγουμε με αυτεπαγωγή  $L=74 * 10^{-6} \text{ H}$ .

### Μετασχηματιστής για το μετατροπέα Forward.

Στο σχεδιασμό ενός μετασχηματιστή, η διαδικασία είναι η ίδια με μόνη διαφορά ότι πλέον υπάρχουν δύο πηνία συζευγμένα. Κάθε πηνίο στο μετασχηματιστή ανάλογα με τη ροή ισχύος του κυκλώματος, έχει το δικό του κλάδο μαγνήτισης και επομένως, τη δική του επαγωγή μαγνήτισης. Επιλέγεται λόγος μετασχηματισμού έξι και αριθμός τυλιγμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος 35 και 5, αντίστοιχα. Το δευτερεύον θα τυλιχθεί εξωτερικά του πρωτεύοντος με καλώδιο διατομής  $4,4 \text{ mm}^2$  με βαριά μόνωση βερνικιού (το ίδιο καλώδιο που χρησιμοποιήθηκε στα πηνία), ενώ στο πρωτεύον θα χρησιμοποιηθεί καλώδιο διατομής  $1,9 \text{ mm}^2$  με βαριά μόνωση βερνικιού, ενώ η διατομή χωρίς τη μόνωση είναι  $1,6 \text{ mm}^2$ .

Ο κλάδος μαγνήτισης θα βρίσκεται στην πλευρά υψηλής τάσης και ο μετασχηματιστής θα υποβιβάζει την τάση. Η επιθυμητή τιμή της επαγωγής μαγνήτισης είναι  $L_m=800 \mu\text{H}$  για κυμάτωση ρεύματος μαγνήτισης  $i_{Lm}=500 \text{ mA}$ .

-	$L_m$	$A_L$
Χωρίς διάκενο	3,5mH / 102,5 $\mu\text{H}$	2500 nH/turns <sup>2</sup>
Διάκενο στο ακριανό «πόδι»	1,52 mH / 54,2 $\mu\text{H}$	1240 nH/turns <sup>2</sup>
Διάκενο και στα δύο «πόδι»	760 $\mu\text{H}$ / 35 $\mu\text{H}$	620 nH/turns <sup>2</sup>
Διάκενο στο μεσαίο «πόδι»	790 $\mu\text{H}$ / 36 $\mu\text{H}$	644 nH/turns <sup>2</sup>

### Η κατασκευή του Buck

Με το πηνίο εξόδου έτοιμο, μένει να βρεθούν τα υπόλοιπα στοιχεία που θα τοποθετηθούν στο κύκλωμα. Αυτά είναι τα εξής

Ένα Mosfet IRC530 με μέγιστη ανάστροφη τάση 100 Volt,  $R_{DS\_ON}=0,14 \text{ Ohm}$ , μέγιστο ρεύμα  $I_D=14 \text{ Ampere}$ , παρασιτική χωρητικότητα εξόδου  $C_{oss}=320 \text{ pF}$ , χρόνο καθυστέρησης έναυσης  $t_{d(on)}=9,5 \text{ nSec}$ , χρόνο ανόδου  $t_r=42 \text{ nSec}$ , χρόνο καθυστέρησης σβέσης  $t_{d(off)}=22 \text{ nSec}$ , χρόνο πτώσης  $t_f=25 \text{ nSec}$  και τέλος ολικό φορτίο πύλης  $Q_D=26 \text{ nC}$ . Οι χρόνοι δίνονται, επειδή πρέπει να γνωρίζουμε (και να ελαχιστοποιήσουμε) το ποσοστό της κάθε περιόδου που χάνεται λόγω των μεταβατικών φαινομένων, κατά την έναυση - σβέση των ημιαγωγικών. Αυτό το ποσοστό δεν θέλουμε να ξεπερνά το 15% της περιόδου, δηλαδή  $T_{(on-off)}=1 \mu\text{Sec}$ . Το ολικό φορτίο πύλης μας απασχολεί, διότι με αυτό υπολογίζουμε το μέγιστο ρεύμα που θα απορροφήσει το Mosfet στην έναυση από τον παρακάτω τύπο.

$$Q=t*I$$

Επομένως, για να λειτουργεί το Mosfet στην ονομαστική ταχύτητα

$$I=t/Q \Rightarrow I=(51,5 \text{ nSec})/(26 \text{ nC}) \Rightarrow I=1,98 \text{ Ampere}$$

Με βάση τα παραπάνω, θα επιλεγεί ένας οδηγός Mosfet TC4420 της Microchip με δυνατότητα ρεύματος οδήγησης έως 6 Ampere, χρόνο καθυστέρησης έναυσης  $t_d(\text{on})=55 \text{ nSec}$ , χρόνο ανόδου  $t_r=25 \text{ nSec}$ , χρόνο καθυστέρησης σβέσης  $t_d(\text{off})=55 \text{ nSec}$ , χρόνο πτώσης  $t_f=25 \text{ nSec}$ .

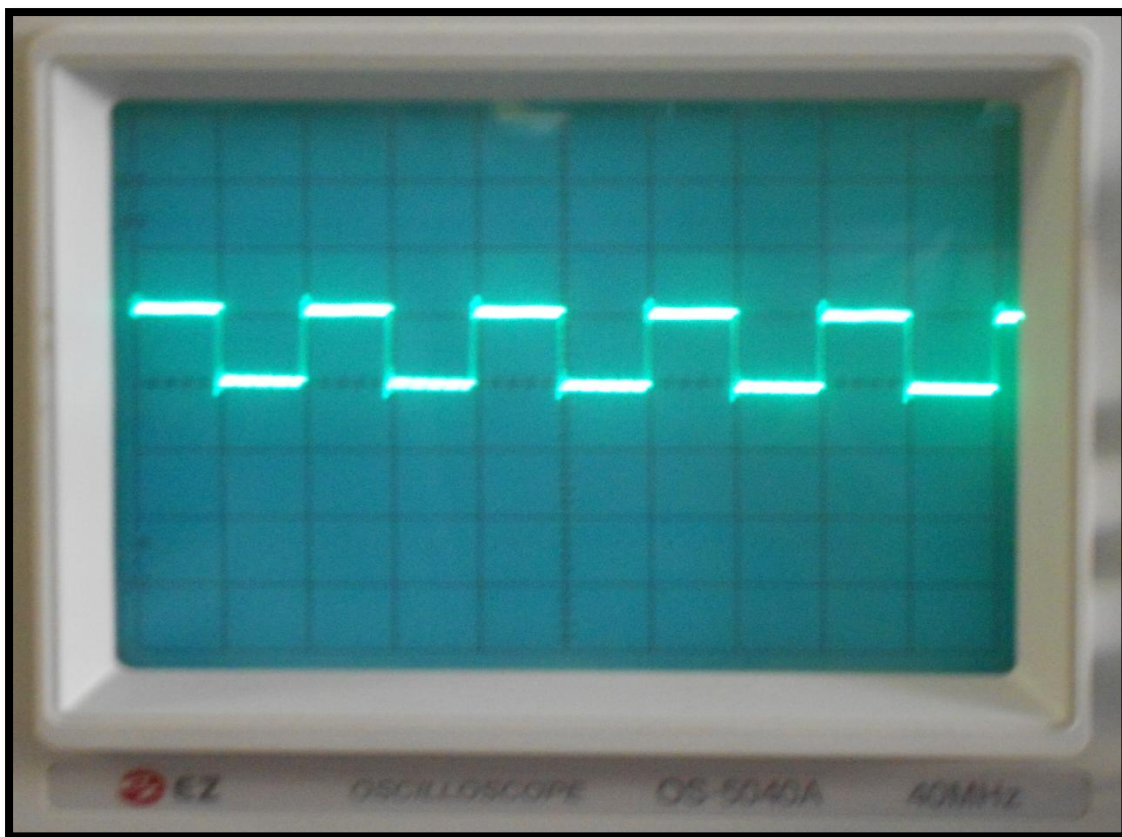
Επίσης, θα χρησιμοποιηθεί μία διάδος FEP116BT με μέγιστη ανάστροφη τάση 100 Volt ως διάδος ελεύθερης διέλευσης.

Τέλος για την προστασία της παλμοδότησης, θα προστεθεί στο κύκλωμα ένα optocoupler 16N137.

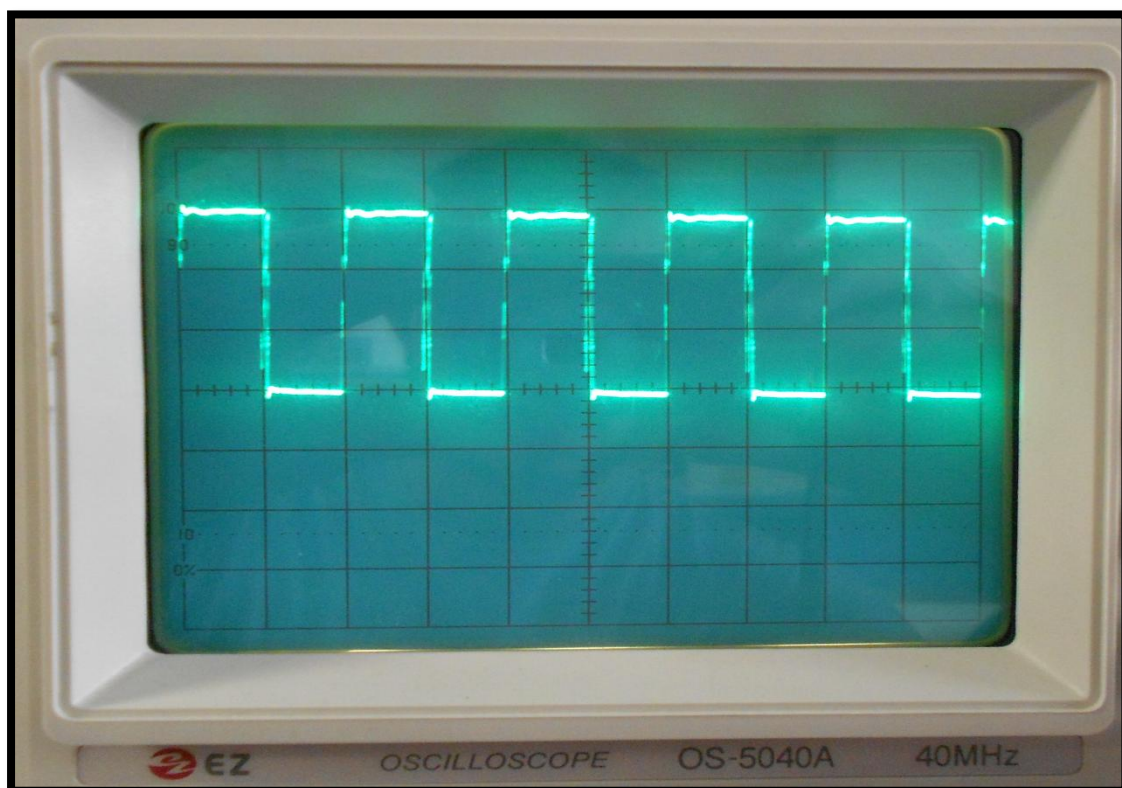
Τα επιμέρους στοιχεία που έχει το κύκλωμα είναι τα παρακάτω:

