



**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ Τ.Ε.
ΑΤΕΙ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ**



Προσομοίωση κυκλωμάτων συγκομιδής
ενέργειας με το ολοκληρωμένο LTC3109

Simulation of power management for energy
harvesters using the LTC3109 IC

Φοιτητής: Δημοκράτης Δ. Τσαλίκης

Επιβλέπων καθηγητής: Μιχαήλ Ε. Κιζήρογλου

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία περιγράφει τον τρόπο, τις λειτουργίες αλλά και την προσπάθεια ώστε να δημιουργηθεί μία συσκευή τύπου συγκομιδής ενέργειας με το ολοκληρωμένο LTC3109, προκειμένου να αναλυθεί η θεωρητική του χρήση σε διάφορες εφαρμογές, αλλά και να δημιουργήσουμε μία πρωτότυπη πλακέτα που να λειτουργεί σε διάφορες κλίμακες.

Abstract

The current thesis is about a prototype energy harvesting device with the use of LTC3109 IC, and describes the process of it-s creation, the different applications in which it can be used, a theoretical analysis of the device's functionality, as well as the creation of a printed circuit board (PCB).

Ευχαριστίες

Θέλω να ευχαριστήσω πολύ την οικογένεια μου για την πολύτιμη υποστήριξη τους, καθώς και τον Κύριο Κιζήρογλου για την βοήθεια που μου πρόσφερε στην παρούσα εργασία.

Πίνακας περιεχομένων

- Περίληψη (Σελ. 2)
- Abstract (Σελ. 3)
- Ευχαριστίες (Σελ. 4)
- Πίνακας περιεχομένων (Σελ. 5)
- Επεξήγηση ακρωνύμων (Σελ. 6)
- Εισαγωγή (Σελ. 7)
- Κεφάλαιο 1^ο Το ολοκληρωμένο LTC3109 (Σελ. 8)
- Κεφάλαιο 2^ο Σχεδιασμός στο πρόγραμμα LTSPICE (Σελ. 19)
- Κεφάλαιο 3^ο Σχεδιασμός του PCB (Σελ. 41)
- Συμπεράσματα (Σελ. 54)
- Βιβλιογραφία (Σελ. 55)

Επεξήγηση ακρωνύμων

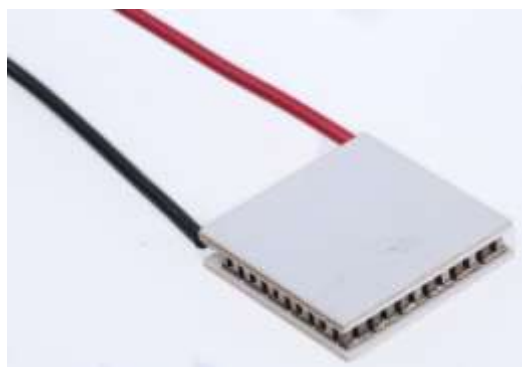
PCM	Phase Change Material
TEG	Thermoelectric Generator
PCB	Printed Circuit Board
SMD	Surface Mount Device
SMT	Surface Mount Technology
VIA	Vertical Interconnect Access
ESR	Equivalent Series Resistance
ESL	Equivalent Series Inductance

Εισαγωγή

Ο 21^{ος} αιώνας δικαίως θεωρείται η εποχή με την μεγαλύτερη τεχνολογική ανάπτυξη και τις περισσότερες καινοτομίες, μιας και με την εξέλιξη των υπολογιστικών συστημάτων, έχουμε ραγδαίες αλλαγές στην βιομηχανία και στον τρόπο που χειριζόμαστε τα πάντα γύρω μας, από απλές καθημερινές ανάγκες όπως αγορές, μέχρι πολύπλοκα συστήματα με τεράστιους όγκους δεδομένων. Πέρα από την υπολογιστική ισχύει που χρειάζεται για να επιτευχθούν όλες αυτές οι τεχνολογίες, υπάρχει κάτι χωρίς το οποίο δεν είναι τίποτα δυνατό, και αυτό είναι η ενέργεια με τη μορφή του ηλεκτρισμού. Τα περισσότερα πράγματα πλέον γύρω μας, χρησιμοποιούν μπαταρίες ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας, έτσι ώστε να μπορούν να λειτουργούν αυτόνομα χωρίς την ύπαρξη μόνιμης τροφοδοσίας. Το πιο απλό παράδειγμα που μας έρχεται στο μυαλό είναι το κινητό τηλέφωνο, το οποίο μπορούμε να το φορτίζουμε μία φορά την μέρα κατά μέσο όρο, και να έχουμε έναν υπολογιστή στην παλάμη του χεριού μας με τεράστιες δυνατότητες. Το ίδιο ισχύει και σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπου χρειαζόμαστε κάποια συστήματα τα οποία να μας ενημερώνουν για διάφορες καταστάσεις, πχ. Αισθητήρες θερμοκρασίας τροφίμων σε ένα πλοίο τύπου container. Τί γίνεται όμως σε αυτές τις περιπτώσεις όπου η συντήρηση του εξοπλισμού και η φόρτιση των συσκευών είναι αδύνατη; Αυτό αυτομάτως καθιστά αδύνατη την χρήση τέτοιου είδους εφαρμογών διότι το κόστος συντήρησης θα είναι μεγάλο, και η πρακτικότητα μηδενική. Πλέον όμως έχουμε φτάσει σε ένα στάδιο όπου η τεχνολογία μας επιτρέπει να μπορούμε να συντηρούμε τέτοιου είδους εφαρμογές χωρίς την ύπαρξη ανθρώπου, και χωρίς να έχουμε αυτό το ενεργειακό πρόβλημα της χειροκίνητης φόρτισης. Η ενέργεια είναι εκεί και περιμένει εμάς να την αξιοποιήσουμε. Η συγκομιδή της ενέργειας γνωστή και ως Energy Harvesting είναι η διαδικασία κατά την οποία μικρά ποσά ενέργειας τα οποία ειδάλλως θα χανόντουσαν, όπως η θερμότητα, το φως, ο ήχος, οι δονήσεις, ο αέρας, οι μαγνητικές δυνάμεις, ακόμη και η κίνηση, μετατρέπονται σε ηλεκτρική ενέργεια και αποθηκεύονται για χρήση. Η πιο γνωστή εφαρμογή συγκομιδής ενέργειας σε όλους μας είναι τα φωτοβολταϊκά πάνελ, όπου μετατρέπουμε την ηλιακή ενέργεια σε ωφέλιμη ηλεκτρική. Άλλη μία τέτοια είναι οι ανεμογεννήτριες, όπου αξιοποιούμε τον αέρα ώστε να παράγουμε ηλεκτρική ενέργεια. Τί γίνεται όμως στην περίπτωση που το μέγεθος της εφαρμογής δεν καθιστά δυνατή την χρήση τέτοιων συστημάτων για συγκομιδή ενέργειας;

Κεφάλαιο 1^ο Το ολοκληρωμένο LTC3109

Την λύση στο πρόβλημα αυτό έρχεται να δώσει το ολοκληρωμένο της Linear Technology, LTC3109. Το LTC3109, είναι λειτουργικά ένας DC/DC converter ο οποίος ιδανικά χρησιμοποιείται σε συστήματα συγκομιδής ενέργειας, και έχει την ικανότητα να δέχεται πολύ χαμηλές τάσεις της τάξης των millivolt (mV), και στην έξοδο του να παράγει τάσεις που είναι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες, όπως 3.3V ή 5V. Το κύριο ιδιόκτητο χαρακτηριστικό που έχει καταφέρει η Linear Technology και το κάνει τόσο λειτουργικό και χρήσιμο, είναι ότι μπορεί να δέχεται αυτές τις τάσεις ανεξαρτήτου πολικότητας (Auto-Polarity), με τάσεις που ξεκινάν από τα 30mV. Γι' αυτόν το λόγο είναι ιδανικό σε χρήση μαζί με πηγές τάσης όπως για παράδειγμα θερμοηλεκτρικές γεννήτριες (TEG). Το ολοκληρωμένο παρέχεται σε μορφή 20-lead (4mm x 4mm) QFN πακέτου, και σε μορφή 20-lead SSOP πακέτου. Η μόνη διαφορά στα πακέτα είναι στα θερμικά χαρακτηριστικά τους. Η QFN έκδοση έχει $\Theta_{JA} = 37^{\circ}\text{C}/\text{W}$, ενώ η SSOP έκδοση $\Theta_{JA} = 90^{\circ}\text{C}/\text{W}$. Κάι στα δύο πακέτα το $T_{JMAX} = 125^{\circ}\text{C}$ Στην παρούσα εργασία θα δουλέψουμε με την SSOP μορφή κυρίως για την ευκολία στον χειρισμό της.



Σχήμα 1.1 Φωτογραφία TEG [1]



Σχήμα.1.2 Φωτογραφία SSOP LTC3109 [2]



Σχήμα 1.3 Φωτογραφία QFN LTC3109 [2]

Μερικές τυπικές εφαρμογές που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένα τέτοιο σύστημα είναι:

- Συστήματα απομακρυσμένων αισθητήρων
- Τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές
- Συστήματα αισθητήρων θέρμανσης και κλιματισμού
- Αυτόματα συστήματα καταμέτρησης περιβαλλοντικών μεταβλητών (Weather Station)
- Αυτοματισμοί κτηρίων
- Εφαρμογές για την εποπτεία και πρόβλεψη συντήρησης σε βιομηχανικό εξοπλισμό
- Ασύρματα βιομηχανικά συστήματα
- Ασύρματη επικοινωνία ενδο-θαλάσσιου εξοπλισμού
- Συστήματα έκτακτης ανάγκης (Μαύρο κουτί αεροπλάνου)

Οι εφαρμογές που μπορεί να έχει ένα τέτοιο σύστημα είναι πάρα πολλές, αλλά είναι κυρίως χρήσιμο σε απομακρυσμένα συστήματα όπου η συντήρηση του εξοπλισμού είναι δύσκολο να γίνει γρήγορα (θαλάσσιο σύστημα με μπαταρίες), και άλλες φορές χρειαζόμαστε άμεσα ενέργεια για ασύρματα συστήματα (μαύρο κουτί αεροπλάνου που δίνει στίγμα με συντεταγμένες).



Σχήμα 1.4 Καταγραφικό πτήσης [3]



Σχήμα 1.5 Σταθμός καιρού [4]



Σχήμα 1.6 Ασύρματοι αισθητήρες [4]



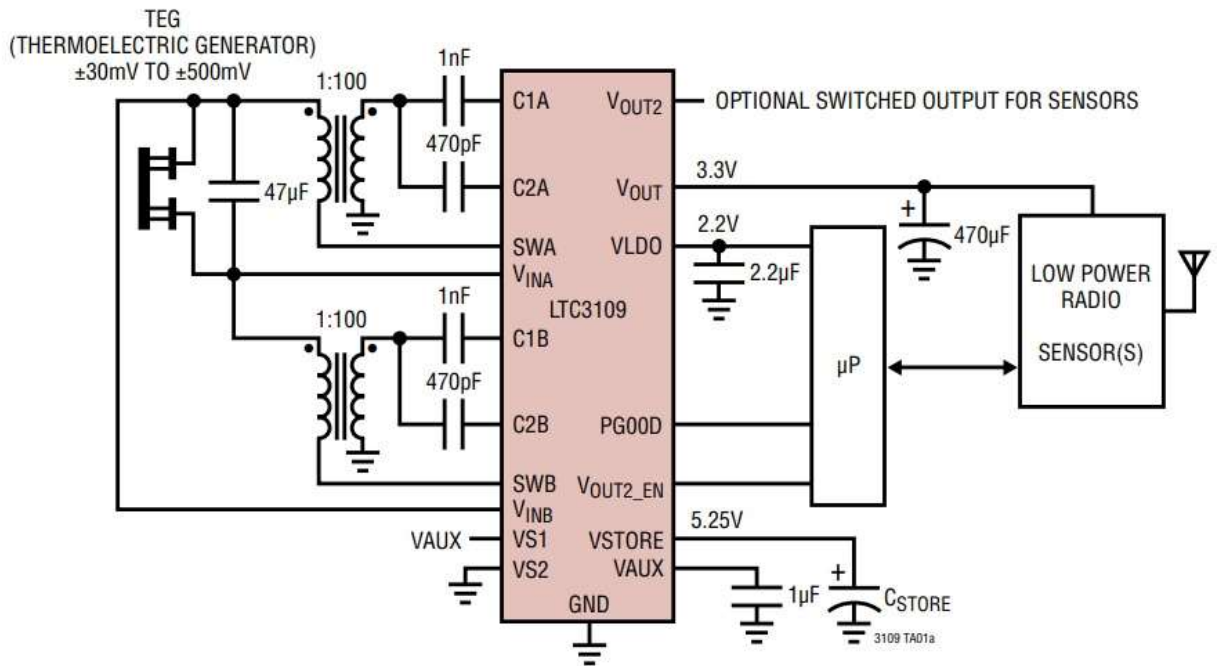
Σχήμα 1.7 Ενδοθαλάσσιοι αισθητήρες [8]

Το LTC3109 είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί με την χρήση δύο εξωτερικών step-up μετασχηματιστών με σχέση 1:100, όπου δέχονται χαμηλές τάσεις από $\pm 25\text{-}30\text{mV}$ από το TEG. Απαιτείται μια διαφορά θερμοκρασίας μόλις $\pm 1^\circ\text{C}$ στο TEG ώστε να έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα των 30mV και να έχουμε συγκομιδή ενέργειας.

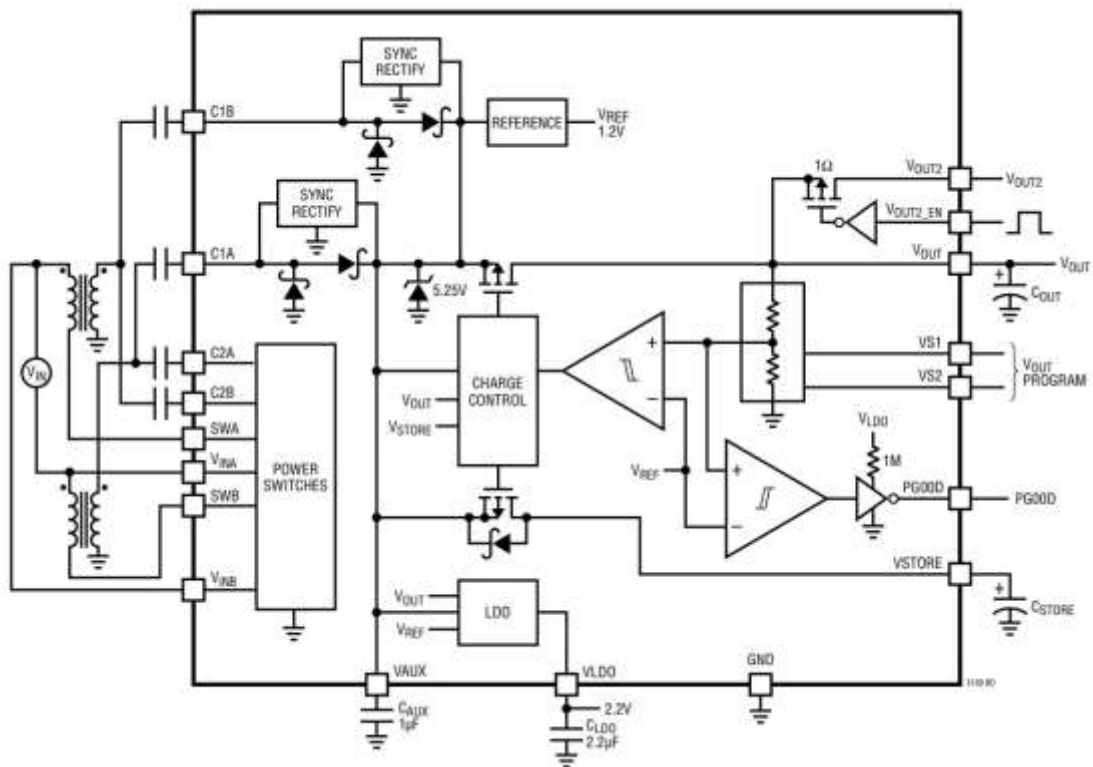


Σχήμα 1.8 SMD Transformer 1:100 [9]

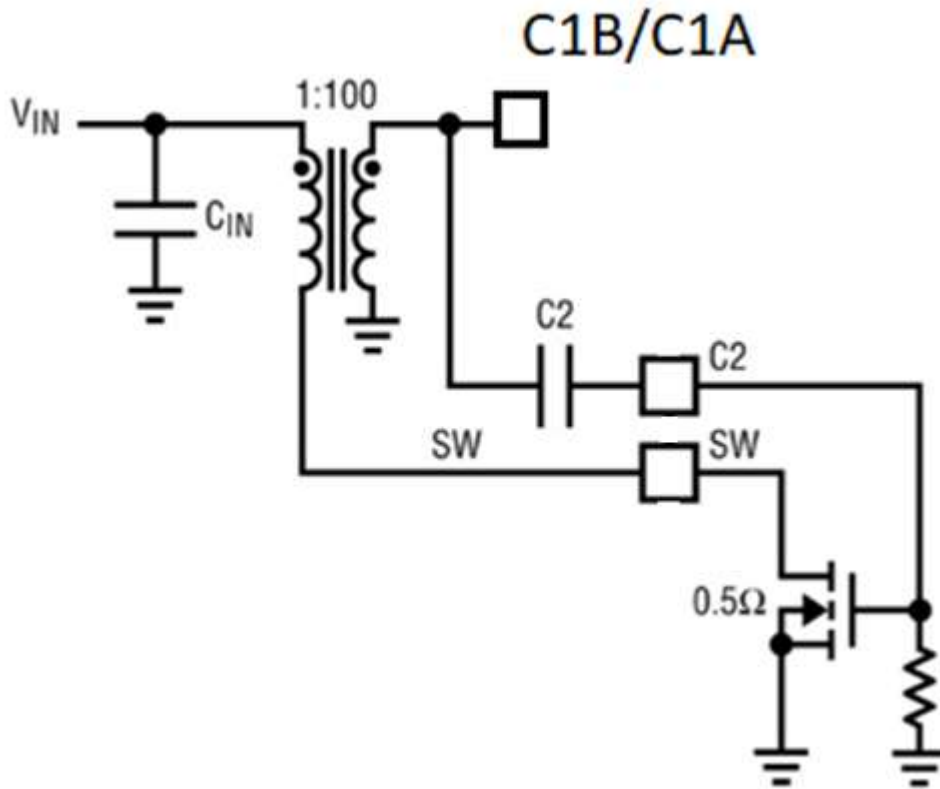
Το ολοκληρωμένο είναι ικανό να διαχειρίζεται και να ρυθμίζει πολλαπλές εξόδους τάσεων εφόσον το φορτίο είναι χαμηλό, αλλά μπορεί να δίνει περιοδικά παλμούς ενέργειας ώστε να τροφοδοτήσουμε τα φορτία μας. Η συνηθέστερη εφαρμογή είναι να τροφοδοτούμε ένα ασύρματο σύστημα όπου ανά διαστήματα χρειαζόμαστε να στέλνουμε χαμηλά σήματα πληροφορίας με μορφή παλμών μικρού duty cycle, καθώς και να λαμβάνουμε πληροφορίες από άλλους αισθητήρες. Σε περιπτώσεις όμως που χρειαζόμαστε μεγαλύτερα ποσά ενέργειας, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε υπέρ-πυκνωτές ή ακόμα και επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, έτσι ώστε όταν το σύστημα μας δεν χρησιμοποιεί την ενέργεια που παράγει, να την αποθηκεύουμε για μελλοντική χρήση. Η χρήση ενός υπέρ-πυκνωτή 1_F είναι η πιο συνηθισμένη, ώστε να αποθηκεύουμε μεγάλα ποσά ενέργειας εύκολα. Από την άλλη πλευρά η χρήση επαναφορτιζόμενων μπαταριών, συνήθως τύπου Li-Ion, είναι δυνατή αλλά χρειάζεται περισσότερα ηλεκτρονικά κυκλώματα κυρίως για τον τρόπο φόρτισης και ρύθμισης της μπαταρίας, προστασίες για over-charge, over-discharge, οπότε στην παρούσα εργασία θα δουλέψουμε με υπέρ-πυκνωτή



Σχήμα 1.9 Τυπική εφαρμογή [7]

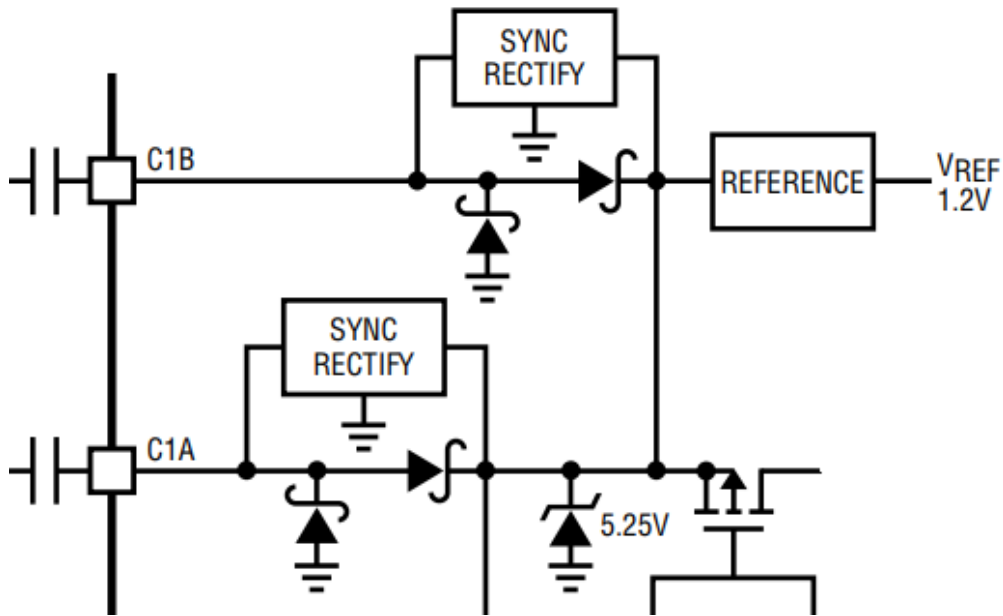


Παρακάτω φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η ταλάντωση. Ισχύει το ίδιο και για το SWA και για το SWB. Στο μπλοκ διάγραμμα υπάρχει το μπλοκ Power switches, αλλά η αρχή λειτουργίας είναι γενικώς γνωστή και φαίνεται παρακάτω. Χρησιμοποιείται ένα mosfet, όπου η πύλη είναι συνδεδεμένη με έναν πυκνωτή σε σειρά με μία αντίσταση στο δευτερεύον τύλιγμα έτσι ώστε να τραβάει την γραμμή στο ground όταν γίνεται η φόρτιση εκ φόρτιση του πυκνωτή και να δημιουργείται αυτή η ταλάντωση. Η συχνότητα της κυμάτωσης εξαρτάται από το δευτερεύον τύλιγμα και συνήθως κυμαίνεται από 10kHz έως 100kHz, για τάση εισόδου 30mV με τύλιγμα 1:100. Σε περίπτωση που έχουμε μεγαλύτερες τάσεις εισόδου, μπορούμε να επιλέξουμε και μικρότερη σχέση τυλίγματος.



Σχήμα 1.12 Switching Mosfet's [7]

Η έξοδος μας είναι το C1B/C1A, όπου και στο δικό μας ολοκληρωμένο είναι σε ξεχωριστές εξόδους λόγω των 2 μετασχηματιστών, και φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 1.13 Ανόρθωση-Charge Pump [7]

Αφού έρθει λοιπόν το ρεύμα στο C1B/C1A όπως εξηγήθηκε και στην προηγούμενη σελίδα, είναι σε μορφή AC, οπότε με κάποιον τρόπο πρέπει να το ανορθώσουμε και να το ενισχύσουμε ώστε να μπορέσουμε να τροφοδοτήσουμε τα εσωτερικά κυκλώματα του ολοκληρωμένου, όπως το τροφοδοτικό που παράγει την τάση αναφοράς V_{ref} . Για την είσοδο C1B, ο πυκνωτής σε συνδυασμό με τις διόδους Schottky και το μπλοκ Sync Rectify, κάνουν ανόρθωση και ενίσχυση της τάσης ώστε να τροφοδοτηθεί το Reference. Το Sync Rectify είναι στην ουσία είναι ένα Low side και ένα High side MOSFET. Η τεχνική αυτή είναι γνωστή και ως Charge Pump. Χρησιμοποιούνται Schottky διόδοι λόγω της χαμηλής πτώσης τάσης τους.

Reference Block - Ενεργοποιείται όταν η γραμμή V_{aux} ξεπεράσει τα 2V, και χρησιμεύει ώστε να ρυθμίζει εσωτερικά την έξοδο των τροφοδοτικών.

Sync Rectify - Ενεργοποιούνται και αυτοί όταν το V_{aux} ξεπεράσει τα 2V, ώστε να ρυθμίζουν την τάση εισόδου στα pin C1A,C1B

Low Dropout Linear Regulator (LDO) - Παράγει τάση στα 2.2V η οποία τροφοδοτεί κάποια ολοκληρωμένα χαμηλής κατανάλωσης. Το LDO τροφοδοτείται είτε από το V_{aux} είτε από το V_{out} . Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να ενεργοποιείται όταν το V_{aux} έχει φτάσει στα 2.3V, καθώς ο πυκνωτής που αποθηκεύουμε ενέργεια στο V_{out} φορτίζει. Σε περίπτωση που χρειαστεί μεγαλύτερο φορτίο, μπορεί να τροφοδοτηθεί και από τον πυκνωτή στο V_{out} . Στην έξοδο V_{ldo} χρησιμοποιούμε έναν decoupling πυκνωτή για να έχουμε πιο σταθερό σήμα. Η έξοδος LDO είναι περιορισμένη σε ελάχιστο φορτίο 5mA

V_{out} - Η έξοδος φορτίζεται από την γραμμή V_{aux} και μπορεί να προγραμματιστεί και ρυθμιστεί από τον χρήστη, σε μία από τις 4 τάσεις που φαίνονται παρακάτω, χρησιμοποιώντας τα pin επιλογής τάσης VS1 και VS2

VS2	VS1	V_{out}
GND	GND	2.35V
GND	VAUX	3.3V
VAUX	GND	4.1V
VAUX	VAUX	5V

Σχήμα 1.15 Επιλογή τάσης V_{out}

Σε περίπτωση που η τάση εξόδου έχει μικρή πτώση κάτω από αυτήν που έχουμε επιλέξει, θα γίνει αντιστάθμιση φορτίζοντας ξανά την έξοδο εφόσον το V_{aux} είναι μεγαλύτερο από 2.5V. Όταν έχουμε πάλι την επιθυμητή τάση εξόδου V_{out} , η φόρτιση διακόπτεται. Ο κατασκευαστής δίνει αυτήν την κυμάτωση στην έξοδο σαν 20mV peak to peak. Στην έξοδο V_{out} συνδέουμε έναν πυκνωτή για την αποθήκευση της ενέργειας μας, συνήθως μερικά microfarad σαν προσωρινή αποθήκη ενέργειας, και όταν το V_{aux} ξεπεράσει τα 2.5V, ξεκινάει να φορτίζει στην επιθυμητή τάση εξόδου που το προγραμματίσαμε εμείς.

Το μέγιστο ρεύμα φόρτισης εξαρτάται από τους μετασχηματιστές και την σχέση τυλιγμάτων τους, αλλά είναι περιορισμένο στα 15mA. Το ρεύμα μπορεί να κυμαίνεται από 1μΑ μέχρι και 1000μΑ σε περίπτωση που έχουμε πολύ χαμηλές τάσης εισόδου.