- Μια αντίσταση 220 Ω από την παλμογεννήτρια στο optocoupler. Η παλμογεννήτρια ρυθμίζεται να δίνει τετραγωνική τάση 0-5 Volt και η αντίσταση αυτή προστατεύει το optocoupler και εξομαλύνει την τάση της γεννήτριας.
- Μια αντίσταση 470 Ω σύμφωνα με το Datasheet του optocoupler, ως φορτίο ανάμεσα στα pin 6 – 7.
- Ένας πυκνωτής 0,1 μF στα pin 5 – 8 του optocoupler.
- Δύο πυκνωτές 240 pF για εξομάλυνση των τάσεων πόλωσης των στοιχείων (πηγή 5 Volt και 15 Volt).
- Ένας πυκνωτής 0,1 μF στα pin 4,5 – 1,8 του οδηγού του Mosfet.
- Μία διάδος Ζένερ καθώς και μία αντίσταση 2,2 ΚΩ παράλληλα σε αυτήν, για την εξομάλυνση της τάσης του Mosfet τοποθετείται μεταξύ γης και pin 6 – 7 του οδηγού.
- Μία αντίσταση 10 Ω ως αντίσταση πύλης του Mosfet.

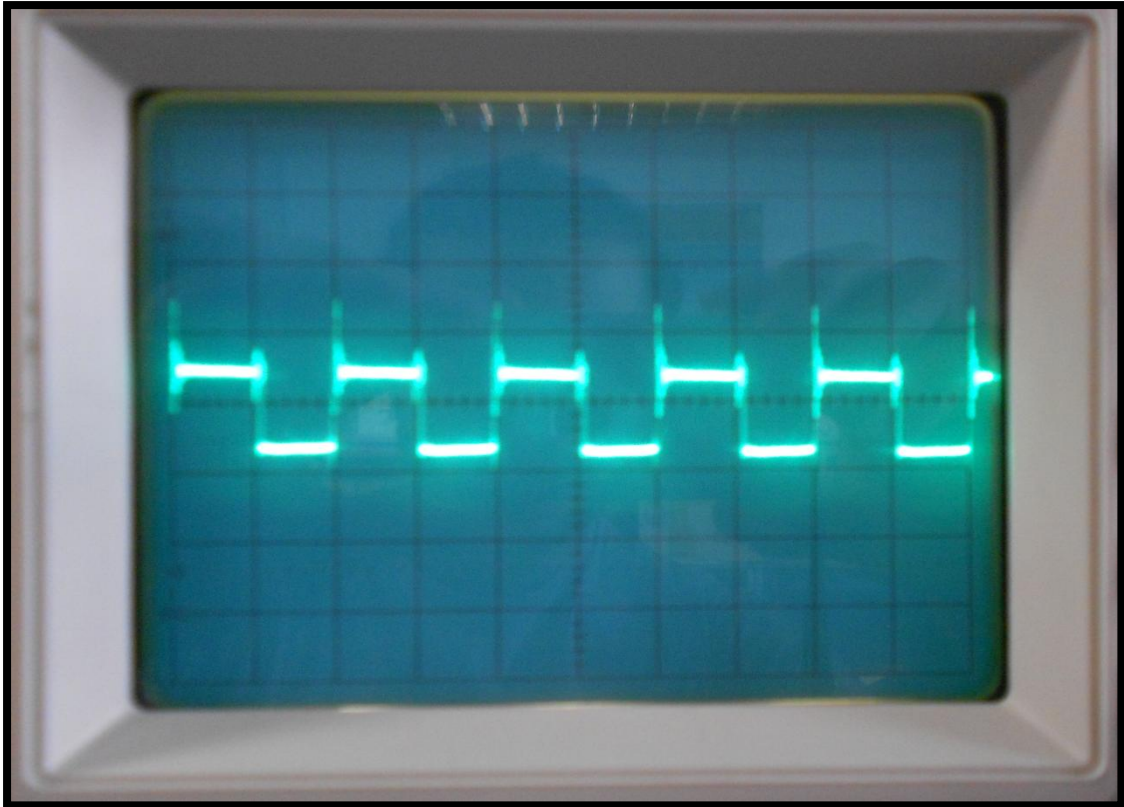
Τέλος προστίθενται μερικές κλέμες για τις διάφορες εισόδους και εξόδους (τάσεις πόλωσης, φορτίο κτλ.) και Test points σε διάφορα σημεία κλειδιά του κυκλώματος.



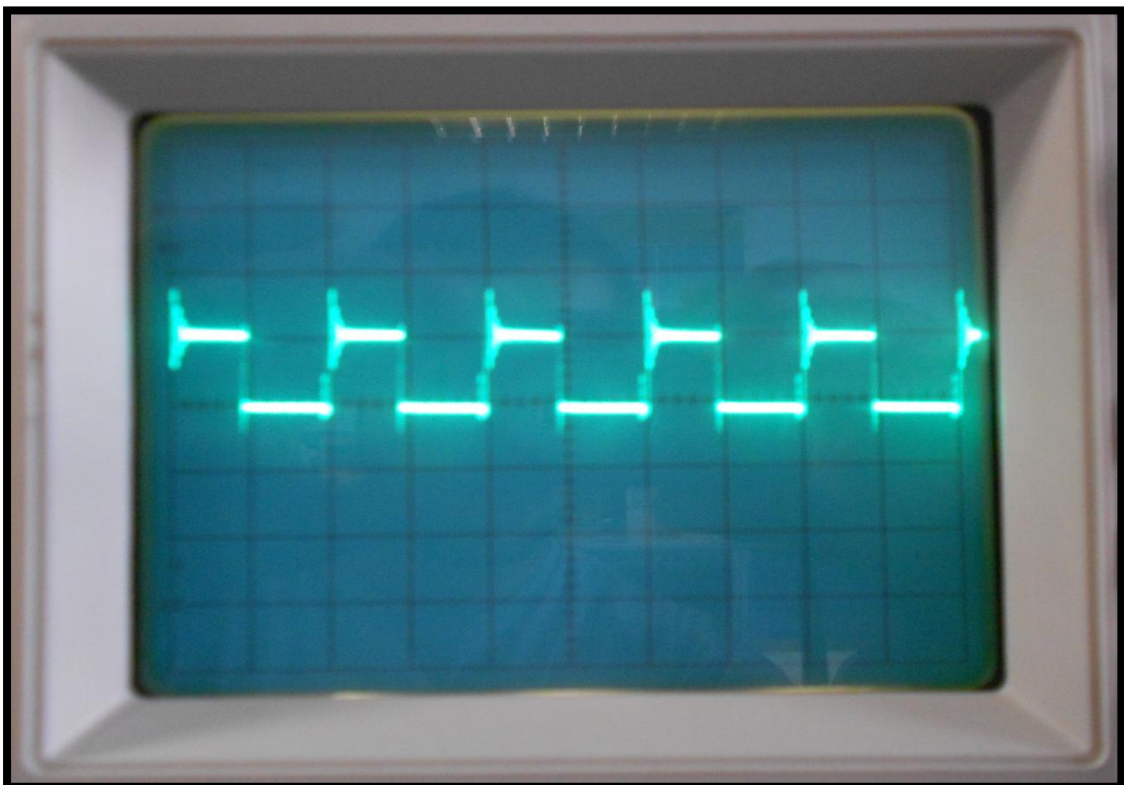
Εικόνα 5-1 Κυματομορφή τάσης Παλμογεννήτριας. (5 Volts per Division)



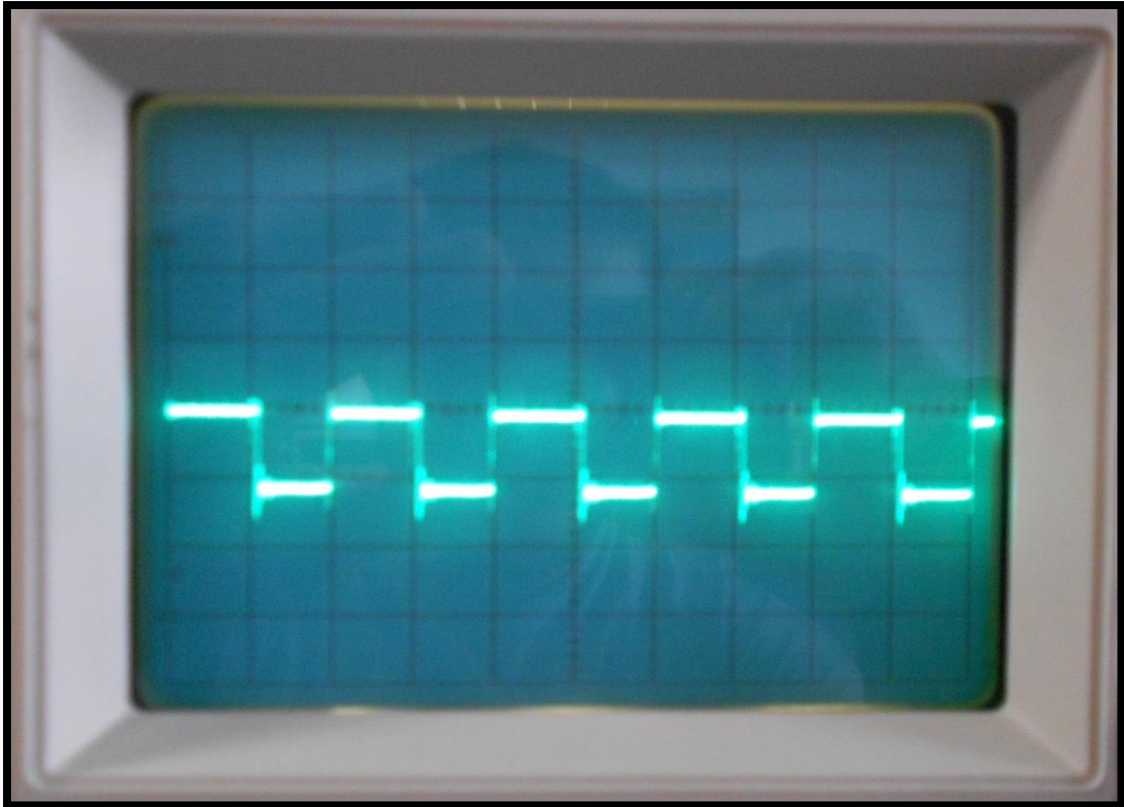
Εικόνα 5-2 Κυματομορφή τάσης εξόδου οδηγού Mosfet. (5 Volts per Division)



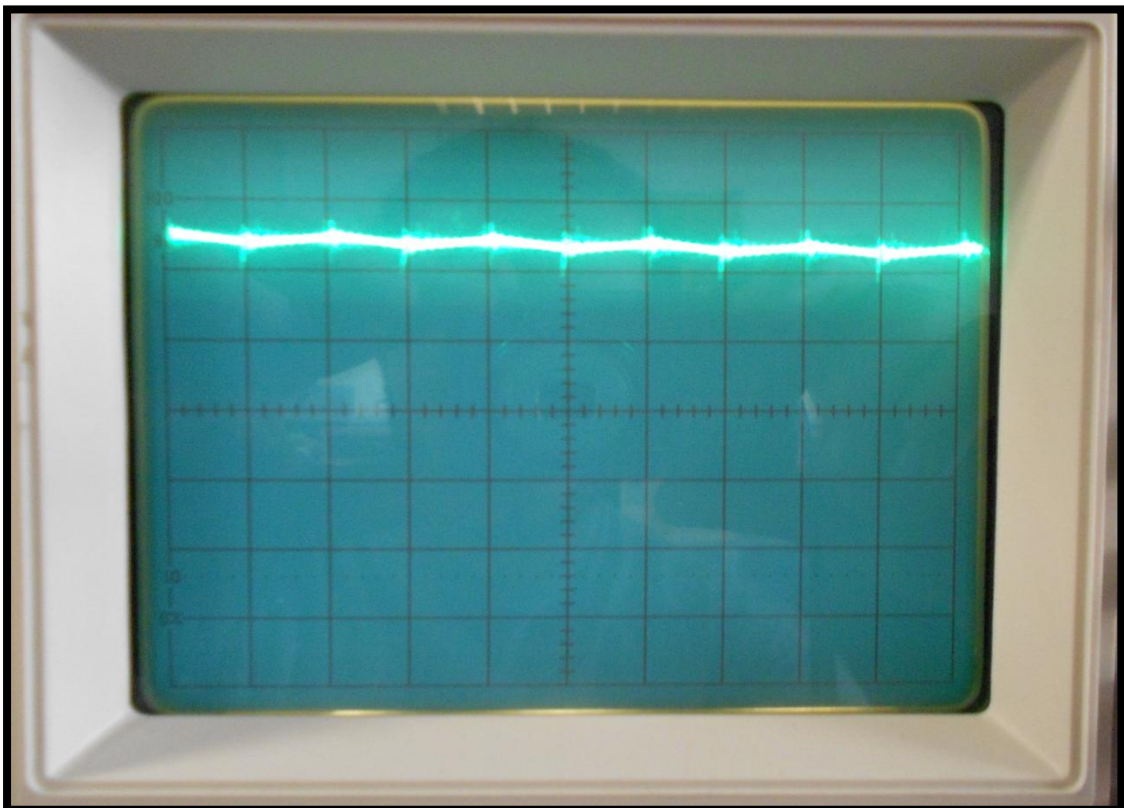
Εικόνα 5-3 Κυματομορφή τάσης Πηνίου Εξόδου (τάση εισόδου 5 Volt, φορτίο 44 Ohm, Duty Cycle 50%, 5 Volts per Division).



Εικόνα 5-4 Κυματομορφή τάσης Mosfet. (5 Volts per Division)



Εικόνα 5-5 Κυματομορφή τάσης διόδου ελεύθερης διέλευσης. (5 Volts per Division)



Εικόνα 5-6 Κυματομορφή Τάσης Φορτιού. (1 Volt per Division)

## Η κατασκευή του Forward

Η κατασκευή του Forward είναι η ίδια σε όλα τα σημεία, εκτός από την τοποθέτηση του μετασχηματιστή, της διόδου ορθής φοράς και του πυκνωτή συντονισμού. Πέρα από αυτά, ακολουθείται η ίδια ακριβώς διαδικασία κατασκευής. Παρακάτω δίνονται φωτογραφίες των κυματομορφών του buck και του forward, των σχηματικών διαγραμμάτων, των διαγραμμάτων PCB, του κυκλώματος στην τελική του μορφή και των μαγνητικών στοιχείων κατά τη διαδικασία κατασκευής.

Το μόνο πράγμα που μένει είναι να υπολογιστεί η χωρητικότητα του πυκνωτή συντονισμού από τους γνωστούς τύπους.

Εσωτερική χωρητικότητα Mosfet IRC530  $C_{oss}=320 * 10^{-12}$  F.

Εσωτερική χωρητικότητα διόδου FEPI16  $C_j=60 * 10^{-12}$  F.

Επαγωγή μαγνήτισης μετασχηματιστή  $L_m=74 * 10^{-6}$  H.

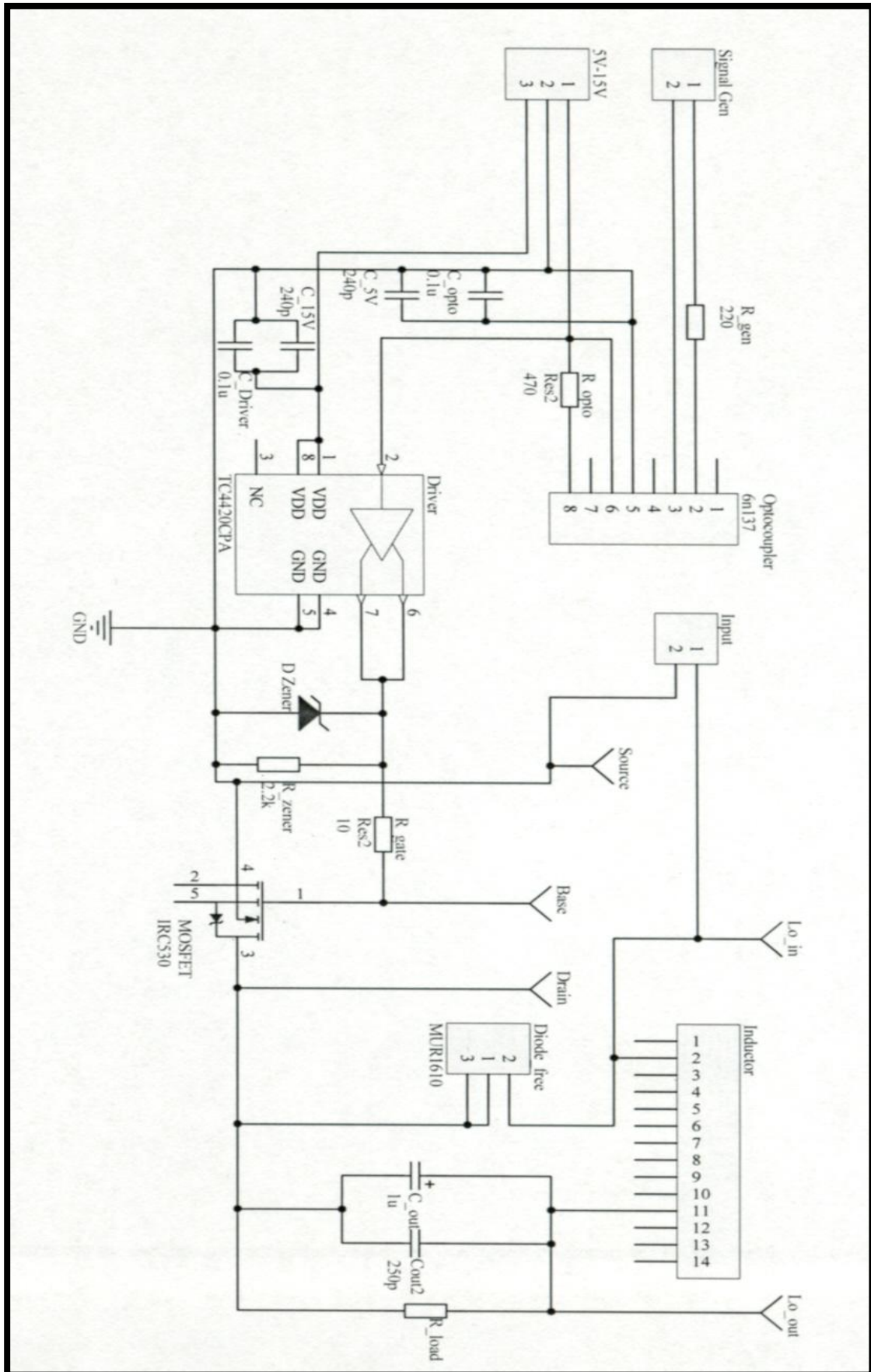
Επομένως όπως στο κεφάλαιο 4

$$C_{res} = \frac{t_{off}^2}{\pi^2 L_m} - C_{D_{for}} \left( \frac{N_s}{N_p} \right)^2 - C_{Sw\_internal} - C_{Transformer} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C_{res} = \frac{(3,33 * 10^{-6} \text{ sec})^2}{\pi^2 * 74 * 10^{-6} \text{ H}} - 60 * 10^{-12} \text{ F} \left( \frac{5}{35} \right)^2 - 320 * 10^{-12} \text{ F} - 0 \text{ F} \Rightarrow$$