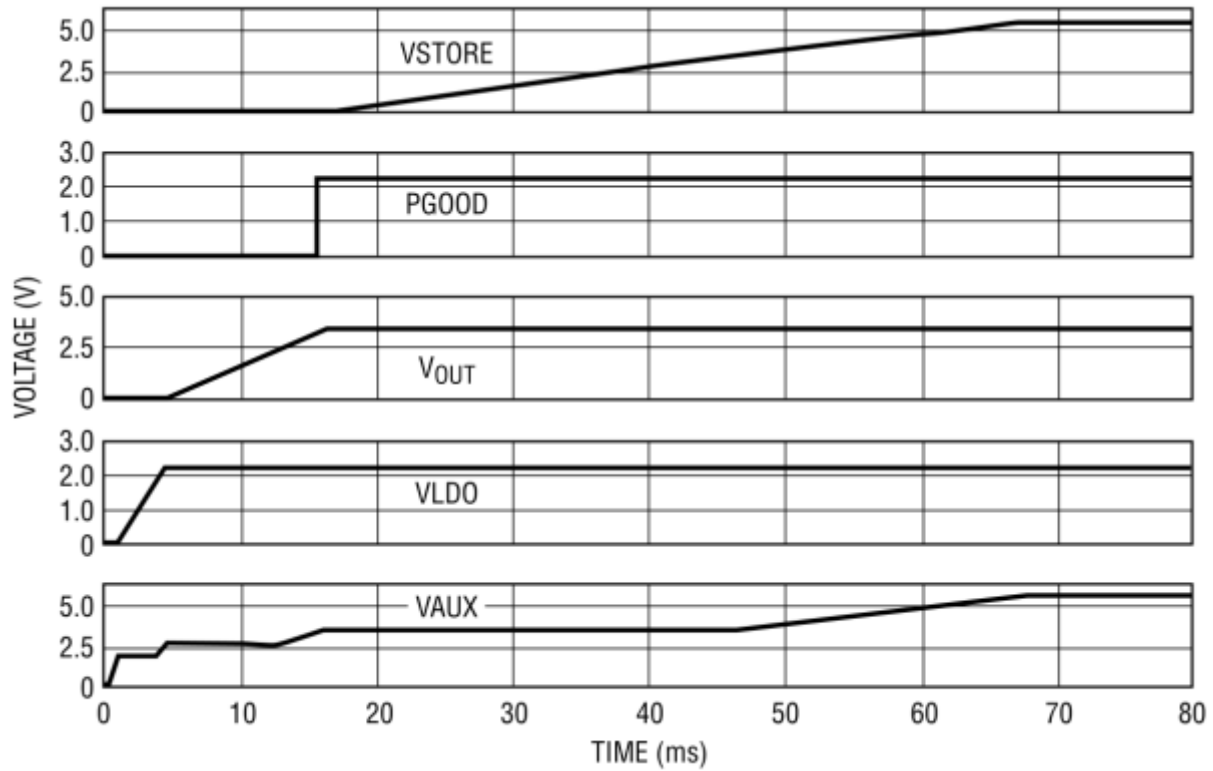
PGood - Είναι ένας συγκριτής ο οποίος ελέγχει την τάση Vout με μία pull-up αντίσταση 1MΩ στην τάση LDO και όταν η Vout έχει φτάσει στο 7,5% της προγραμματισμένης τιμής, το PGOOD γίνεται high. Εάν το Vout πέσει κατά 9% παρακάτω από την προγραμματισμένη έξοδο, το PGOOD γίνεται low. Η έξοδος PGOOD δεν είναι σχεδιασμένη να οδηγεί μεγάλα φορτία όπως ένα led, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με έναν μικροελεγκτή ή κάποιο άλλο μικροτσίπ εισόδου/εξόδου προκειμένου να ξέρουμε πότε η έξοδος μάς είναι έτοιμη

Vout2 - Η έξοδος αυτή μπορεί να ενεργοποιηθεί ή απενεργοποιηθεί από εμάς ή κάποιον εξωτερικό ελεγκτή, χρησιμοποιώντας το pin VoutEn. Σε περίπτωση που ενεργοποιηθεί, συνδέεται στην έξοδο Vout μέσω ενός 1Ω P-Channel Mosfet, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία εξωτερικών κυκλωμάτων όπως αισθητήρων και ενισχυτών οι οποίοι δεν έχουν από μόνοι τους λειτουργία sleep για χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Επειδή χρειαζόμαστε την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας για τις εφαρμογές μας, καλό είναι να αποφεύγουμε την χρήση decoupling πυκνωτών στην έξοδο Vout2 έτσι ώστε να μπορούμε να πετύχουμε γρηγορότερους παλμούς με μικρότερο duty cycle και έτσι μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Το ρεύμα εξόδου ελέγχεται από εσωτερικό κύκλωμα και έχει μέγιστη τιμή 0.3A. Η είσοδος ελέγχου Vout_en είναι high με $1V \pm 100mV$ κυμάτωση, και εσωτερικά έχει μία 5MΩ pull-down αντίσταση για όταν είναι low

Vstore – Χρησιμοποιείται για να φορτίσουμε έναν πιο μεγάλο πυκνωτή ή μία επαναφορτιζόμενη μπαταρία. Όταν η έξοδος Vout ρυθμιστή στην προγραμματιζόμενη τάση και σταθεροποιηθεί, η έξοδος Vstore ξεκινάει να φορτίζει μέχρι να φτάσει την τάση Vaux στα 5.25V. Σε περίπτωση που χαθεί η τάση στην είσοδο από την θερμοηλεκτρική γεννήτρια ή δεν μπορεί να παρέχει το αναγκαίο ρεύμα που χρειαζόμαστε για τα φορτία μας στην Vout/Vout2/LDO, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ενέργεια που έχουμε αποθηκεύσει στον πυκνωτή/μπαταρία. Όταν το Vaux έχει χαμηλότερη τάση από το Vstore, το ολοκληρωμένο θα ξεκινήσει αυτόματα να τροφοδοτείται από το Vstore. Αφού το ρεύμα φόρτισης είναι περιορισμένο στα 15mA, μπορούμε αντί για πυκνωτή να χρησιμοποιήσουμε με ασφάλεια μπαταρίες τύπου κέρματος NiCd-NiMH.

Όλα τα κυκλώματα εξόδου του LTC3109 προστατεύονται από βραχυκυκλώματα στη γείωση.

Παρακάτω φαίνεται το power sequence του ολοκληρωμένου, για προγραμματισμένη έξοδο $V_{out}=3.3V$

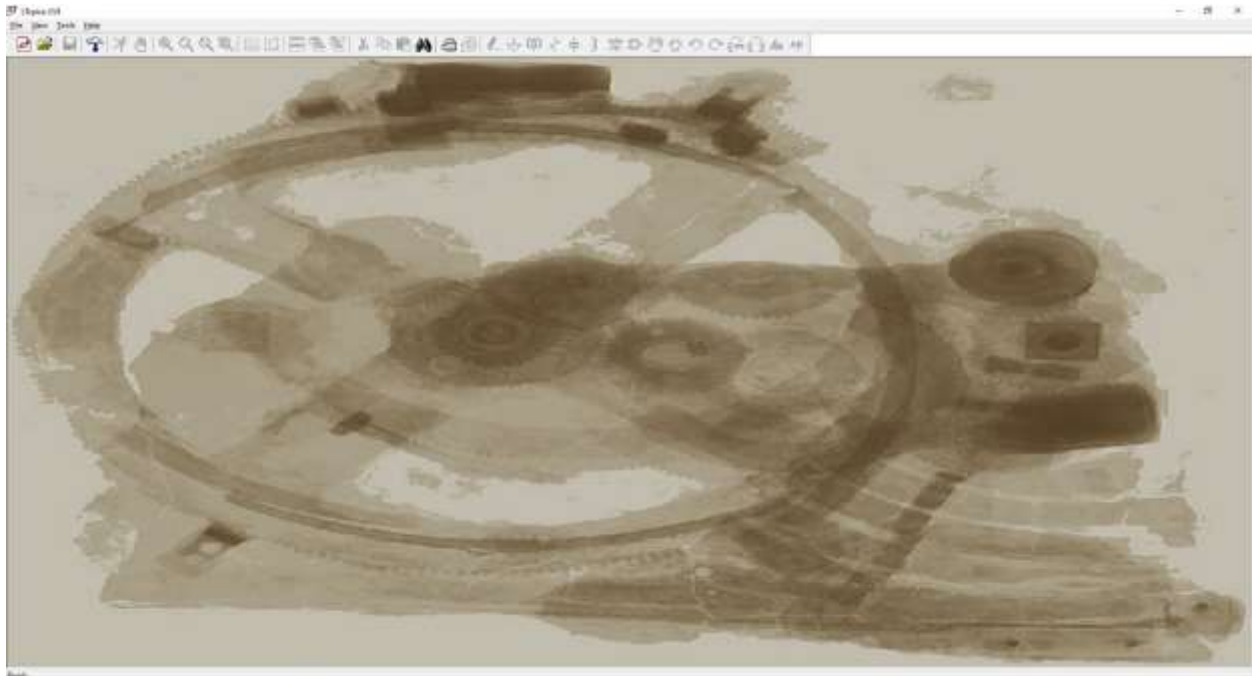


Σχήμα 1.16 Power Sequence [7]

Οι παραπάνω πληροφορίες για τα pin του ολοκληρωμένου ορίζονται από τον κατασκευαστή στο datasheet.

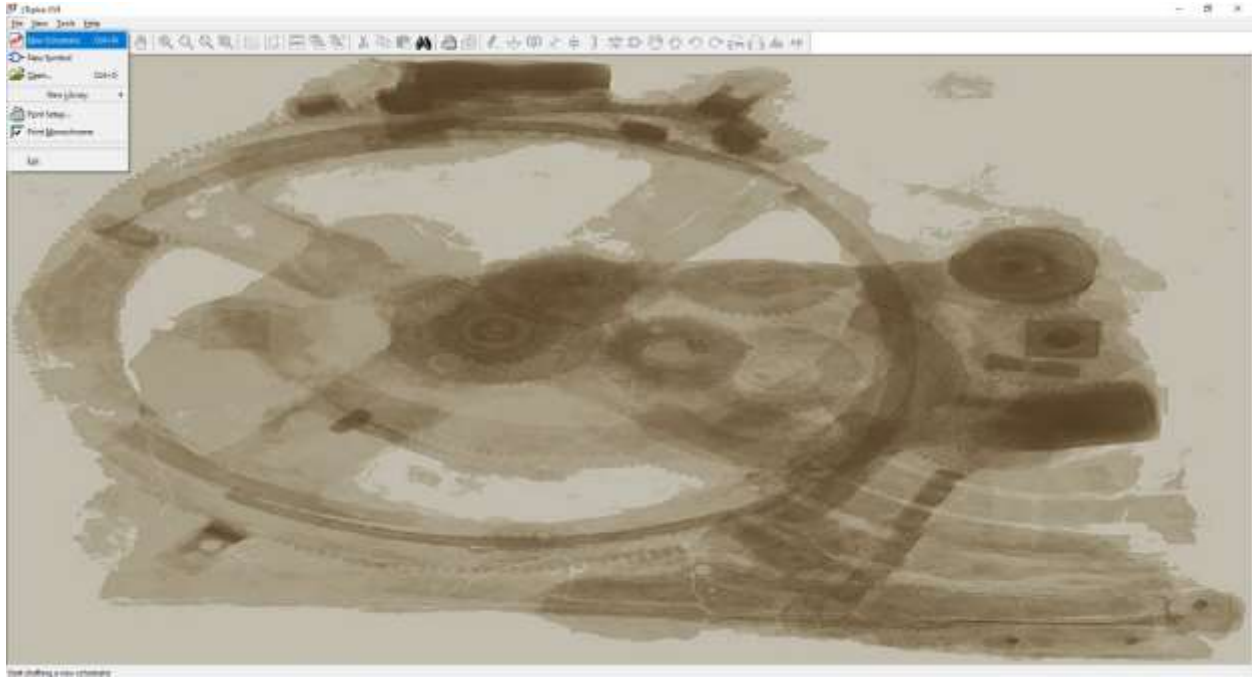
Κεφάλαιο 2^ο Σχεδιασμός στο πρόγραμμα LTSPICE

Σε αυτό το κεφάλαιο θα δούμε πως γίνεται η χρήση του προγράμματος LTSPICE για τον σχεδιασμό του κυκλώματος μας, το περιβάλλον λειτουργίας, καθώς και μερικές προσομοιώσεις με αποτελέσματα, σχετικά με την λειτουργία και τα χαρακτηριστικά του ολοκληρωμένου. Το αρχικό περιβάλλον του προγράμματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα

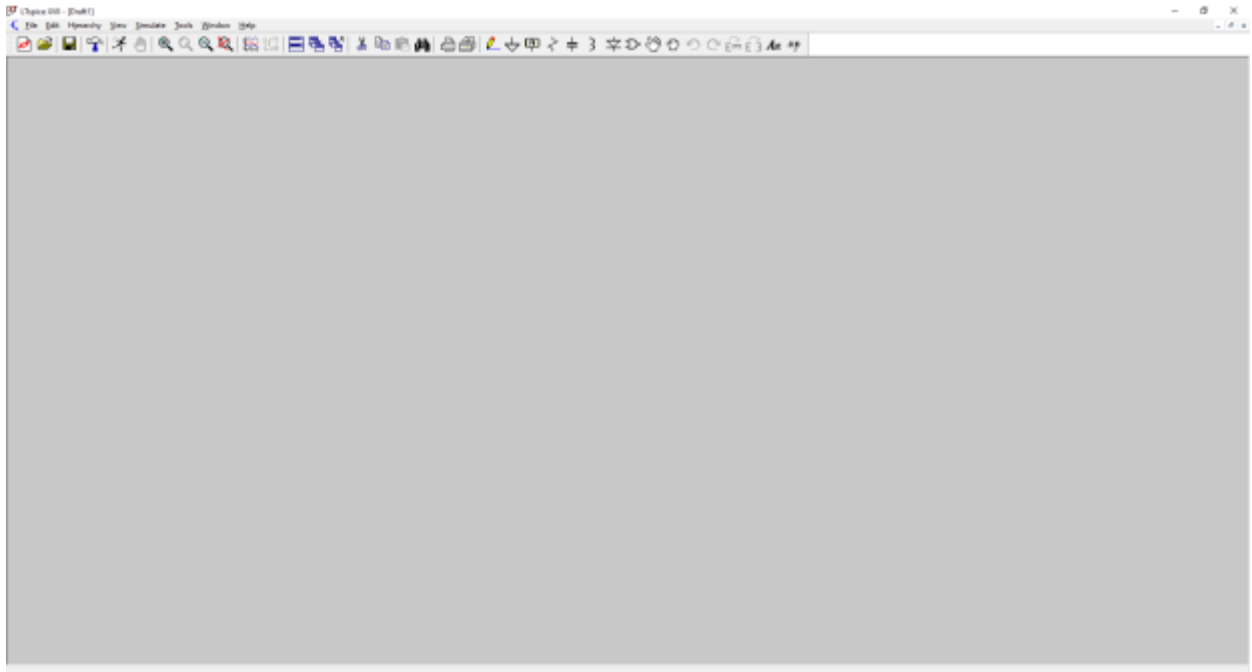


Σχήμα 2.1 Αρχικό περιβάλλον LTSPICE [11]

Για να ξεκινήσουμε την σχεδίαση του κυκλώματος μας, επιλέγουμε File -> New Schematic όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Αυτό θα μας οδηγήσει σε ένα κενό φύλλο εργασίας, και παράλληλα θα ενεργοποιηθούν και τα διάφορα εργαλεία στην μπάρα εργασίας (Σχήμα 2.3)

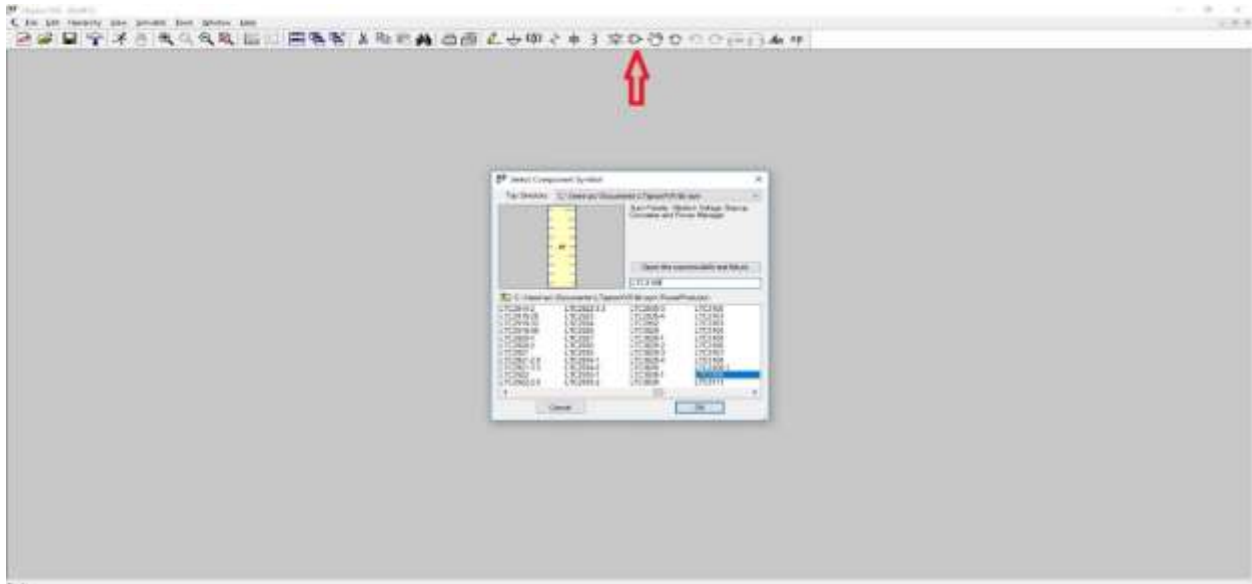


Σχήμα 2.2 Δημιουργία νέου σχεδίου



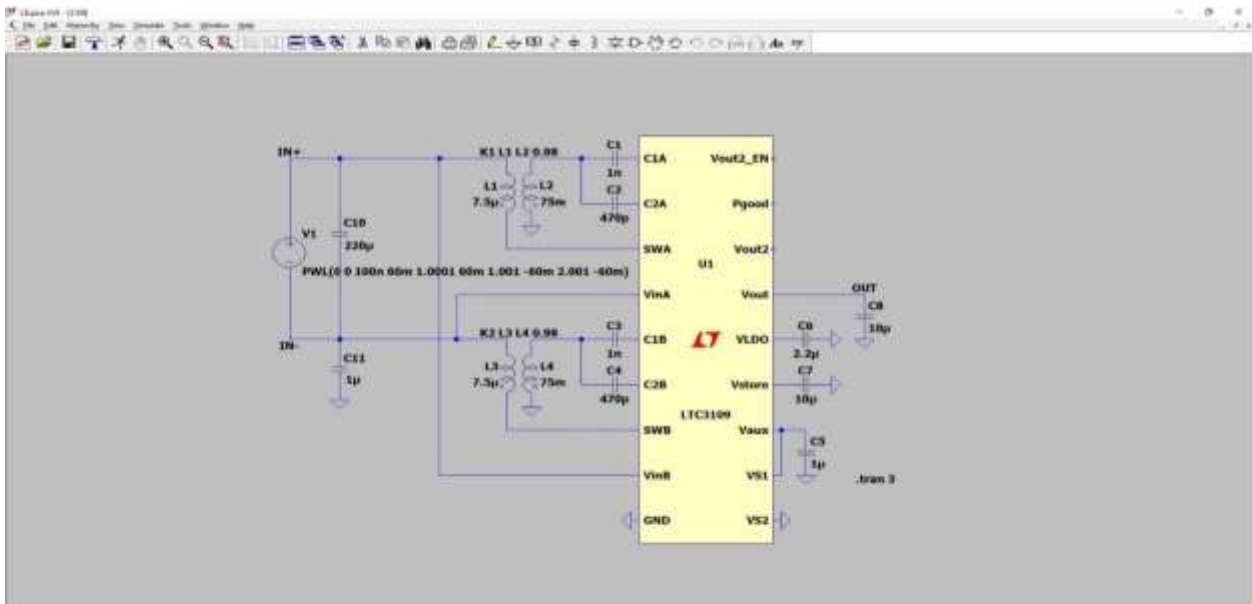
Σχήμα 2.3 Πεδίο εργασίας και μπάρα εργαλείων

Επιλέγοντας το παρακάτω εικονίδιο, οδηγούμαστε στο παράθυρο επιλογής των εξαρτημάτων μας. Στην γραμμή αναζήτησης πληκτρολογούμε το εξάρτημα που ζητούμε, στην περίπτωση μας LTC3109, ώστε να γίνει αναζήτηση στον κατάλογο (Σχήμα 2.4)



Σχήμα 2.4 Επιλογή ολοκληρωμένου από τον κατάλογο

Επιλέγοντας “Open this macromodel’s test figure”, παίρνουμε το παρακάτω διάγραμμα



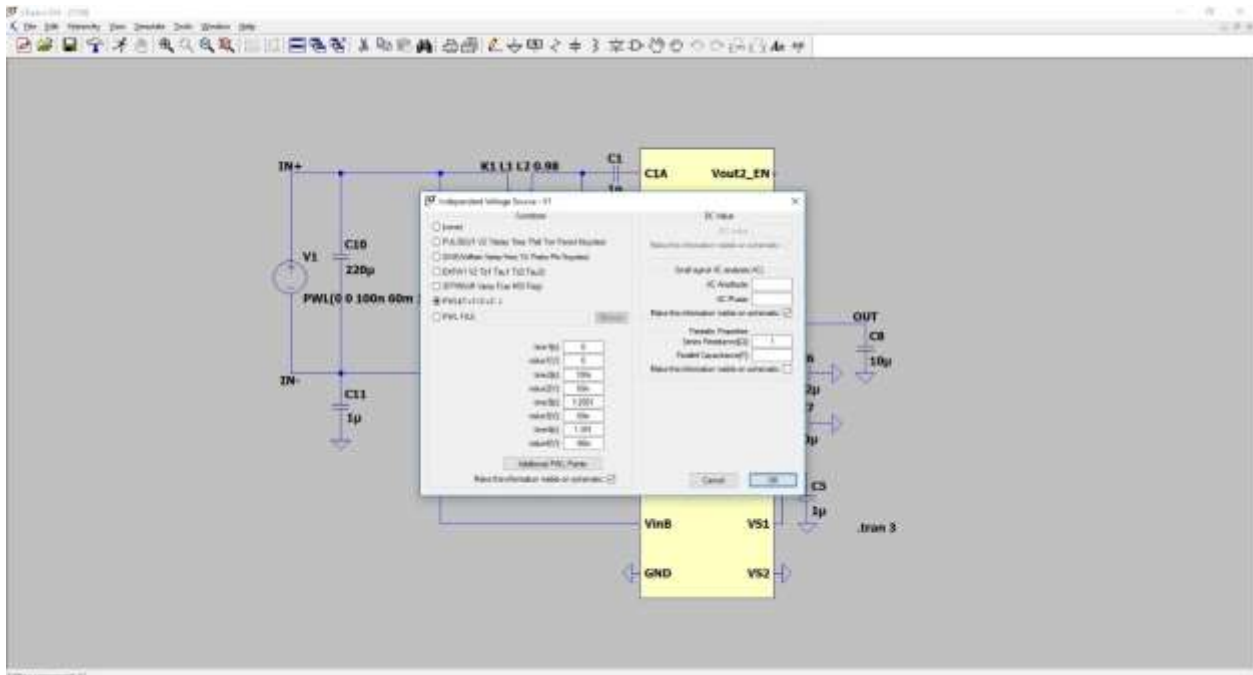
Σχήμα 2.5 Επιλογή του μοντέλου για την εφαρμογή μας

Επειδή το LTSpice είναι σχεδιασμένο να περιέχει τα περισσότερα ολοκληρωμένα της εταιρίας Linear Technology, έχουν εγκαταστήσει το προεπιλεγμένο κύκλωμα που καλύπτει το θέμα αυτής της εργασίας, δηλαδή το κύκλωμα του ολοκληρωμένου με διπλή πολικότητα, χρησιμοποιώντας μία πηγή τάσης V1(PWL). Αρχικά η πηγή τάσης V1(PWL), είναι πηγή που μπορούμε να δίνουμε συγκεκριμένη τάση σε συγκεκριμένους χρόνους. Όπως φαίνεται και παρακάτω (Σχήμα 2.6), έχουμε ρυθμίσει την πηγή να μας δίνει για:

χρόνο t:[0,100n,1.0001,1.001]

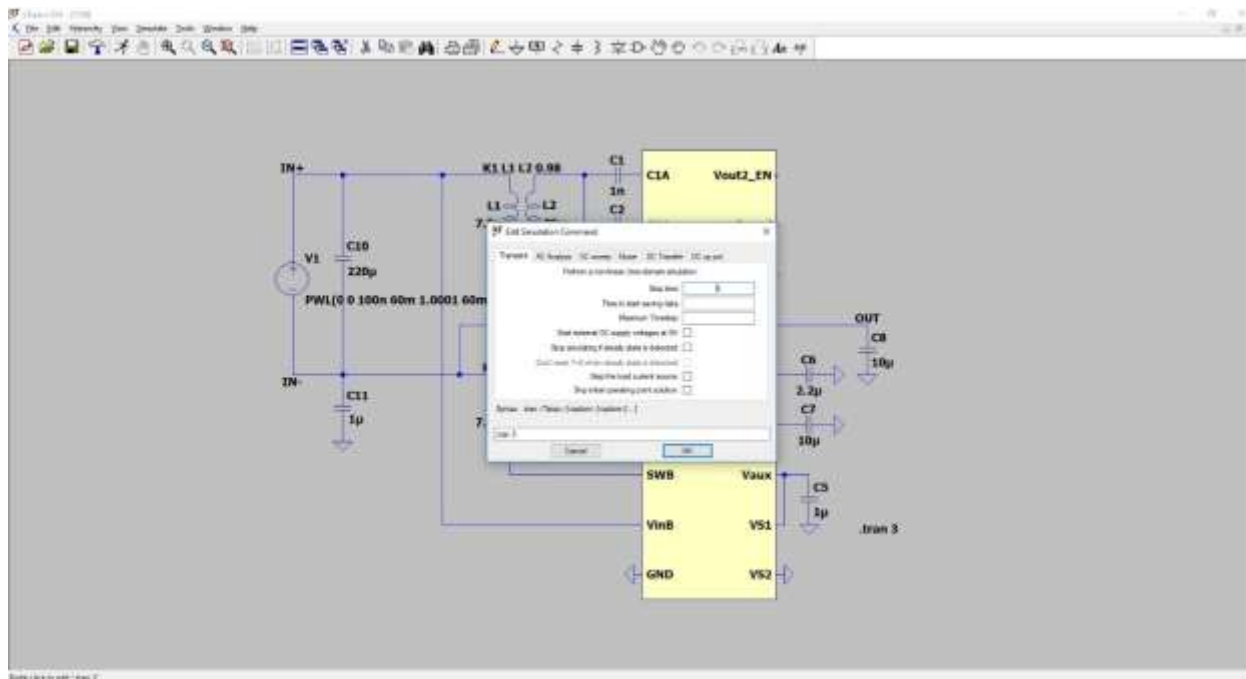
τάση v:[0,60m,60m,-60m]

Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να ορίζουμε με ευκολία τις επιθυμητές τάσης στους χρόνους που θέλουμε, και να προσομοιώνουμε το κύκλωμα δυναμικά



Σχήμα 2.6 Βήματα και τιμές για την προσομοίωση

Μία άλλη επιλογή είναι ο χρόνος προσομοίωσης και μπορεί να ρυθμιστεί εύκολα κάνοντας δεξί κλικ επάνω στο κείμενο .tran, ή πηγαίνοντας στην επιλογή Simulate->Edit Simulation Cmd. Ορίζουμε τον χρόνο διάρκειας στο πεδίο “Stop time” (Σχήμα 2.7)



Σχήμα 2.7 Αρχικές συνθήκες της προσομοίωσης

Σε περίπτωση που θέλουμε να αλλάξουμε την τιμή ενός εξαρτήματος, αρκεί να κάνουμε επάνω του δεξί κλικ

Αρχικά θα προσομοιώσουμε τις 4 διαφορετικές τάσεις V_{out} που μπορούν να προγραμματιστούν, με την χρήση των VS1, VS2 όπως φαίνεται και παρακάτω

VS2	VS1	V_{OUT}
GND	GND	2.35V
GND	VAUX	3.3V
VAUX	GND	4.1V
VAUX	VAUX	5V

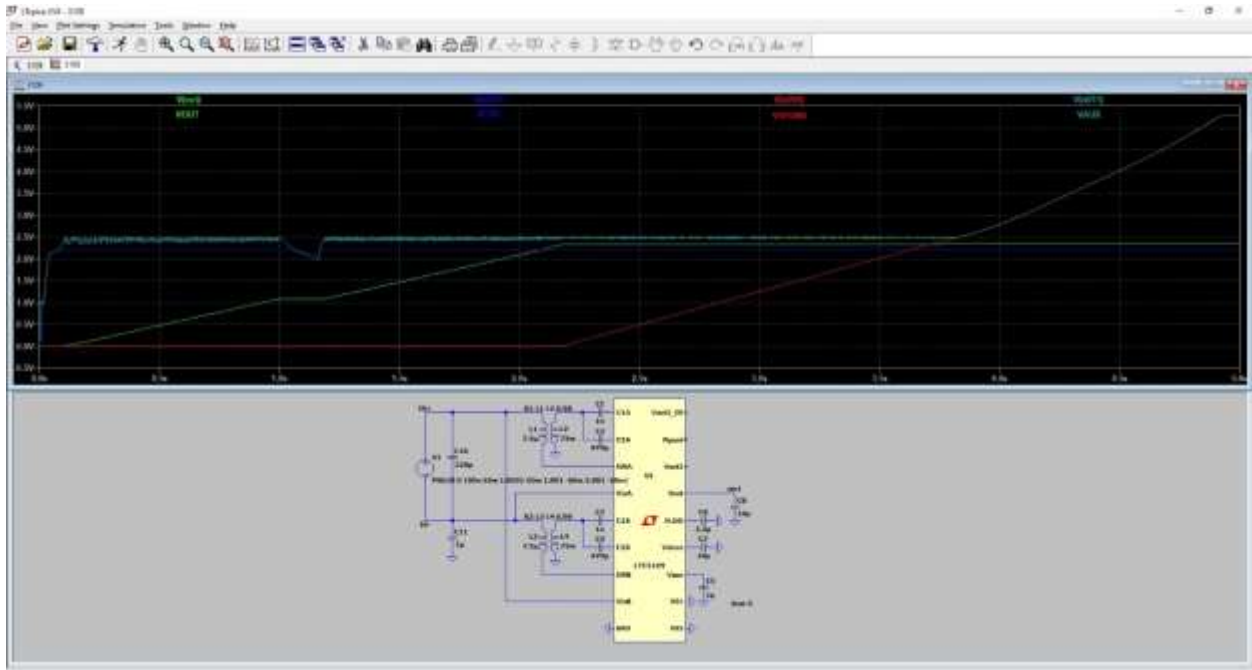
Σχήμα 2.8 Επιλογή τάσης V_{out}

Το μόνο που πρέπει να κάνουμε, είναι να συνδέουμε κάθε φορά τις γραμμές VS1, VS2 στην αντίστοιχη επιθυμητή γραμμή. Για τάση $V_{out} = 2.35V$, το VS1 και το VS2 συνδέονται στην γείωση (Σχήμα 2.9)