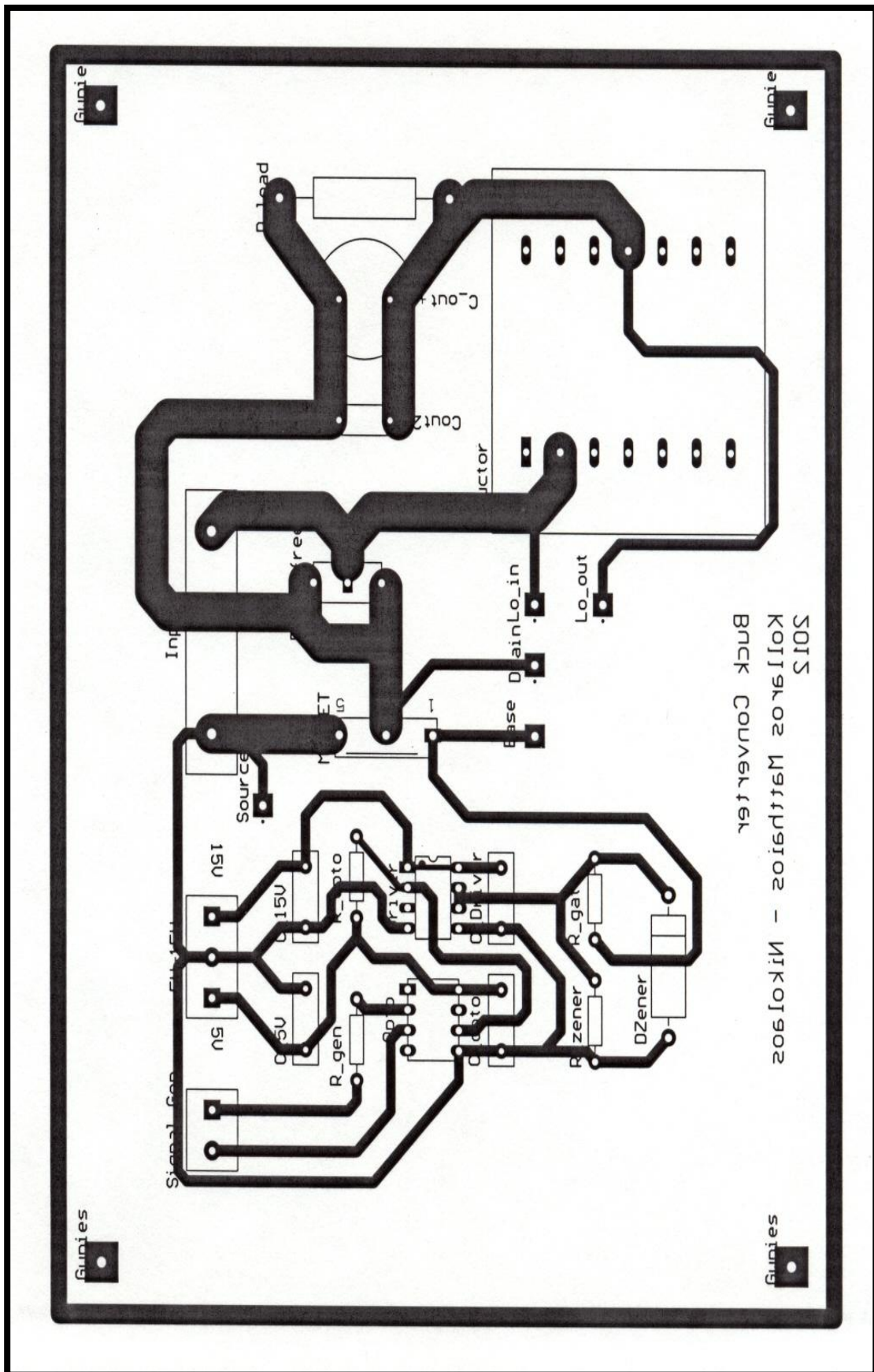
$$\Rightarrow C_{res} = 14,86 * 10^{-9} \text{ F}$$

Άρα με μια μικρή μείωση όπως και στο κεφάλαιο 4 θα τοποθετηθεί ένας πυκνωτής 10 nC στο Mosfet

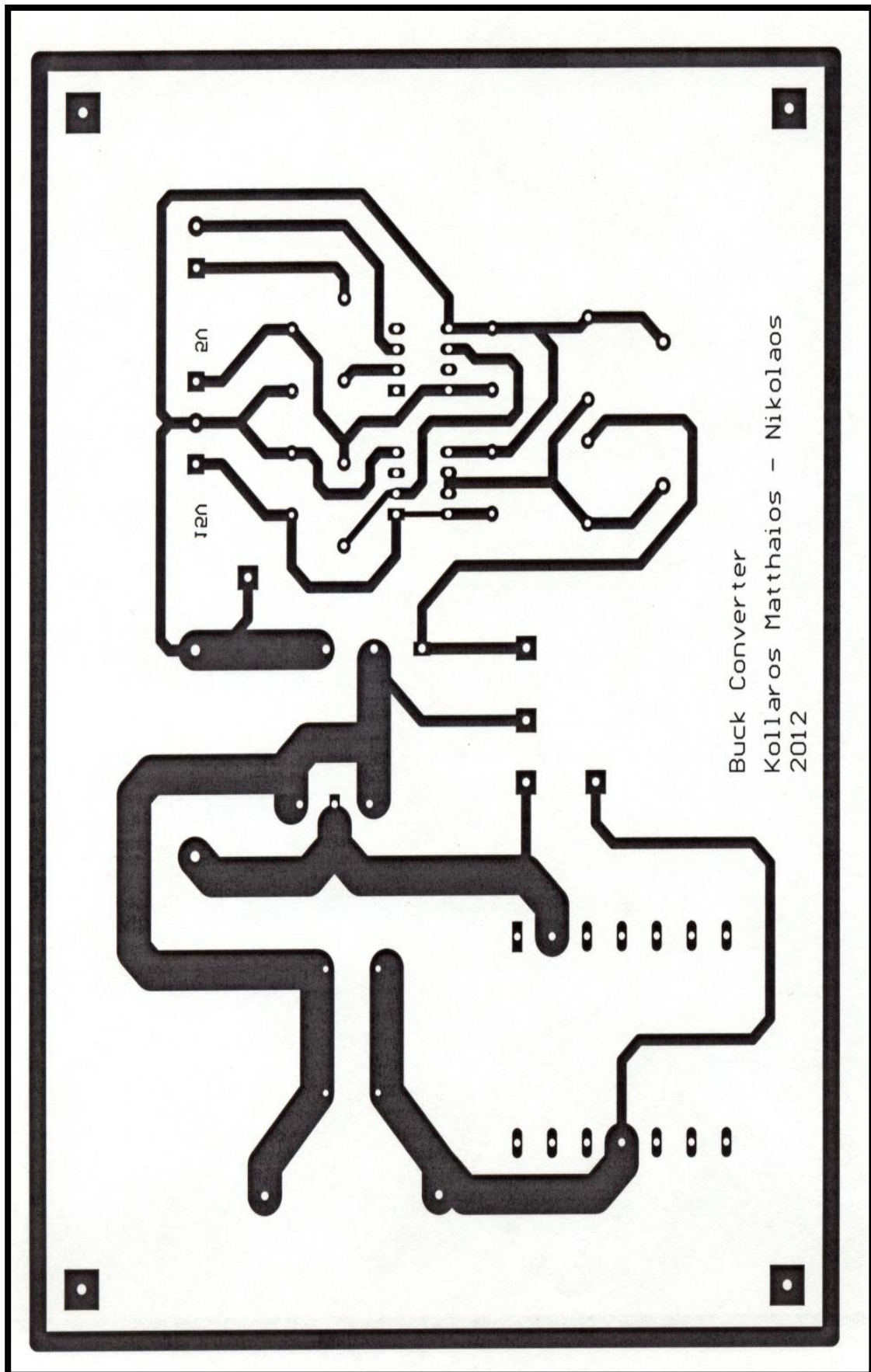


Εικόνα 5-7 Σχηματικό διάγραμμα Buck Converter.



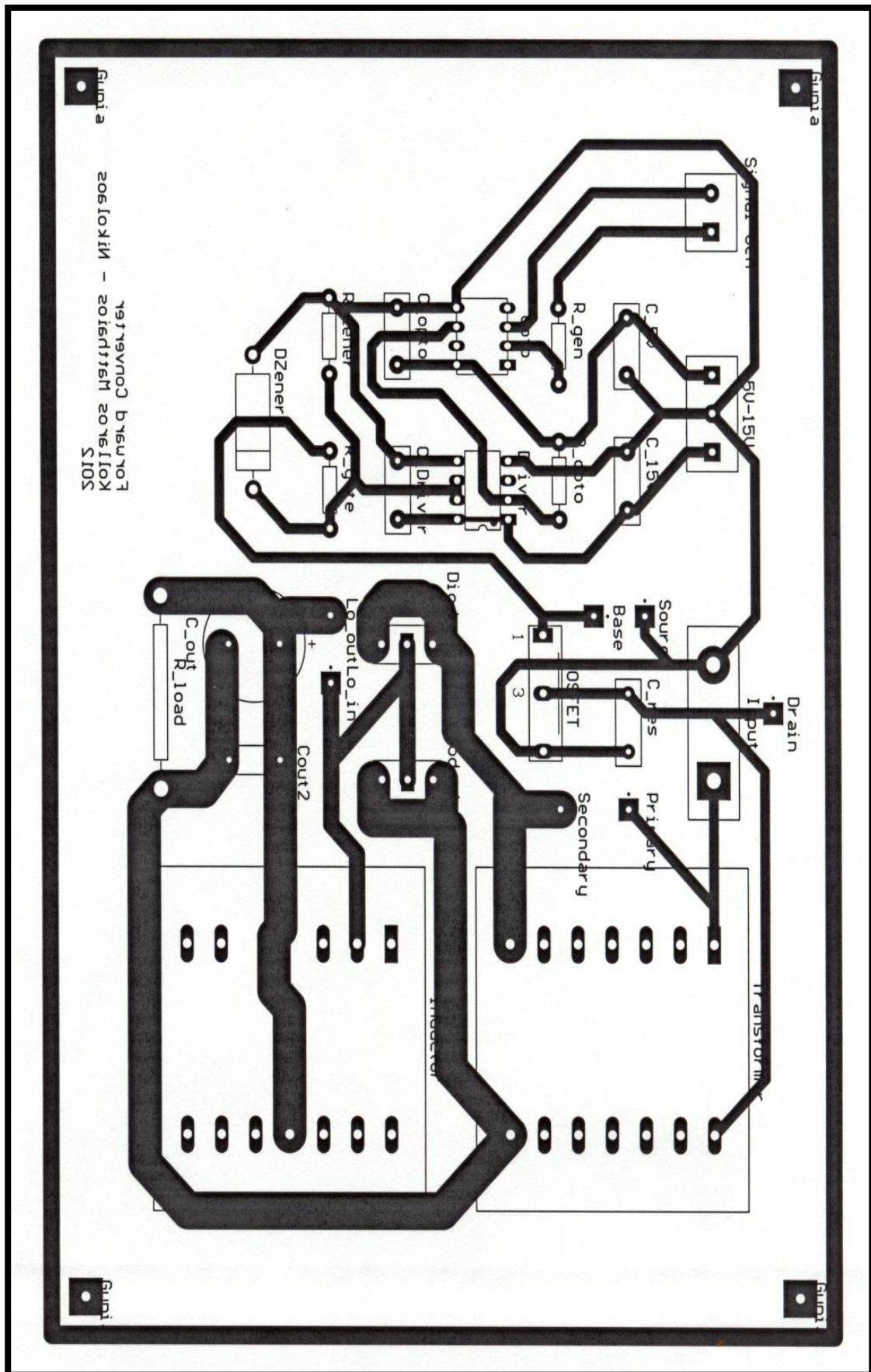


Εικόνα 5-8 Διάγραμμα PCB Buck Converter με τα «ίχνη» των διαφόρων εξαρτημάτων.