Διάρκεια προσομοίωσης: 5sec

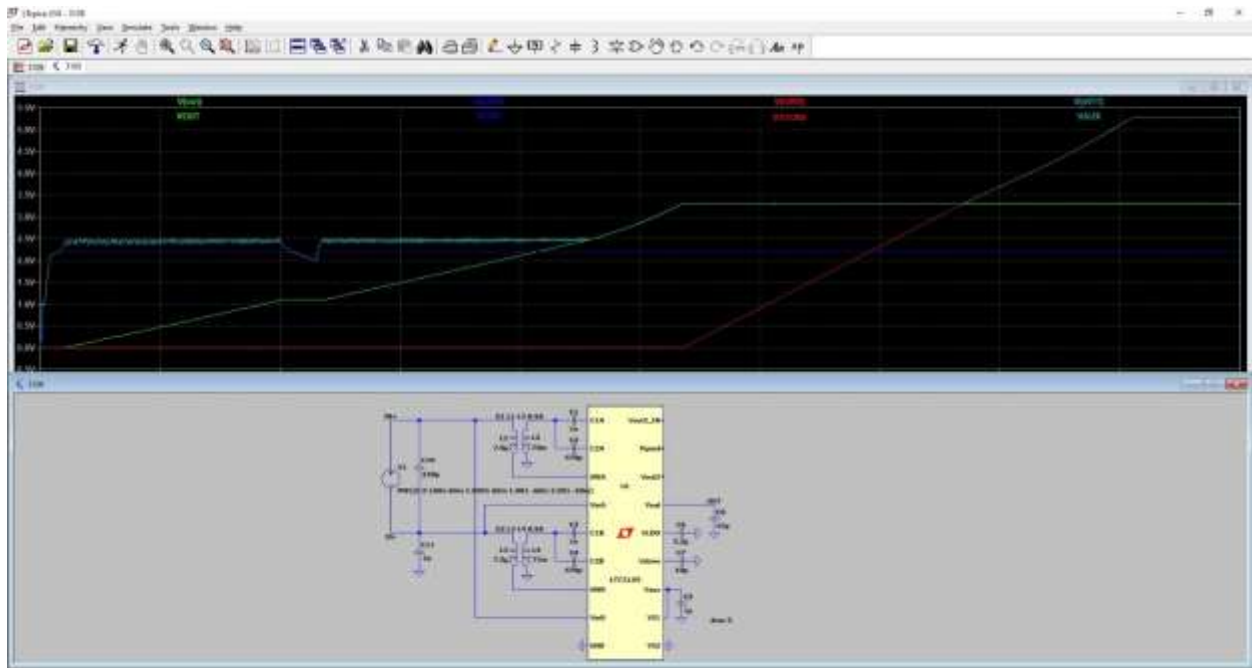
Πραγματική διάρκεια προσομοίωσης: ~10-15Λεπτά

Η διάρκεια της προσομοίωσης θα μπορούσε να βελτιωθεί, εάν ο πυκνωτής στην γραμμή εξόδου V_{out} είχε χαμηλότερη τιμή, ή τον σβήναμε τελείως.



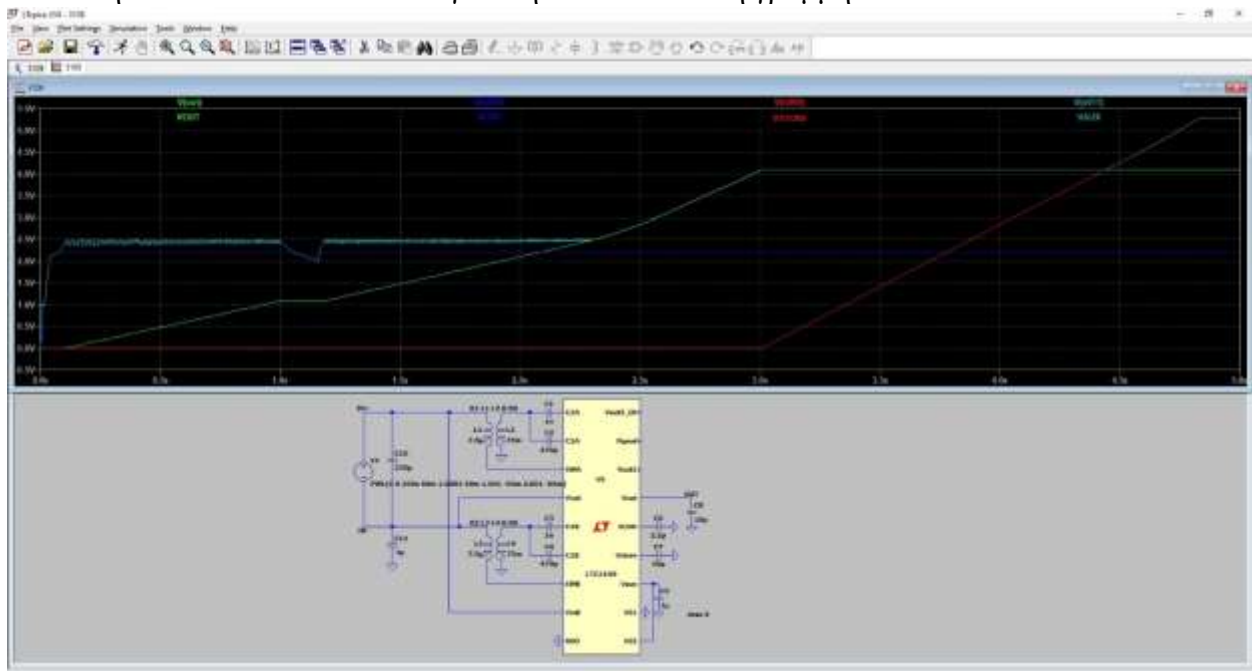
Σχήμα 2.9 Επιλογή για τάση $V_{out}=2.35V$

Για τάση $V_{out}=3.3V$, το VS1 συνδέεται με το Vaux και το VS2 στη γείωση



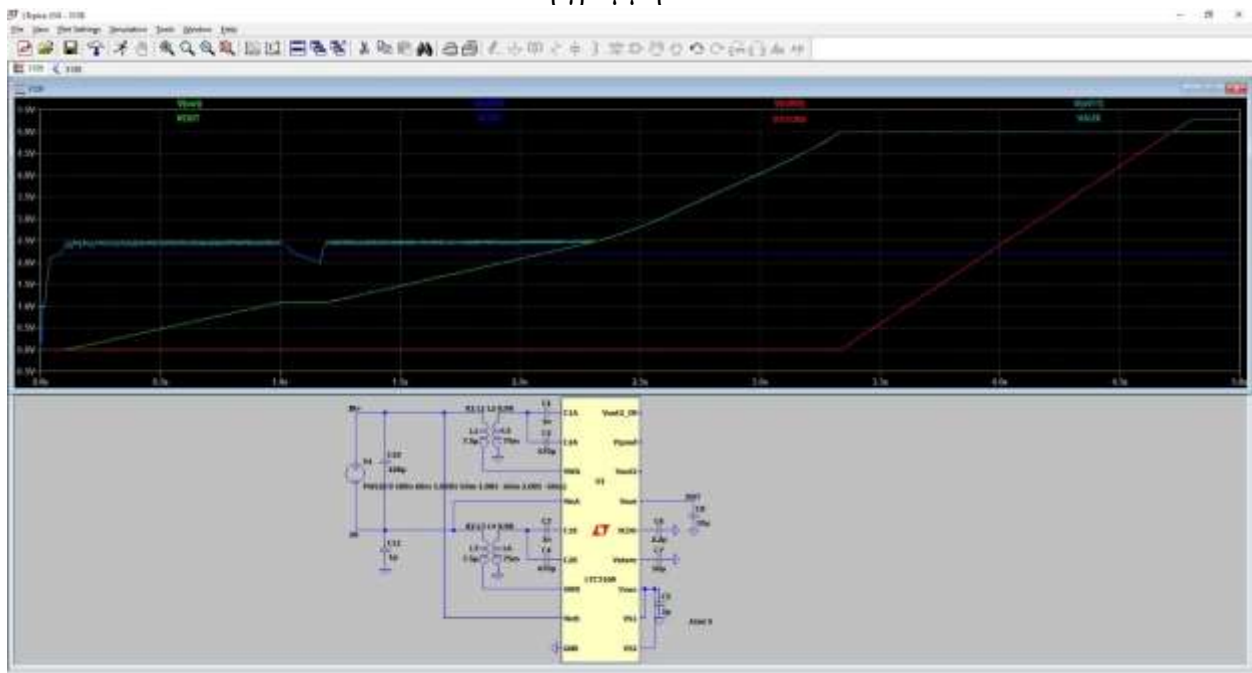
Σχήμα 2.10 Επιλογή για τάση εξόδου $V_{out}=3.3V$

Για τάση $V_{out}=4.1V$ το VS1 πάει γείωση και το VS2 στη γραμμή V_{aux}



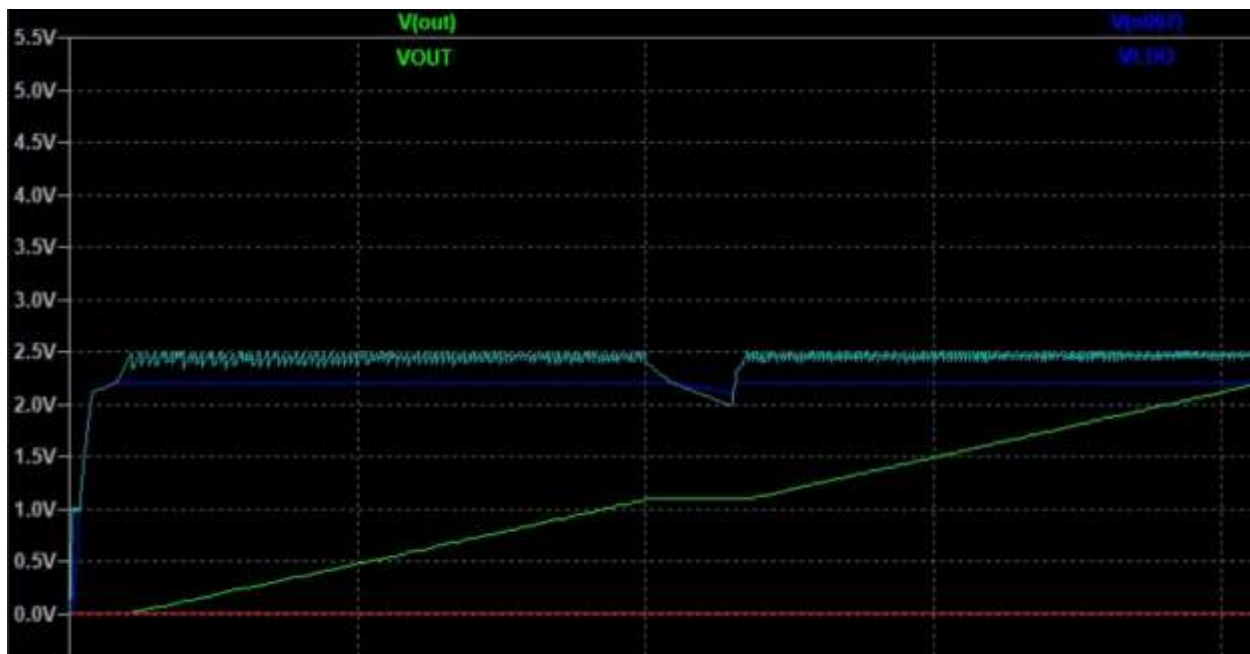
Σχήμα 2.11 Επιλογή για τάση εξόδου $V_{out}=4.1V$

Για $V_{out}=5V$ το VS1 και το VS2 πάνε στη γραμμή V_{aux}



Σχήμα 2.12 Επιλογή για τάση εξόδου $V_{out}=5V$

Μέσω της προσομοίωσης, και στις 4 περιπτώσεις μπορούμε να κάνουμε ορισμένες παρατηρήσεις για την λειτουργία του κυκλώματος μας. Για παράδειγμα θα πάρουμε την περίπτωση για τάση $V_{out}=3.3V$. Ας ξεκινήσουμε από την γραμμή V_{ldo} καθώς αυτή είναι από τις πρώτες γραμμές που ενεργοποιούνται. Η γραμμή V_{ldo} είναι ένας γραμμικός ρυθμιστής τάσης, ή αλλιώς ένας Low Dropout Linear Regulator, ο οποίος δέχεται μία τάση A και μας δίνει μία τάση B. Η τάση A που δέχεται είναι η γραμμή V_{aux} (που είναι και η πρώτη γραμμή που δημιουργείται στο ολοκληρωμένο αλλά θα συζητηθεί σε λίγο) , ή, η γραμμή V_{out} . Η έξοδος B που παράγεται έχει τάση 2.2V και χρησιμοποιείται κυρίως για να τροφοδοτηθούν εσωτερικά κυκλώματα του ολοκληρωμένου. Όπως φαίνεται και παρακάτω (Σχήμα 2.13) με σκούρο μπλε έχουμε την γραμμή V_{ldo} και με γαλάζιο η γραμμή V_{aux} . Από τον κατασκευαστή ορίζετε ότι όταν η γραμμή V_{aux} φτάσει τα 2.3V, ενεργοποιείται η V_{ldo} στα 2.2V



Σχήμα 2.13 Συμπεριφορά γραμμής V_{aux} και V_{ldo}

Πριν την Vldo, η γραμμή Vaux ξεκινάει να φορτίζει. Όταν η Vaux φτάσει τα 2.5V, ξεκινάει να φορτίζει και η Vout έως ότου αυτές οι δύο να συναντηθούν. Η γραμμή Vaux και Vout φτάνουν στην προγραμματισμένη τάση (3.3V) και κινούνται μαζί έως ότου να φορτίσει και η Vstore. Όταν η Vstore φτάσει και ξεπεράσει τα 3.3V, τότε η Vaux την ακολουθεί μέχρι να φτάσουν στα 5.25V, και έτσι να ξεκινήσει η φόρτιση του εξωτερικού υπέρ-πυκνωτή

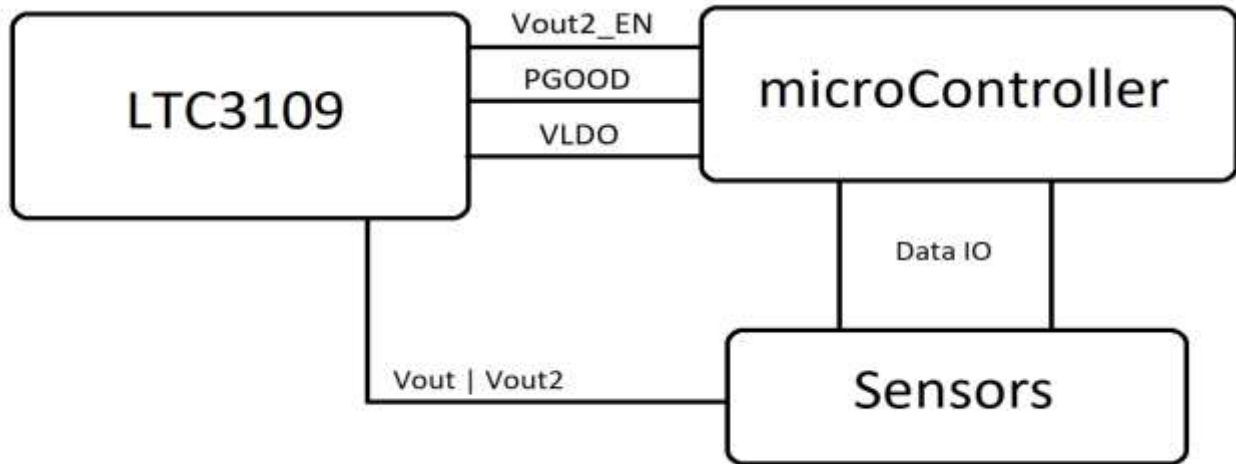
Vout Vstore Vaux Vldo



Σχήμα 2.14 Εκκίνηση της γραμμής Vstore

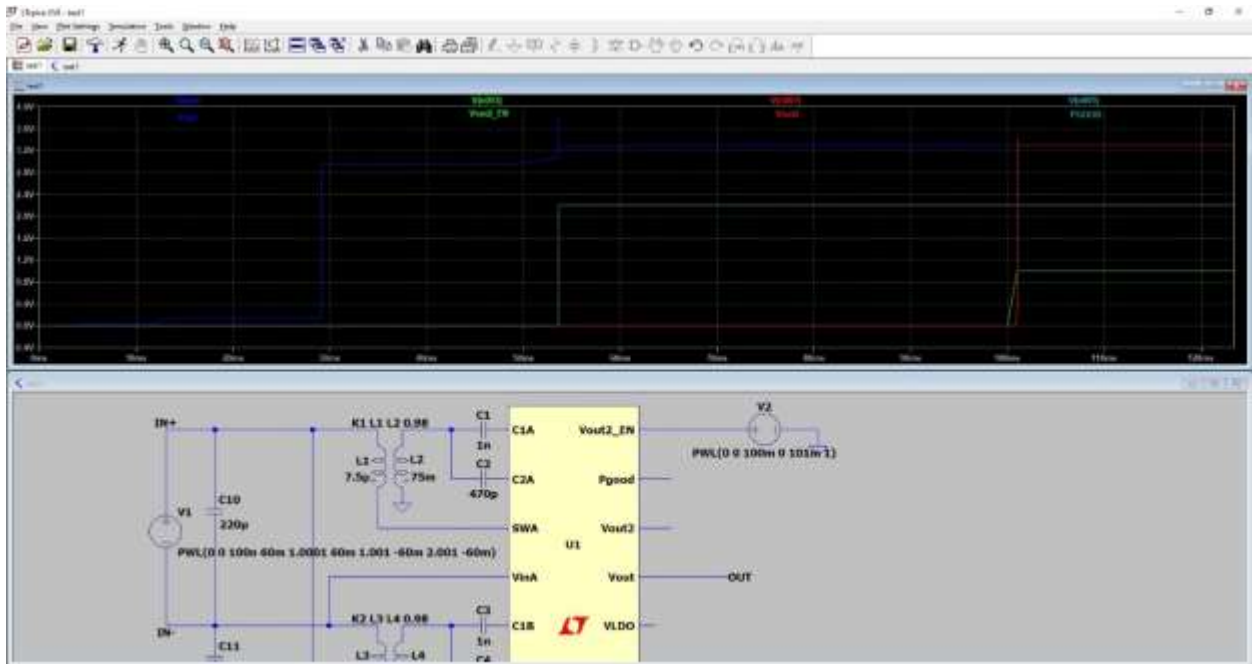
Σε ένα πραγματικό σύστημα, χρειάζεται να ξέρουμε πότε το ολοκληρωμένο έχει φτάσει την επιθυμητή λειτουργία που το έχουμε ορίσει και έχει σταθεροποιηθεί. Για παράδειγμα ας σκεφτούμε ένα σύστημα όπως το παρακάτω (Σχήμα 2.15), όπου χρειαζόμαστε τα δεδομένα από κάποιους αισθητήρες. Δεν είναι δυνατό να παρατηρούμε και να συλλέγουμε συνέχεια τα δεδομένα τους, οπότε η ύπαρξη ενός μικρο-ελεγκτή είναι απαραίτητη, ώστε να ορίζουμε τους χρόνους και την συχνότητα που θέλουμε να γίνετε η συλλογή. Ο ελεγκτής για να λειτουργήσει χρειάζεται ενέργεια, το ίδιο και οι αισθητήρες και η μόνη πηγή ενέργειας που έχουμε είναι το LTC3109. Με κάποιον τρόπο θα πρέπει να ελέγχουμε, εάν το LTC3109 είναι σε κατάσταση να τροφοδοτήσει τα υποκυκλώματα μας. Η χρήση του pin PGOOD μας βοηθάει στο να βλέπουμε πότε το ολοκληρωμένο έχει φτάσει στην προγραμματισμένη τάση. Όταν είναι high, το PGOOD έχει τάση $LDO = 2.2V$ ενώ όταν είναι low 0V.

Μπορούμε να προγραμματίσουμε τον ελεγκτή μας να εκτελεί ορισμένες εργασίες όταν διαβάσει αυτό το σήμα, και με αυτόν τον τρόπο να ελέγχουμε και τους αισθητήρες μας, ή ακόμη και να ενεργοποιεί/απενεργοποιεί την γραμμή Vout2.



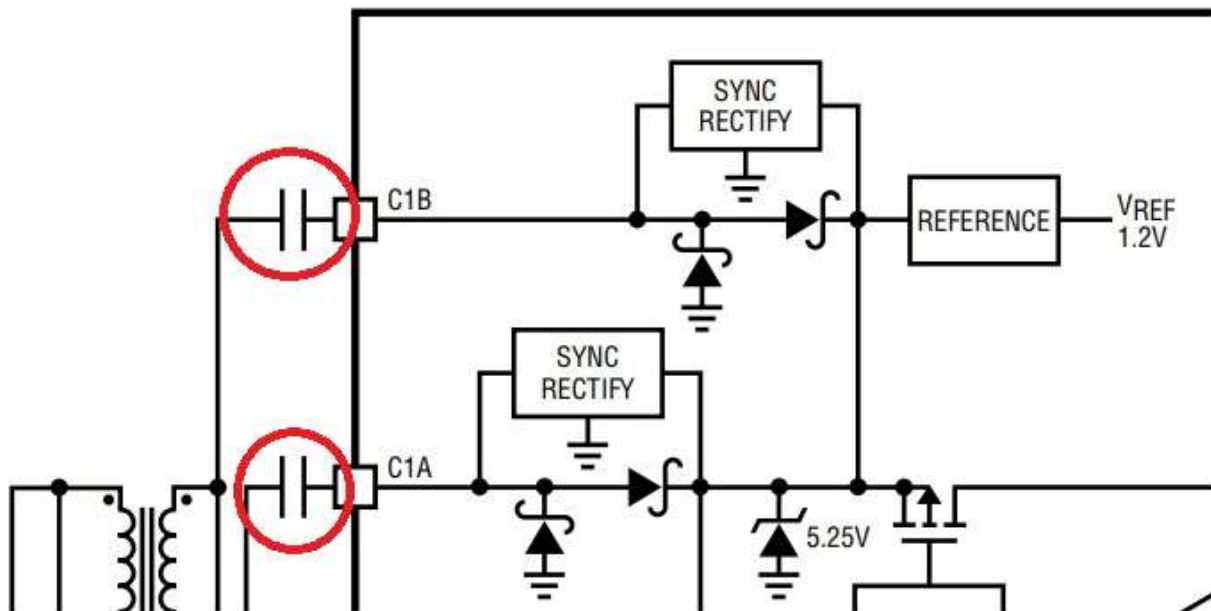
Σχήμα 2.15 Έλεγχος κατάστασης του ολοκληρωμένου

Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε την λειτουργία του PGOOD και των γραμμών Vout2, Vout2_EN, Vout. Με το που το Vout φτάσει στην επιθυμητή τιμή, το PGOOD γίνεται high. Στέλνοντας ένα σήμα του 1V στο pin Vout2_EN, ενεργοποιούμε την γραμμή Vout2, η οποία ακολουθεί την Vout



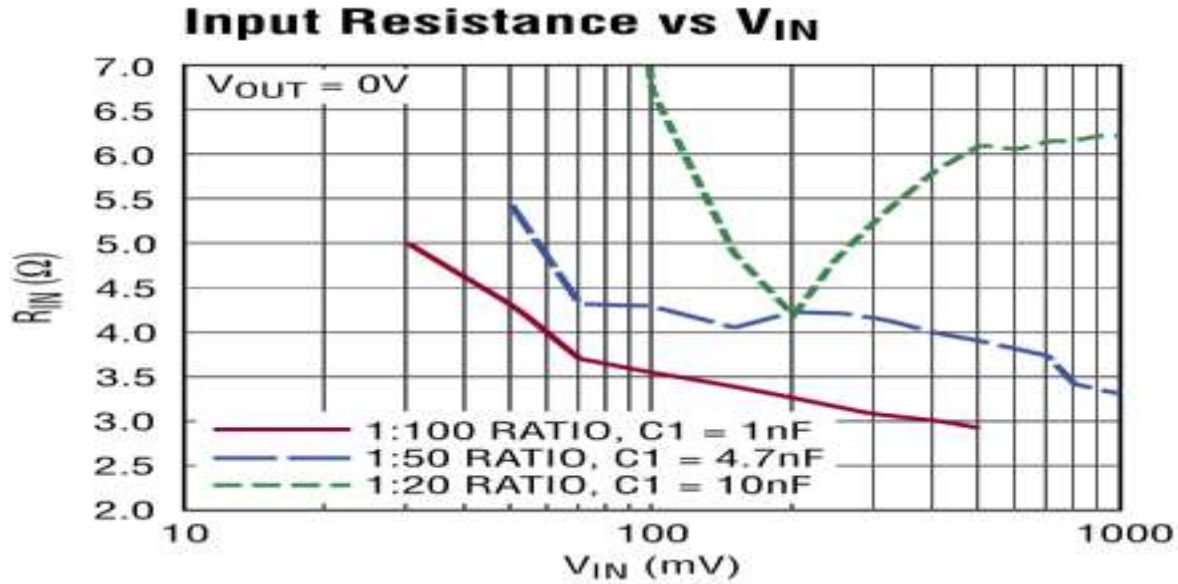
Σχήμα 2.16 Ενεργοποίηση της δεύτερης εξόδου Vout2

Σε ένα ιδανικό σύστημα δεν κοιτάμε τις επιπτώσεις που θα μπορούσαν να έχουν κάποιες αλλαγές στο κύκλωμα, ή κάποιες μικρές παραμέτρους που θα μπορούσαν να το επηρεάσουν. Αυτές οι παράμετροι που μπορούμε να συναντήσουμε είναι κυρίως η αντίσταση που μπορεί να έχει η πηγή που τροφοδοτεί το ολοκληρωμένο μας, όπως ένα TEG, σε συνδυασμό με τις υπόλοιπες αντιστάσεις που συναντάμε στα εξαρτήματα, ακόμη και στις γραμμές του PCB, κάτι το οποίο πρέπει να λάβουμε υπόψη την ώρα του σχεδιασμού. Η αντίσταση εισόδου και εξόδου είναι κάτι που πρέπει να γνωρίζουμε, ούτως ώστε να γνωρίζουμε τις δυνατότητες του συστήματος μας και την απόδοση της ενέργειας που δέχεται και δίνει. Η χωρητικότητα των πυκνωτών στα pin εισόδου μπορεί να καθορίσει το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να προωθήσει το ολοκληρωμένο στα μεταγενέστερα κυκλώματα. Συγκεκριμένα μας ενδιαφέρουν οι πυκνωτές στα pin C1A, C1B οι οποίοι συνδέονται στο δευτερεύον τυλίγμα των μετασχηματιστών αντίστοιχα. Όσο μεγαλύτερη η χωρητικότητά τους, τόσο περισσότερο ρεύμα μπορούν να δώσουν, κάτι το οποίο εξαρτάται όμως άμεσα από την τάση της πηγής μας, και τον αριθμό τυλιγμάτων των μετασχηματιστών. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που έχουμε την χαμηλότερη τάση στην πηγή (30mV), θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε αναλογία 1:100 για τα τυλίγματα, και χαμηλή τιμή χωρητικότητας, ώστε να προλαβαίνει να φορτίζει.