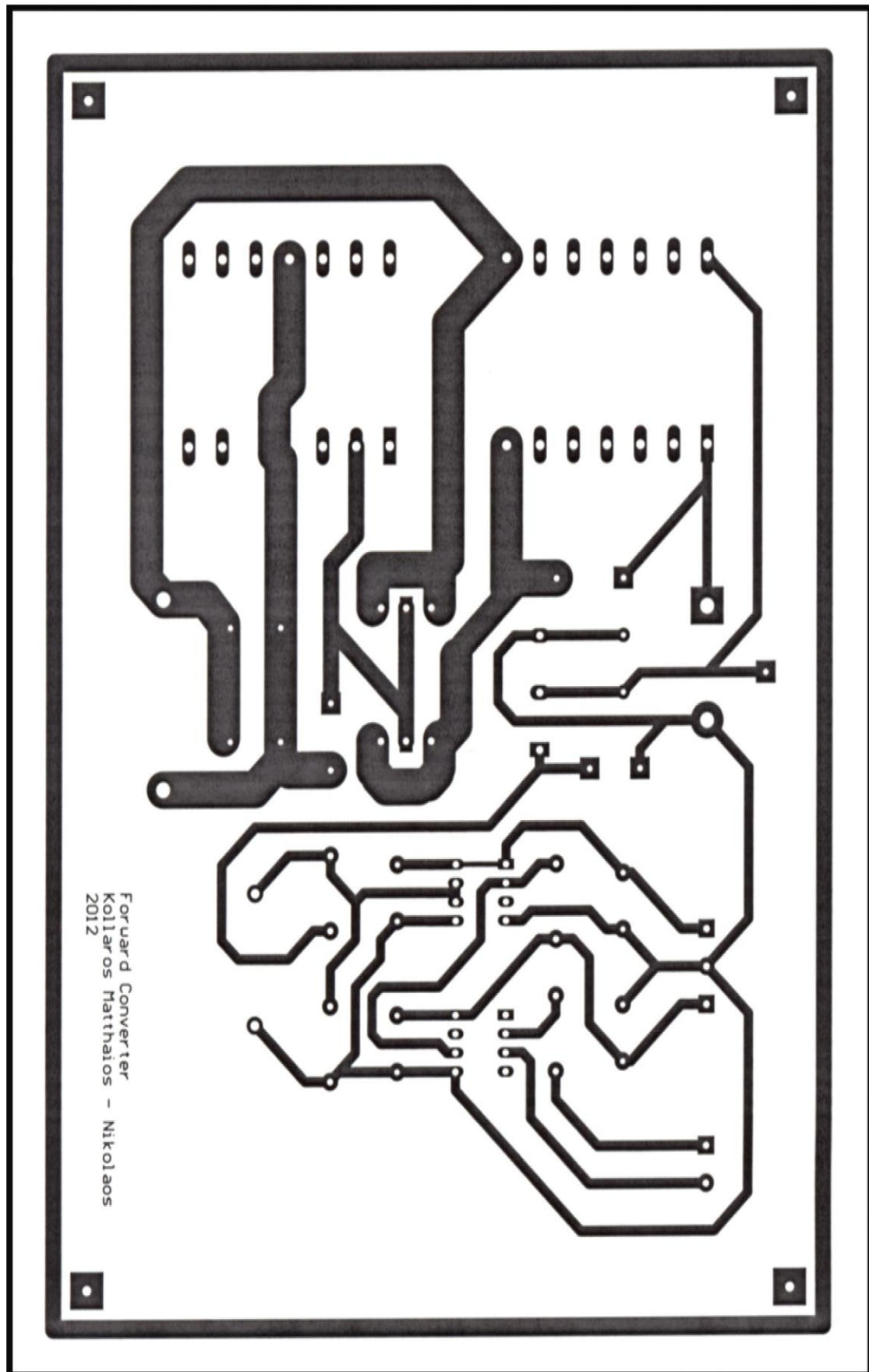


Εικόνα 5-9 PCB Buck Converter.

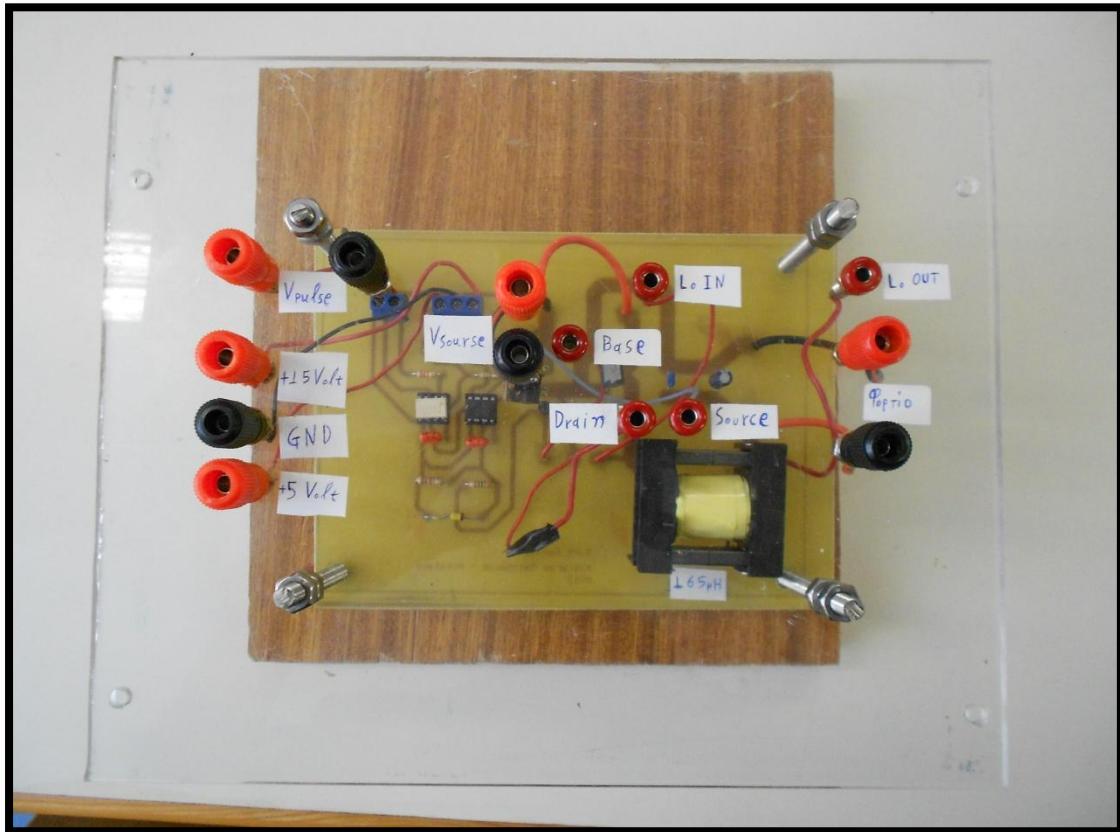




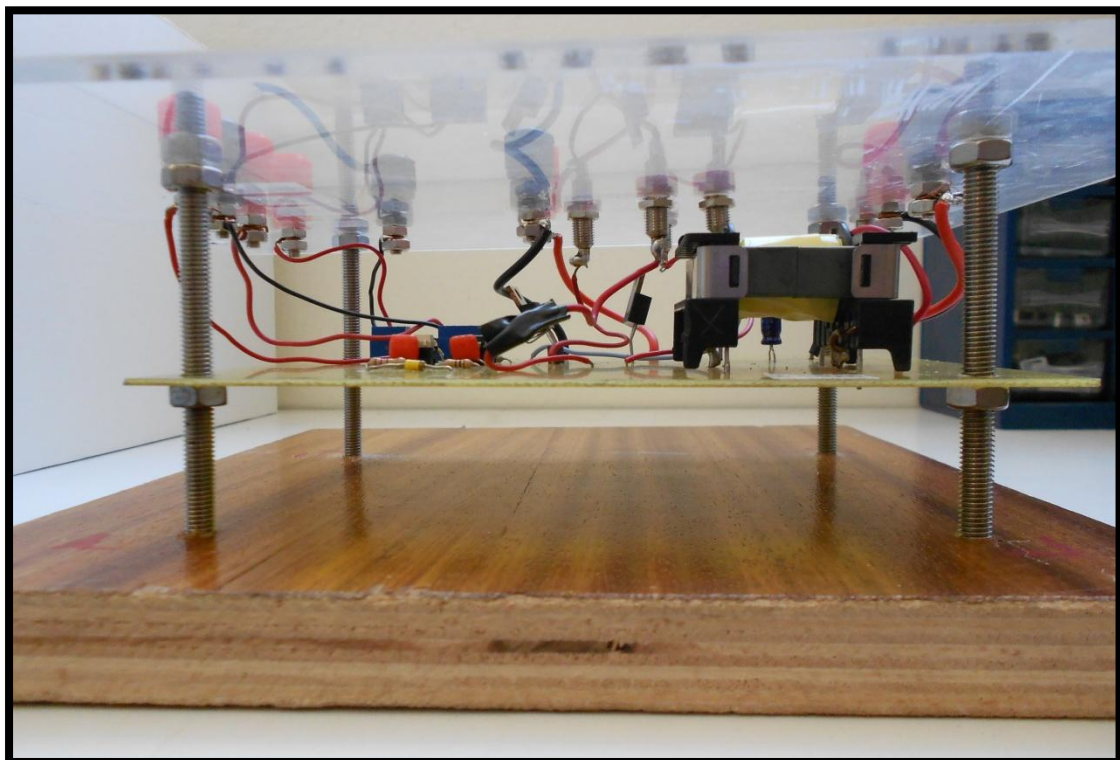
Εικόνα 5-11 Διάγραμμα PCB Forward Converter με τα «ίχνη» των διαφόρων εξαρτημάτων.



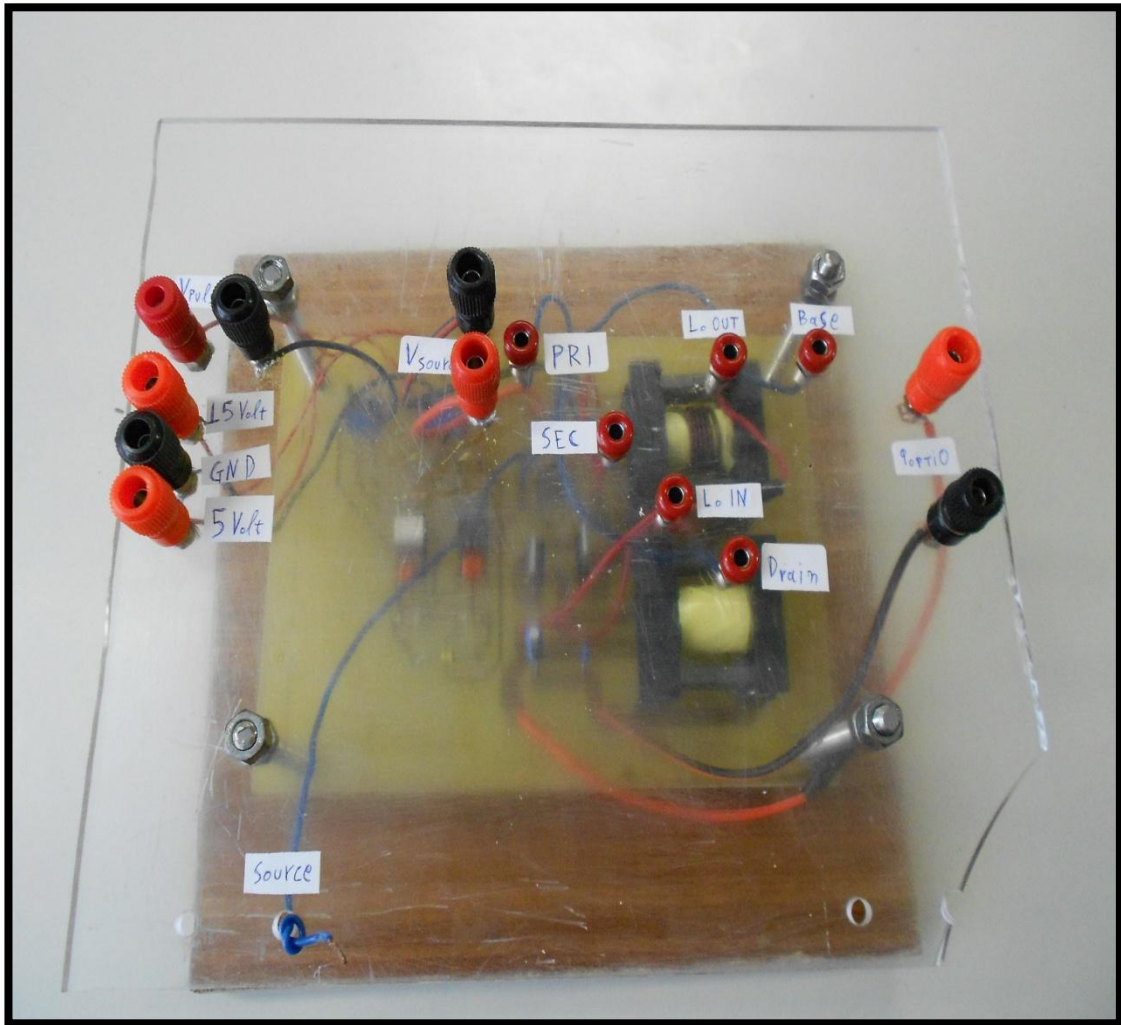
Εικόνα 5-12 PCB Forward Converter.



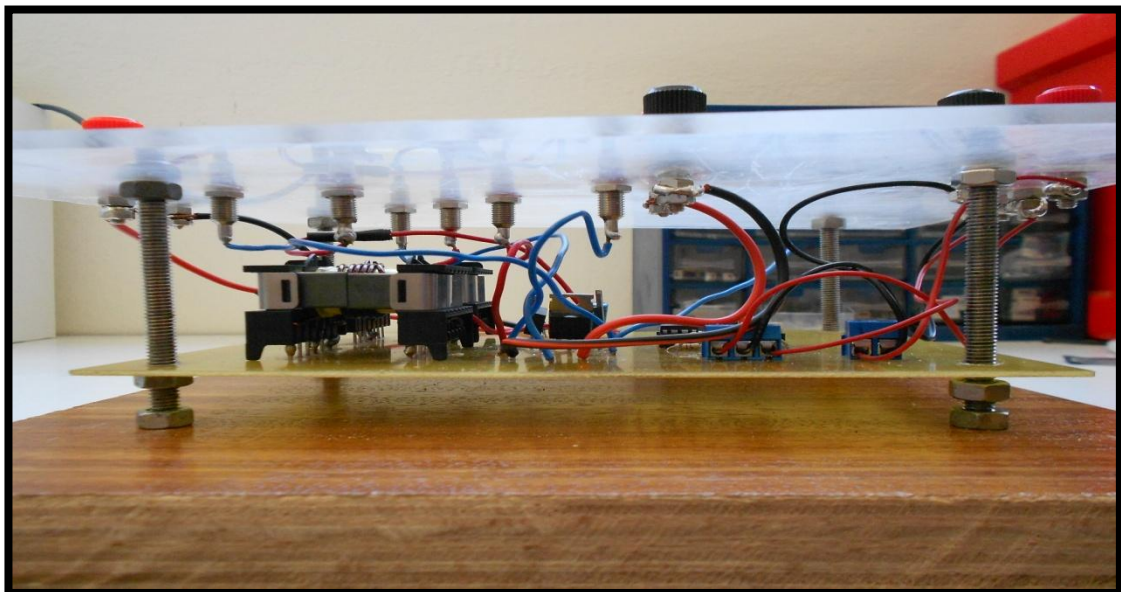
Εικόνα 5-13 Τελική μορφή κατασκευής. Ο μετατροπέας Buck τοποθετήθηκε σε ένα κομμάτι ξύλο και στερεώθηκε πάνω του με τέσσερις 4 ντίζες. Κάτω από την πλακέτα υπάρχουν παξιμάδια για να την κρατούν στην επιθυμητή απόσταση από το ξύλο. Από επάνω τοποθετήθηκε Plexiglas στο οποίο τοποθετήθηκαν επάνω οι απαραίτητες μπόρνες για εισόδους, εξόδους και τα απαραίτητα Test Points. Το Plexiglas στέκεται στη θέση του με παξιμάδια όπως και η πλακέτα.



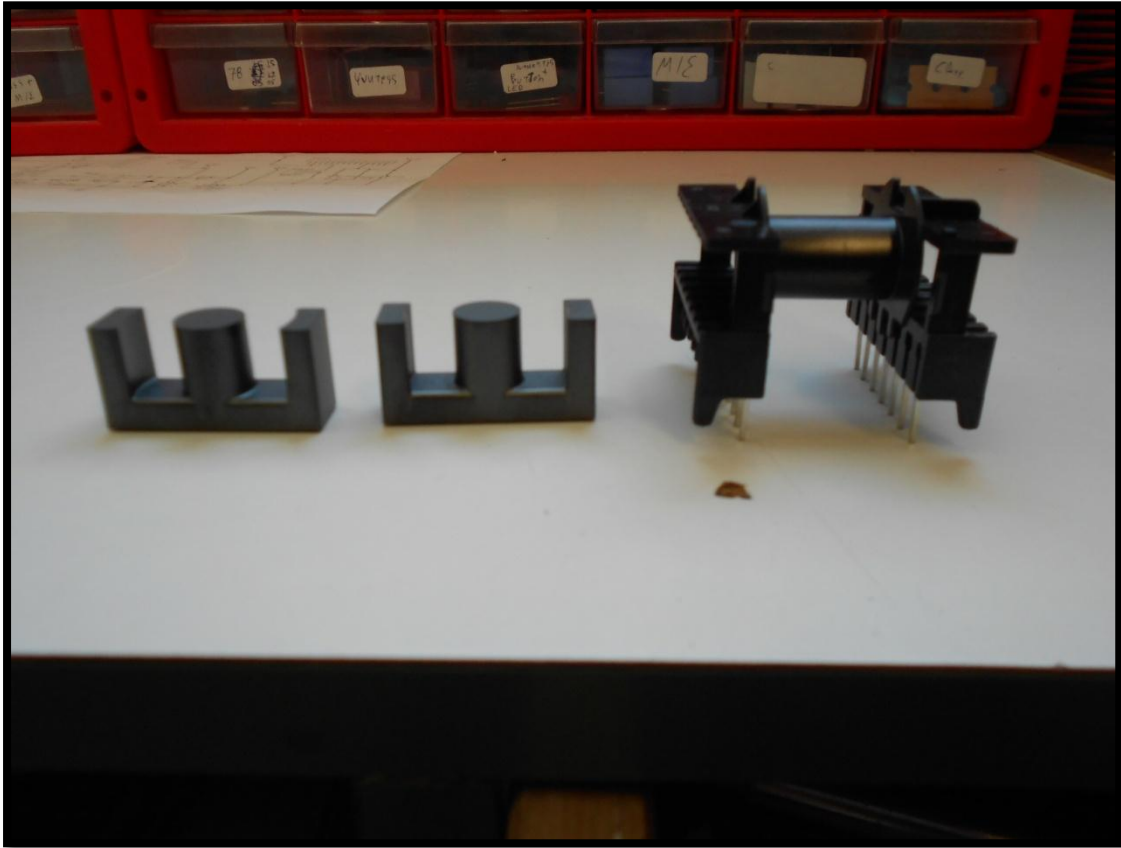
Εικόνα 5-14 Πλάγια λήψη κατασκευής μετατροπέα Buck.



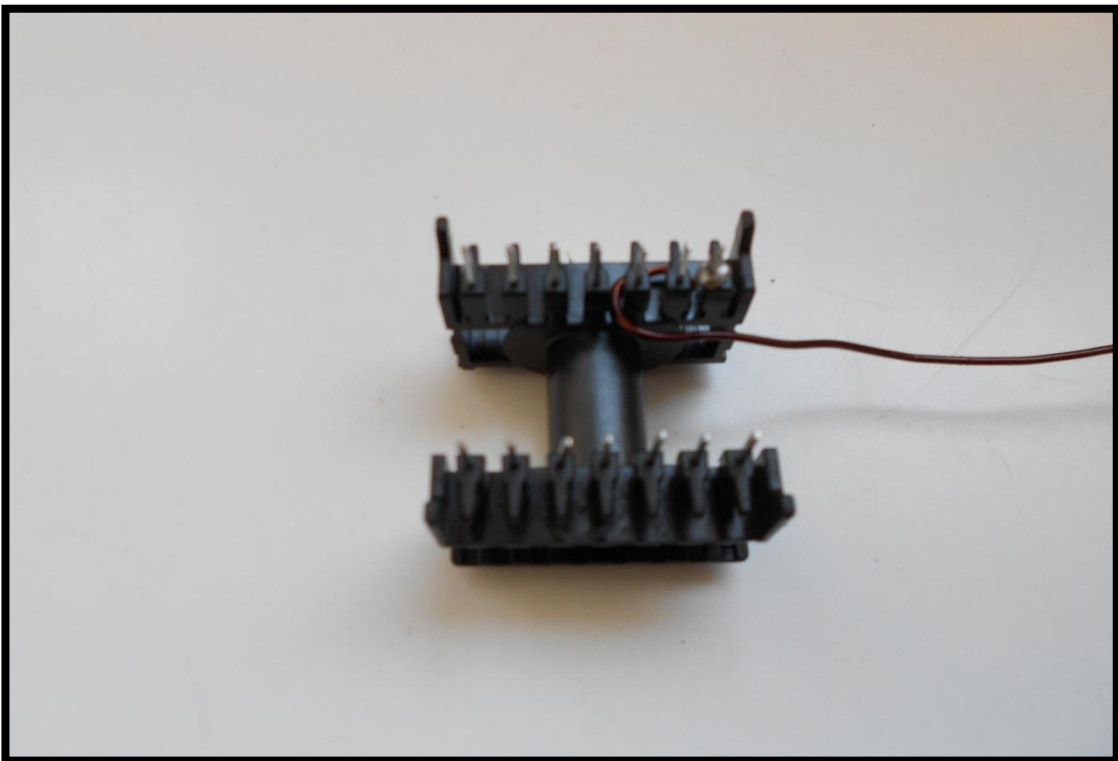
Εικόνα 5-15 Τελική μορφή κατασκευής μετατροπέα Forward. Ξεχωρίζει το δευτερεύων τύλιγμα του μετασχηματιστή.