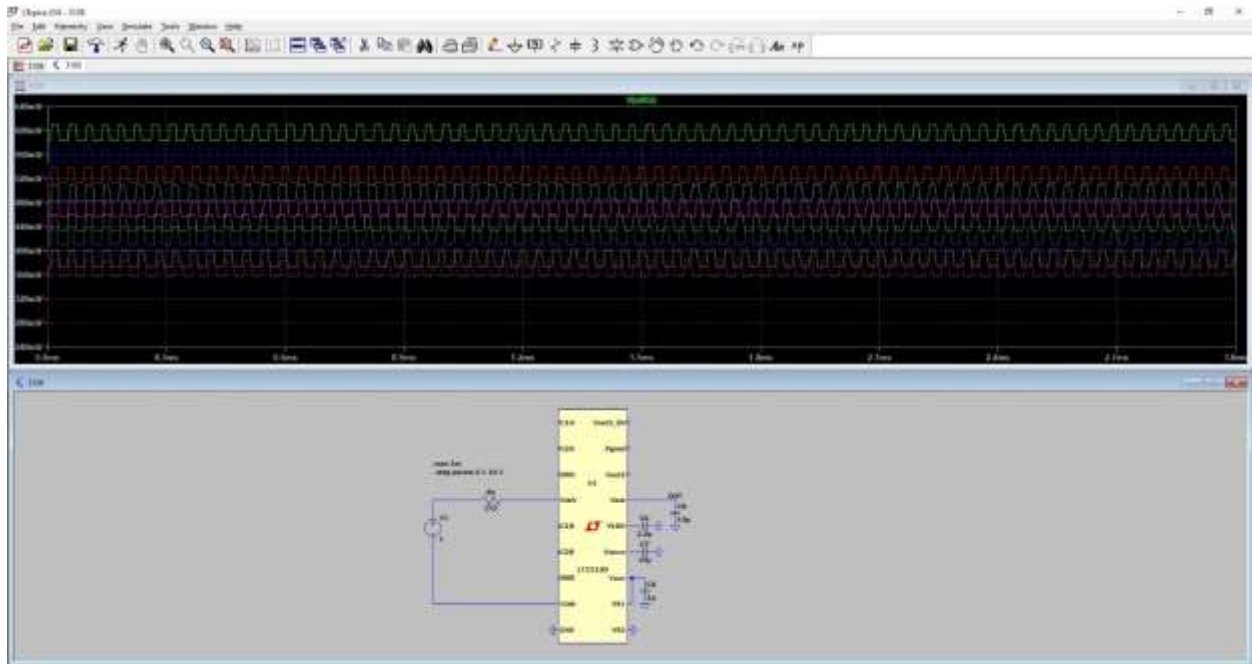
Σχήμα 2.17 Πυκνωτές εξόδου των μετασχηματιστών [7]

Κάτι το οποίο δεν λαμβάνουμε υπόψιν εμείς, αλλά έχει γίνει από πλευράς κατασκευαστή, είναι η χρήση κεραμικών πυκνωτών με χαμηλές τιμές χωρητικότητας. Ο λόγος που χρειαζόμαστε κεραμικούς πυκνωτές και όχι ηλεκτρολυτικούς ή τανταλίου, είναι διότι σε εφαρμογές όπως η δικιά μας, όπου έχουμε τροφοδοτικά switching μεγάλων συχνοτήτων, οι κεραμικοί πυκνωτές συμπεριφέρονται πολύ καλύτερα στις μεγάλες συχνότητες, και κάνουν καλύτερο φιλτράρισμα. Ένας ηλεκτρολυτικός πυκνωτής σε μία τέτοια εφαρμογή μεγάλων συχνοτήτων θα ήτανε πρακτικά άχρηστος, καθώς θα αυξανότανε το ESR και το ESL του από μία συχνότητα και μετά, με αποτέλεσμα να είχαμε ένα πολύ κακό φιλτράρισμα της τάσης εξόδου, με πολλές κυματώσεις. Εκτός από τους πυκνωτές, υπάρχουν και τα υπόλοιπα εξαρτήματα τα οποία μπορούν να προκαλέσουν μείωση στην ποιότητα των σημάτων μας, και να αυξάνουν την αντίσταση που βλέπει το ρεύμα καθώς πηγαίνει από την πηγή στο ολοκληρωμένο. Μεγάλη αντίσταση μπορεί να εμφανίζουν οι μετασχηματιστές 1:100, με αποτέλεσμα κάποια ενέργεια να χάνεται στα τυλίγματα τους, καθώς και οι συνδέσεις με τα διάφορα στρώματα επάνω στην πλακέτα μας. Όλα αυτά δεν πρέπει να τα αγνοούμε, αλλά να τα λαμβάνουμε υπόψιν όταν σχεδιάζουμε κυκλώματα χαμηλής ενέργειας όπως το δικό μας, καθώς και η παραμικρή απώλεια, μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητα αποτελέσματα. Για αυτόν τον λόγο προσπαθούμε να υπολογίσουμε την αντίσταση εισόδου και εξόδου του συστήματος μας, προκειμένου να ξέρουμε σε τι πλαίσια κινούμαστε. Η αντίσταση εισόδου (Σχήμα 2.18) μπορεί να εξαρτηθεί από όλα αυτά που προαναφέρθηκαν, καθώς και από διάφορες άλλες απώλειες εσωτερικά του ολοκληρωμένου. Η τάση της πηγής παίζει μεγάλο ρόλο στη αντίσταση που θα βλέπουμε, και έχει υπολογιστεί από τον κατασκευαστή όπως φαίνεται παρακάτω, για διάφορα τυλίγματα μετασχηματιστών



Σχήμα 2.18 Αντίσταση εισόδου ανά αριθμό τυλιγμάτων [7]

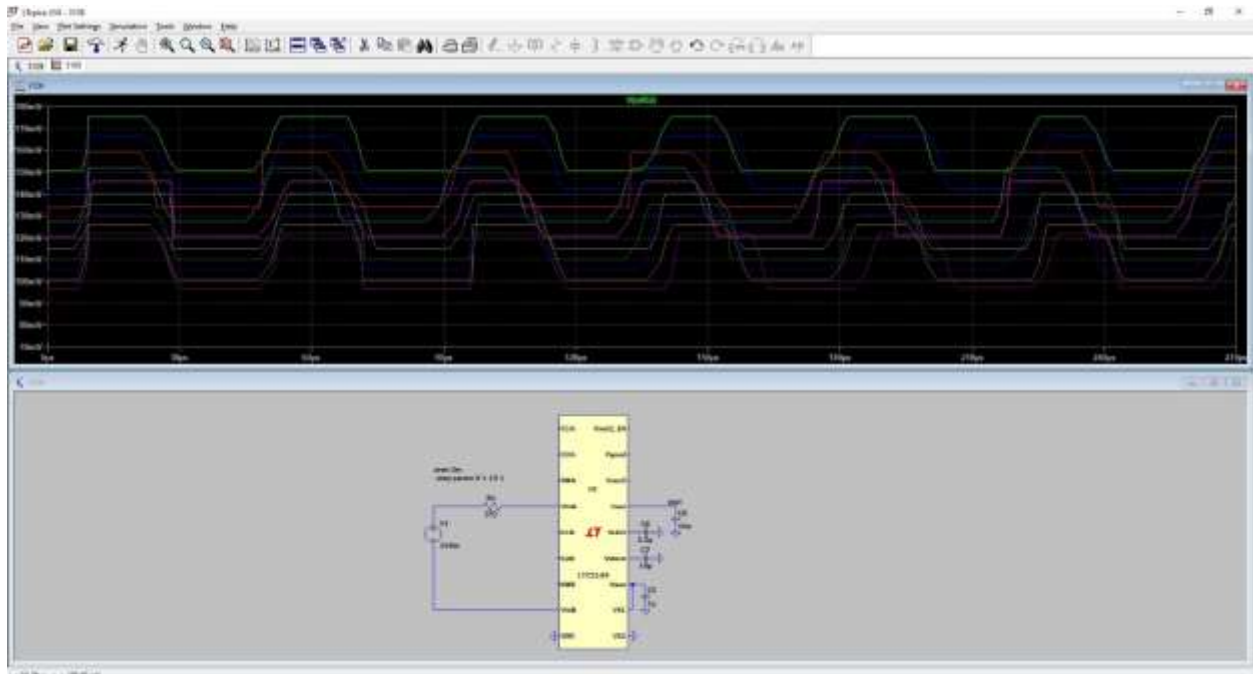
Εμάς μας ενδιαφέρει κυρίως η κόκκινη γραμμή, για τυλίγματα 1:100 με 1_nF στον κεραμικό πυκνωτή, μιας και με το TEG ξεκινάμε από 30mV τάση και μπορούμε να φτάσουμε μέχρι και μερικά volt σε ιδανικές συνθήκες. Η αντίσταση φαίνεται να κυμαίνεται από 5Ω για 30mV είσοδο και φτάνει χαμηλότερα από 3Ω όσο πλησιάζουμε το 1V. Στο LTSpice θα δούμε πως οι τιμές που παίρνουμε δεν είναι ακριβώς οι ίδιες, αλλά κινούνται σε πολύ κοντινά πλαίσια, με τις αναμενόμενες αυξομειώσεις. Τα αποτελέσματα από τον κατασκευαστή, στην προσομοίωση, ακόμη και στην πράξη δεν θα είναι πάντα ίδια, διότι δεν υπάρχουν ιδανικές συνθήκες.



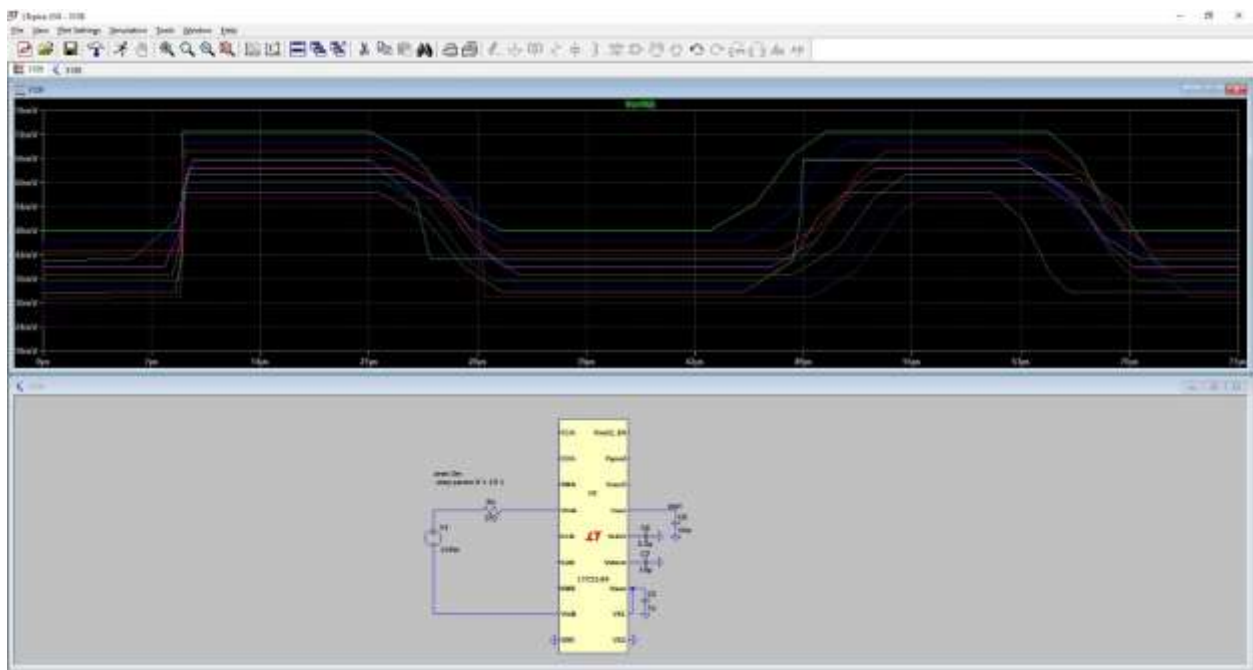
Σχήμα 2.19 Αντίσταση εισόδου στα 1V από 1Ω έως 10Ω



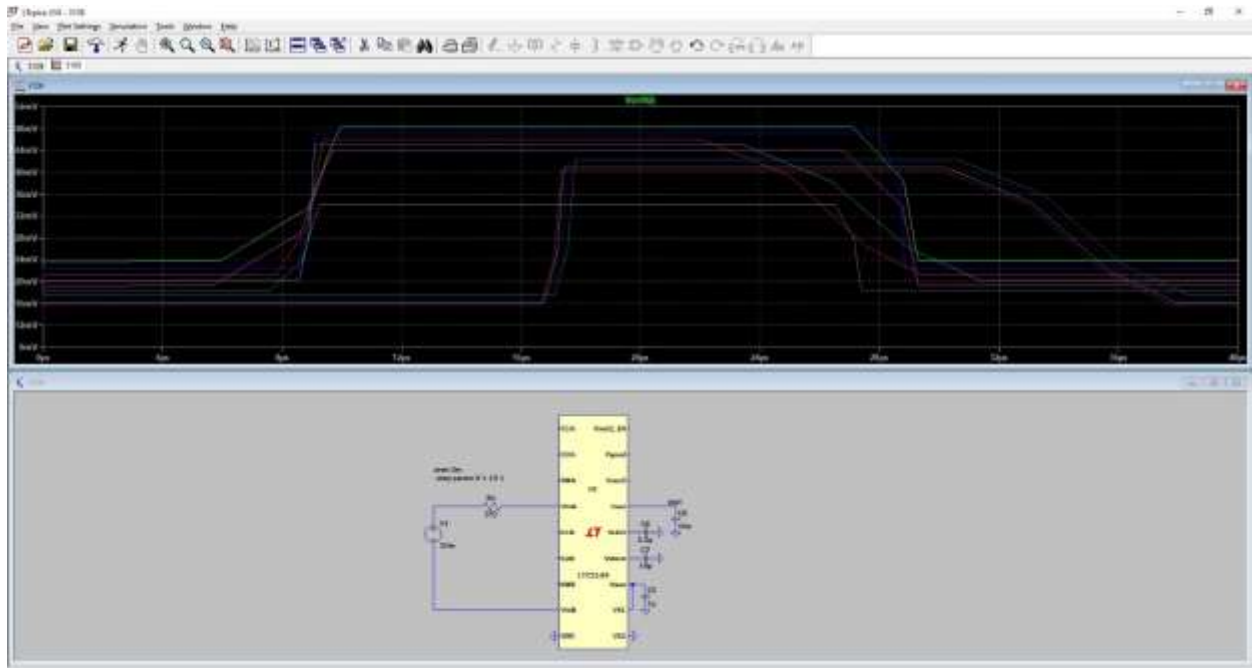
Σχήμα 2.20 Αντίσταση εισόδου στα 500mV από 1Ω έως 10Ω