Εικόνα 5-16 Πλάγια λήψη κατασκευής μετατροπέα Forward.

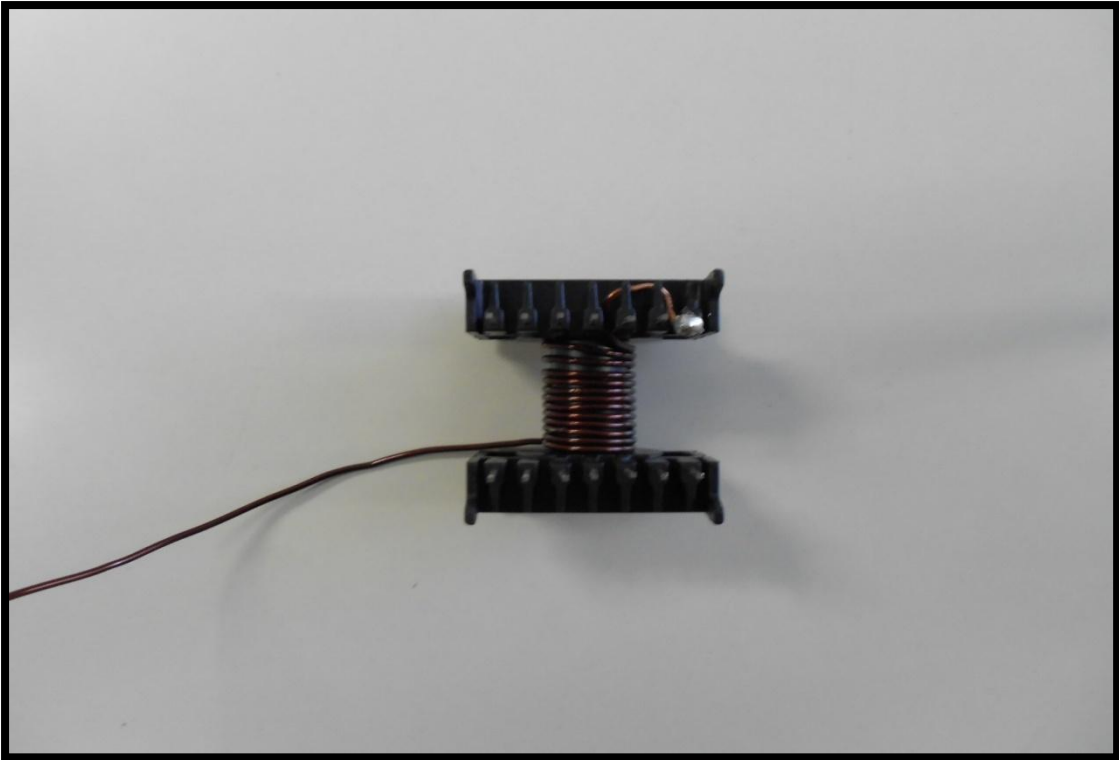


Εικόνα 5-17 Κομμάτια πυρήνα ETD34 3F3 και μπομπίνα για τύλιξη καλωδίων.

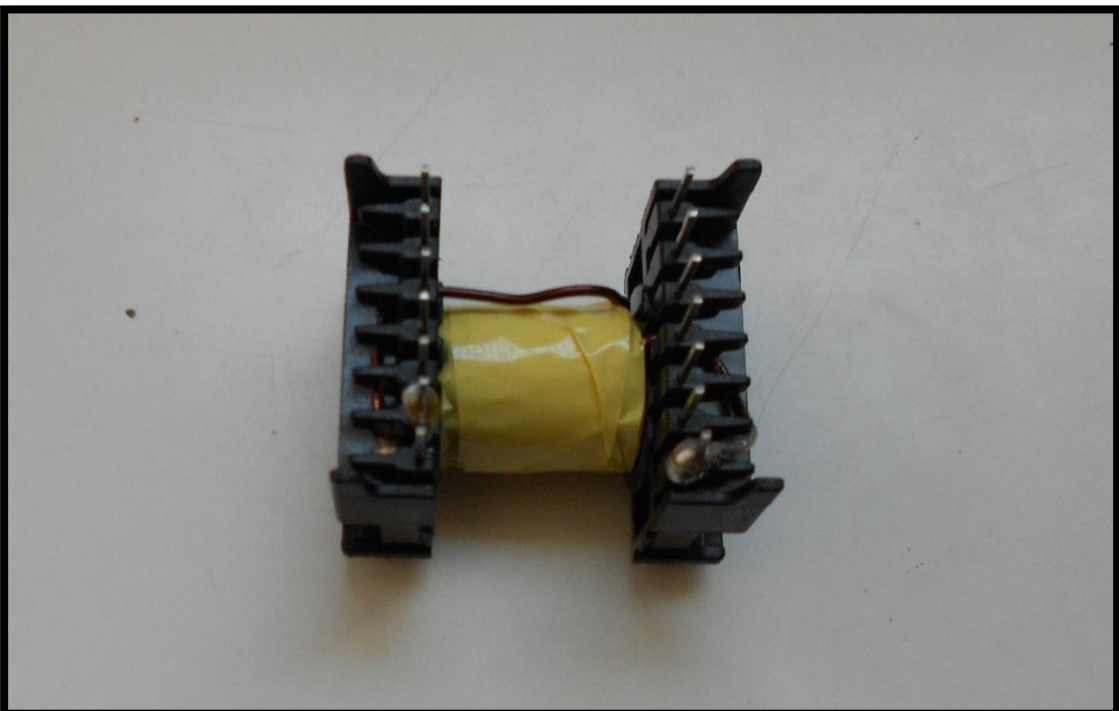


Εικόνα 5-18 Αφού καθαριστή από τη μόνωση βερνικιού η μια άκρη του καλωδίου (ξύσιμο καλωδίου με κοπίδι) γίνεται κόλληση στο απαραίτητο ποδαράκι σύμφωνα με το διάγραμμα PCB.

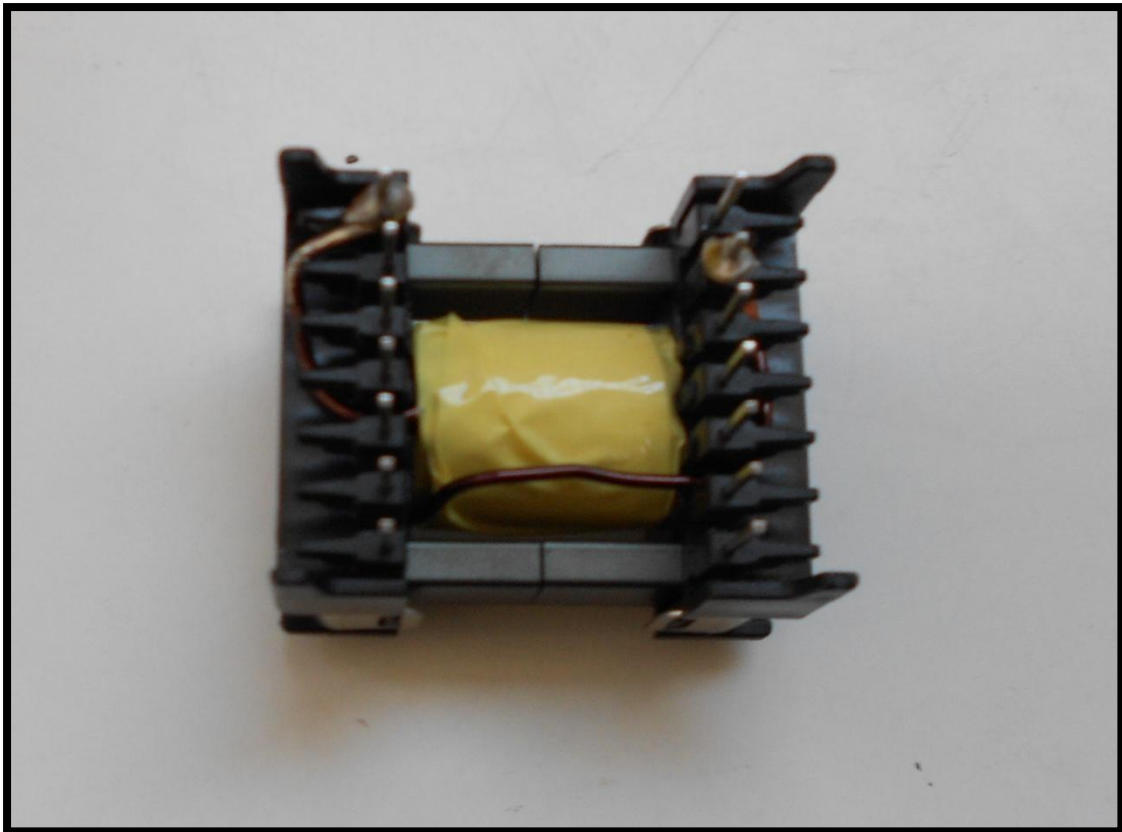




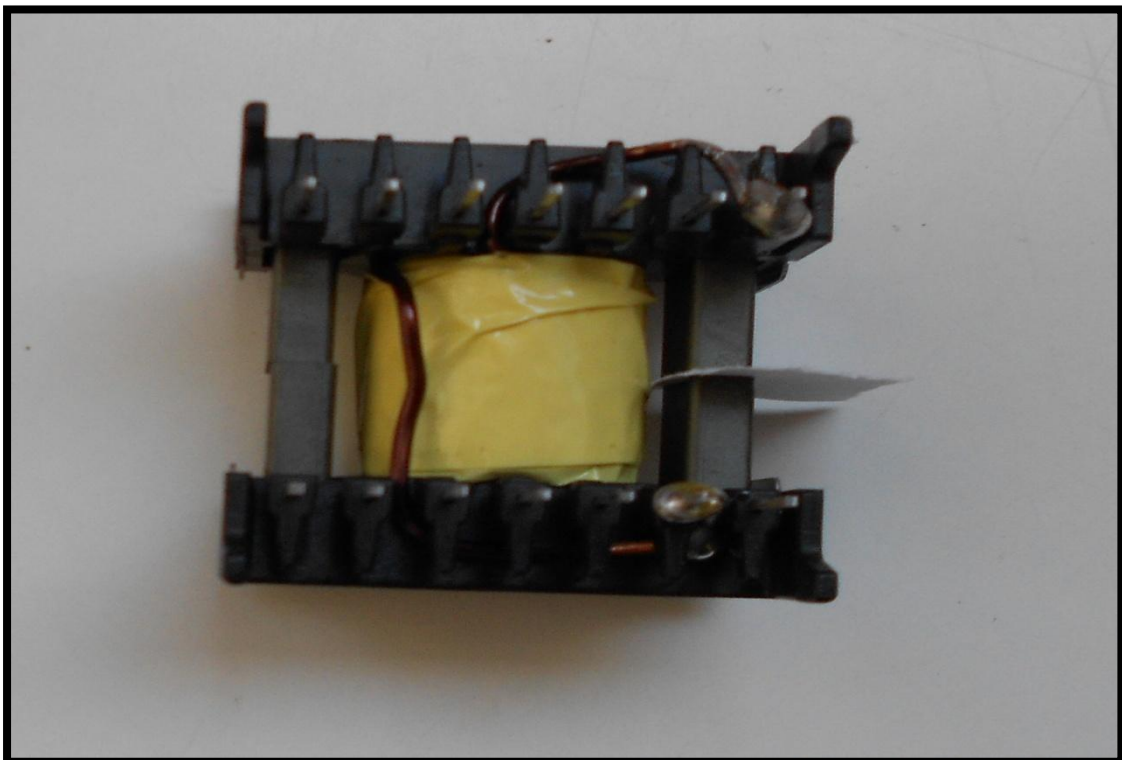
Εικόνα 5-19 Έπειτα τυλίγουμε το καλώδιο στη μπομπίνα (στην παραπάνω φωτογραφία οι περιελίξεις δεν είναι απολύτως παράλληλες διότι το καλώδιο «χαλαρώνει» εάν δεν είναι στερεωμένο σε σταθερό σημείο.).



Εικόνα 5-20 Έπειτα αφού αφαιρεθεί η μόνωση και από την άλλη άκρη του καλωδίου (καλύτερα αυτό να γίνει στο τέλος διότι είναι δύσκολο να προβλεφτεί το πόσο καλώδιο θα χρειαστεί ακριβώς ακόμα και με τη χρήση κατάλληλων τύπων) γίνεται η κόλληση και έπειτα τοποθετείτε ειδική ταινία για μόνωση πάνω στις περιελίξεις όπως φαίνετε στη φωτογραφία.



Εικόνα 5-21 Στη συνέχεια τοποθετούνται τα δύο κομμάτια του πυρήνα μέσα στη μπομπίνα και το πηνίο στερεώνεται με ειδικά κλιπ.



Εικόνα 5-22 Τέλος η παραπάνω εικόνα δείχνει το διάκενο χαρτιού που τοποθετήθηκε στο δεξί πόδι του πυρήνα. Παρομοίως τοποθετούνται και τα αλλιά.

# Κεφάλαιο 6

## Συμπεράσματα και Παρατηρήσεις

---

### 6.1 - Forward Converter

Από τα όσα αναφέρθηκαν στα προηγούμενα πέντε κεφάλαια, συμπεραίνεται ότι ο μετατροπέας Forward είναι χρήσιμος σε εφαρμογές έλεγχου DC τάσης με απαραίτητη τη γαλβανική απομόνωση εισόδου - εξόδου, όπου απαιτείται DC τάση εξόδου κατά πολύ μεγαλύτερη ή μικρότερη της τάσης εισόδου (σε σημείο που να μην μπορεί να ανταπεξέλθει ένας μετατροπέας ανύψωσης ή υποβιβασμού τάσης, όταν είναι επιθυμητά πολλαπλά δευτερεύοντα και τέλος όπου απαιτείται, η αποθήκευση ενέργειας σε μαγνητική μορφή (για τη διατήρηση της συνεχούς αγωγής στο κύκλωμα) να μην γίνεται στον πυρήνα του μετασχηματιστή, αλλά στο πηνίο εξόδου. Ειδικά με την τεχνική της συντονισμένης απομαγνήτισης (Resonant Reset ή Resonant Demagnetization), όπου δίνεται η δυνατότητα να ξεπεραστεί το “φράγμα” του 50% duty cycle χωρίς την υπέρμετρη αύξηση του ρεύματος τριτεύοντος, ο διακοπτικός μετατροπέας ελέγχου εύρους παλμών Forward αποτελεί μία από τις καλύτερες επιλογές.

Σαν περεταίρω μελέτη του Forward converter, θα μπορούσε κάποιος επόμενος συνάδελφος να “πατήσει” στην πτυχιακή αυτή και να πραγματοποιήσει μια ολοκληρωμένη κατασκευή ενός μετατροπέα Forward, σε μια πρακτική εφαρμογή καθώς υπάρχει μια πληθώρα κλάδων που μπορεί να κάνει χρήση ενός μετατροπέα (όπως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η ηλεκτρική κίνηση κ.τ.λ.).

### 6.2 - OrCAD Pspice

Το OrCAD Pspice μετά τα όσα παρουσιάστηκαν, είναι εμφανές ότι αποτελεί ένα από τα καλύτερα προγράμματα για προσομοίωση κυκλωμάτων. Προσφέρει ελεύθερη παραμετροποίηση στοιχείων ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη, σε τέτοιο σημείο, όπου με τις κατάλληλες γνώσεις φυσικής ημιαγωγών να δυνάτε η κατασκευή ενός τελείως εξατομικευμένου ημιαγωγικού στοιχείου. Το μοναδικό όριο του εν λόγω προγράμματος, είναι οι γνώσεις και η διάθεση για εργασία του χρήστη.

Σε μια επόμενη πτυχιακή εργασία θα μπορούσε ένας ενδιαφερόμενος συνάδελφος να αναλάβει μια πλήρη προσομοίωση του Forward Converter χρησιμοποιώντας απόλυτα τις δυνατότητες του προγράμματος. Μια προσομοίωση συμπεριλαμβανόμενου του κυκλώματος ελέγχου με τα μοντέλα όλων των στοιχείων (optocoupler, mosfet driver κ.τ.λ.), με περεταίρω επέκταση στη θερμική συμπεριφορά του κυκλώματος κατά τη λειτουργία του, τόσο στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας όσο και στα διάφορα μεταβατικά φαινόμενα που μπορεί να προκληθούν από σφάλματα.

### 6.3 - Μαγνητικά Στοιχεία

Τα μαγνητικά στοιχεία είναι αναμφισβήτητα το σημαντικότερο κομμάτι στην κατασκευή ενός μετατροπέα. Ειδικότερα ενός μετατροπέα που κάνει χρήση μετασχηματιστή, καθώς ένας καλά κατασκευασμένος μετασχηματιστής, επιτρέπει υψηλότερες συχνότητες λειτουργίας και επομένως την ελαχιστοποίηση του όγκου της κατασκευής. Πρώτο τέλμα στην παραπάνω αναφορά, είναι η σημαντική αύξηση των διακοπτικών απωλειών όσο η συχνότητα μεγαλώνει. Τα συντονισμένα κυκλώματα (Resonant Circuits) ή τα κυκλώματα ημισυντονισμού (Quasi Resonant Circuits όπως ο Forward Converter) προσφέρουν μια ελκυστική λύση στο εν λόγω πρόβλημα. Δεύτερο τέλμα είναι η αυξημένη AC αντίσταση ενός καλωδίου όσο αυξάνεται η συχνότητα. Τα τυλίγματα με υπέρλεπτα φύλλα αγωγού ή πεπλεγμένα καλώδια τύπου Litz, αναιρούν σε ένα μεγάλο βαθμό αυτόν τον περιορισμό.

Η κατασκευή ενός και μόνο μετασχηματιστή για έναν μετατροπέα Forward, θα μπορούσε να αποτελέσει μια ολόκληρη πτυχιακή εργασία τόσο από των απαραίτητο όγκο γνώσεων, όσο από τους υπολογισμούς και τα εξειδικευμένα μηχανήματα που χρειάζεται. Ένας μετασχηματιστής με απόδοση παραπάνω από 95% με τα κατάλληλα τυλίγματα και ανάλογα βελτιστοποιημένες όλες τις παραμέτρους του (εσωτερική χωρητικότητα, επαγωγή μαγνήτισης, επαγωγές διαρροής κ.τ.λ.).

# ΚΑΛΟ ΠΤΥΧΙΟ ! ! !

# Ευχαριστίες

---

- Στη μητέρα μου Βασιλική – Γεωργία Κολλάρου το μόνο ανθρώπινο ον που μου δίνει τα πάντα και δεν ζητά τίποτα (πραγματικά αυτή η γυναίκα παραβαίνει τους νόμους του σύμπαντος). Μάνα σε ευχαριστώ για όλα !!!
- Στο καθηγητή Μιναδάκη “κάπως θα σε βοηθήσουμε και εσένα” Γιάννη.
- Στους καθηγητές Δρακάκη “Little Dragon” Εμμανουήλ και Σιδεράκι “Little Iron” Κυριάκο.
- Στον άνθρωπο που κατάφερε να μου δήξει πόσο απλά είναι τα ηλεκτρονικά ισχύος Πολύζο “Αλλού μπερδεύεσαι” Νικόλαο.
- Στον Φραγκιαδάκη “Πες το λίγο διαφορετικά” Ιωάννη.
- Στους Γεώργιο “μέλισσα” Μελισσό και Αντώνιο “Φλομαρίτη” Γαλέτσα. Τα καλύτερα Study Groups EVER !!!
- Στον Αναστάσιο “Χαλάρωσε man” Δάφνο. Και με πτυχίο σύντομα φίλε.
- Στους Χαρδαλούπα “Θα παραγγείλουμε DONALD ?!?!?” Δημήτριο, Καλάβρια “Πάμε να τα σπάσουμε?!?!?” Γεώργιο, Νιαμούρη “Είμαι σαββατογεννημένος” Κωνσταντίνο, Λάμπρου “τη είπε τώρα το άτομο !!!” Μαρίνο, Κυπριότακη “άντε ρε gay κομπόγναθε” Σπύρο. Μια παρέα από την τρέλα πιο ωραία !
- Στους Μαριλένα, Παναγιώτη και Κάρμεν.
- Στον Γρηγοράκη “όποιος βιάζετε να πάει αλλού!” Γεώργιο.
- Στους Λεμονάκη Μάνο, Ζερβάκη Αντώνη και Δασκαλόπουλο Κριτόλαο για την βοήθεια τους στη κατασκευή.
- Σε όσους ξεχνώ.
- Περισσότερο σε όσους δεν πίστεψαν σε εμένα. Άθελα σας με βοηθήσατε να τα καταφέρω.