Σχήμα 2.21 Αντίσταση εισόδου στα 300mV από 1Ω έως 10Ω

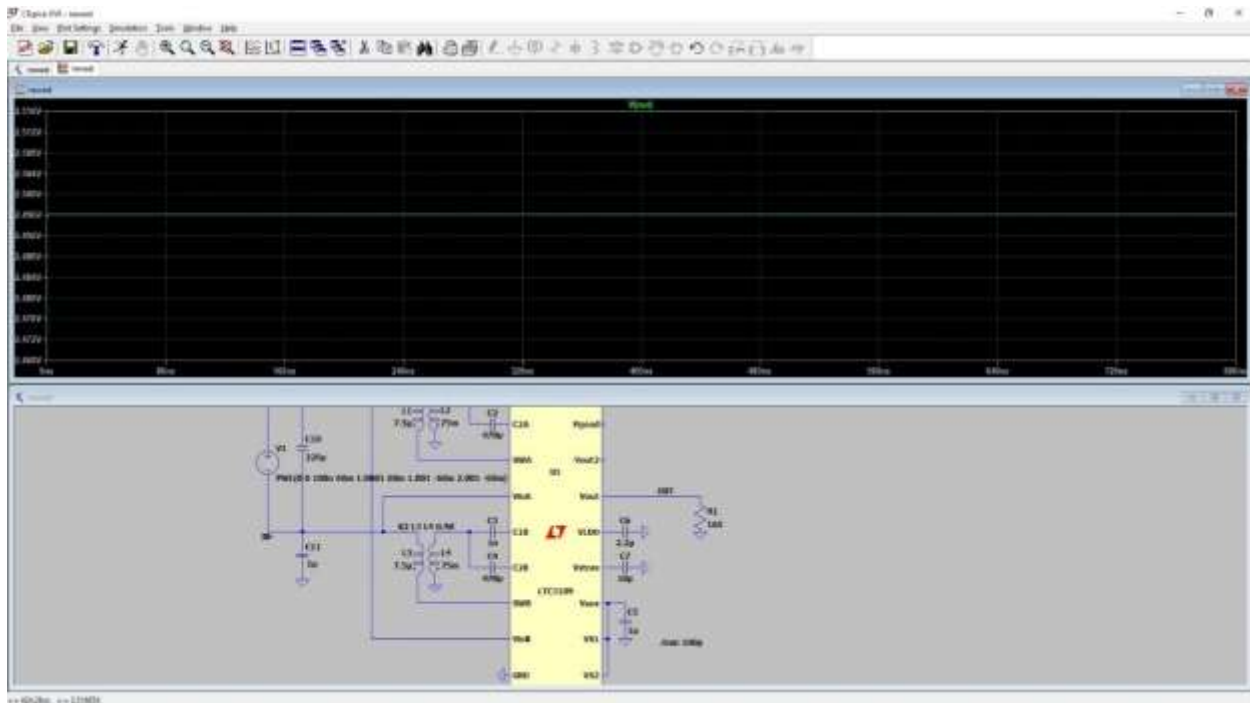


Σχήμα 2.22 Αντίσταση εισόδου στα 100mV από 1Ω έως 10Ω



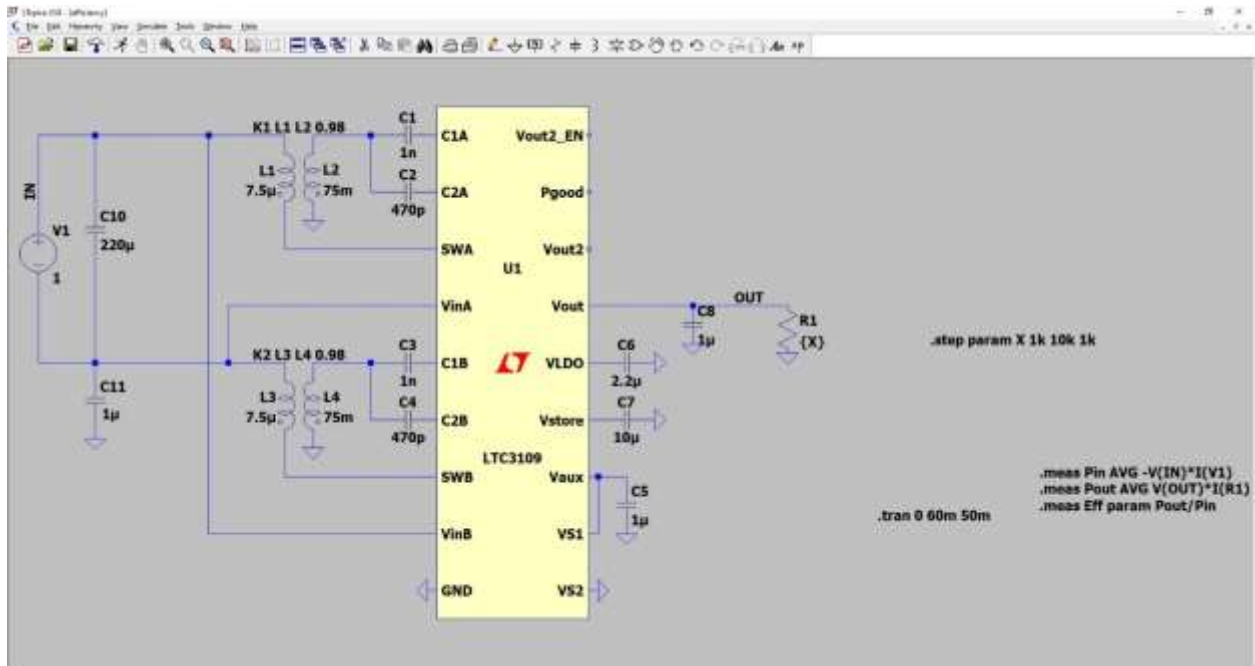
Σχήμα 2.23 Αντίσταση εισόδου στα 50mV από 1Ω έως 10Ω

Στο ολοκληρωμένο κύκλωμα, οι τιμές της αντίστασης εισόδου θα είναι διαφορετικές, λόγω των παράλληλων και εν σειρά αντιστάσεων από τα πηνία των μετασχηματιστών, και το ESR των πυκνωτών. Ο τρόπος με τον οποίο προσδιορίζουμε την αντίσταση εισόδου είναι ο εξής: προσθέτουμε μία DC τάση στα pin τροφοδοσίας του ολοκληρωμένου, σε σειρά με μία μεταβαλλόμενη αντίσταση, και μεταβάλλουμε την αντίσταση μέχρι να πάρουμε την μισή DC τάση εισόδου, για παράδειγμα στα 1V είσοδο, ψάχνουμε αντίσταση όπου να παίρνουμε τάση 500mV (Η οποία είναι τα 3Ω), δηλαδή να δημιουργήσουμε έναν διαιρέτη τάσης. Με αυτόν τον τρόπο γνωρίζουμε και την εσωτερική αντίσταση που βλέπει η πηγή μας στο κύκλωμα (3Ω). Την ίδια λογική ακολουθούμε και για την αντίσταση εξόδου, προσθέτοντας μία μεταβαλλόμενη αντίσταση στην γραμμή Vout. Η μόνη διαφορά είναι ότι επειδή δεν προλαβαίνουμε να παρατηρήσουμε την μεταβολή της τάσης εξόδου ώστε να δούμε την μισή τιμή, επειδή η γραμμή Vout δεν έχει φορτίσει πλήρως, ακολουθούμε τα εξής βήματα: 1)Θέτουμε προκαθορισμένες παραμέτρους-τιμές για τον πυκνωτή της γραμμής Vaux (5v) η οποία είναι υπεύθυνη για την φόρτιση της γραμμής Vout 2)Ρυθμίζουμε τον χρόνο προσομοίωσης σε έναν πολύ μικρό, προκειμένου να προλάβουμε την μεταβολή, ώστε να βρούμε την μισή τάση (2.5v), και με αυτόν τον τρόπο να ξέρουμε την εσωτερική αντίσταση εξόδου

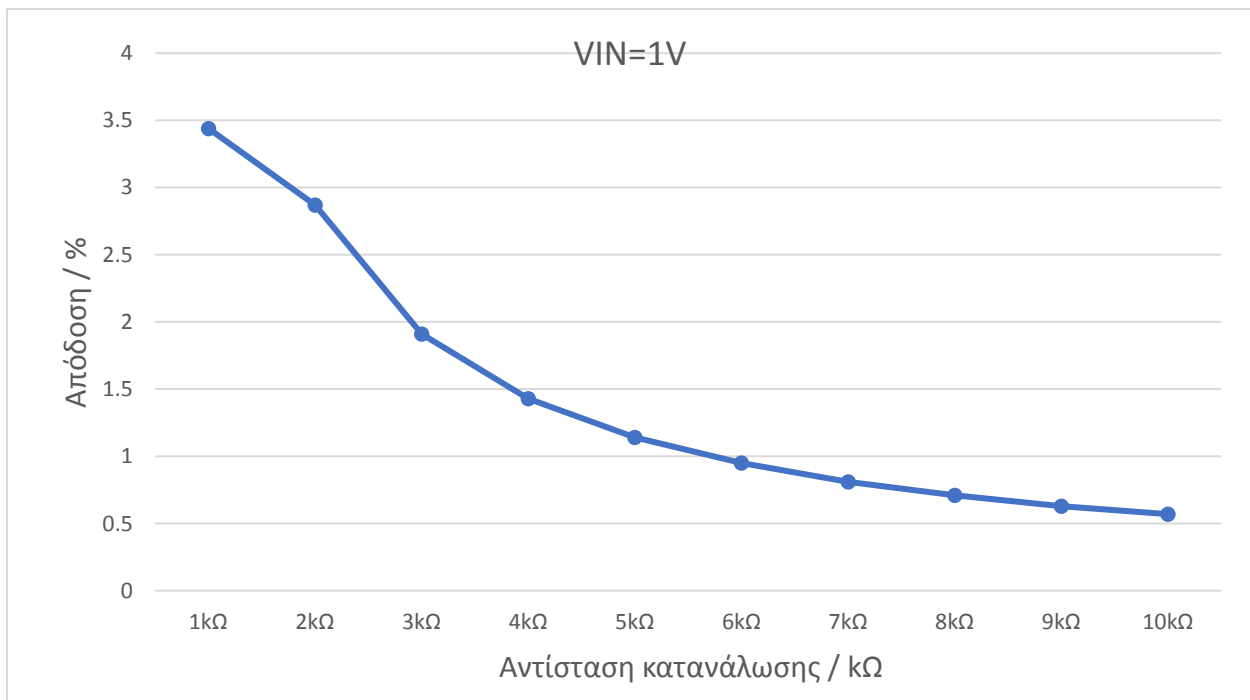


Σχήμα 2.24 Αντίσταση εξόδου 65Ω

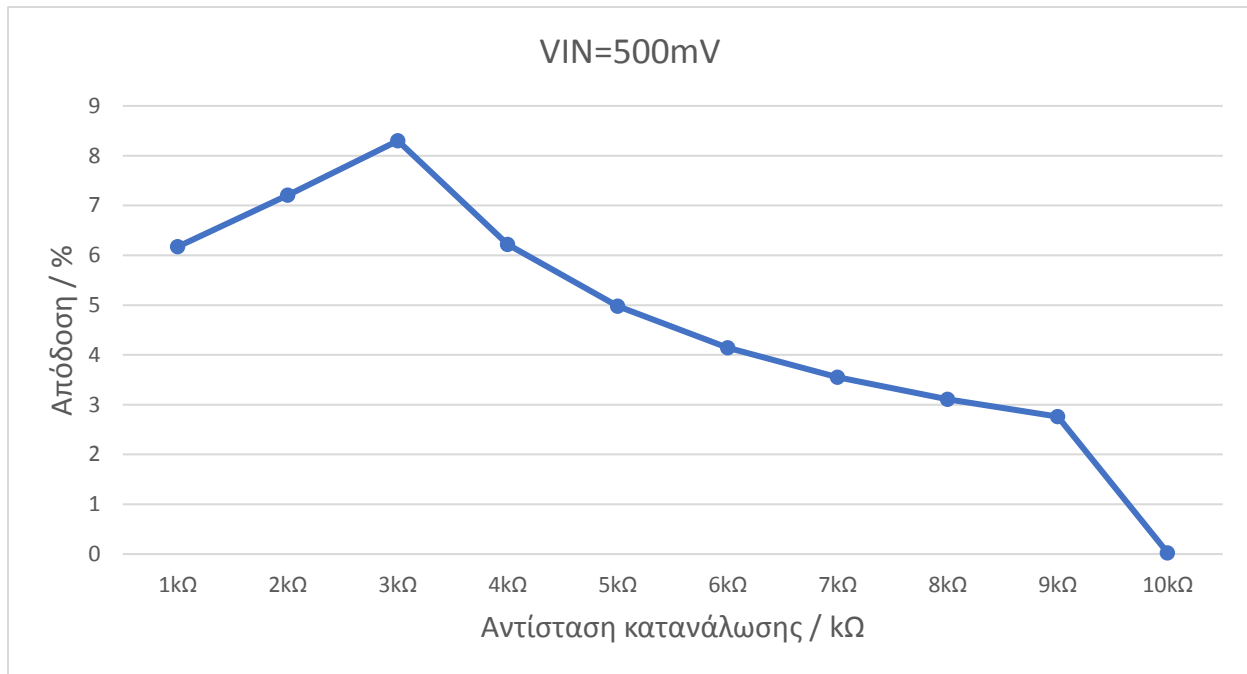
Αφού έχουμε βρει και τις εσωτερικές αντιστάσεις εισόδου και εξόδου, μπορούμε να υπολογίσουμε και την θεωρητική απόδοση που θα έχει το κύκλωμα, από τον τύπο P_{out}/P_{in} , δηλαδή την ισχύ εξόδου σε σχέση με της εισόδου. Η απόδοση εξαρτάται κυρίως από την τάση στην είσοδο και το φόρτο στην έξοδο, καθώς και από άλλους παράγοντες όπως οι αντιστάσεις των πυκνωτών, των μετασχηματιστών και κάποια συγκεκριμένα εσωτερικά κυκλώματα του ολοκληρωμένου τα οποία θα συζητηθούν παρακάτω. Η διαδικασία που ακολουθούμε είναι η εξής. Βρίσκουμε χωρίς την αντίσταση εξόδου, σε ποια στιγμή το σύστημα μας είναι σε steady state, με φορτισμένες τις γραμμές του. Αφού βρούμε σε πόσο χρόνο είναι σταθεροποιημένο, βάζουμε μία μεταβλητή αντίσταση στην έξοδο, την επιθυμητή τάση πηγής και ορίζουμε από τις επιλογές τις ρύθμισης, σε ποιόν χρόνο να αρχίσει την αποθήκευση δεδομένων, στην περίπτωση μας, όταν είμαστε σε steady state. Η συνάρτηση .meas θα μας βοηθήσει να βρούμε την ισχύ P_{out}/P_{in} . Αφού ολοκληρωθεί η προσομοίωση, μπορούμε στο error log να δούμε τις αποθηκευμένες τιμές όπως αυτές φαίνονται παρακάτω (Σχήματα 2.25 έως 2.29)



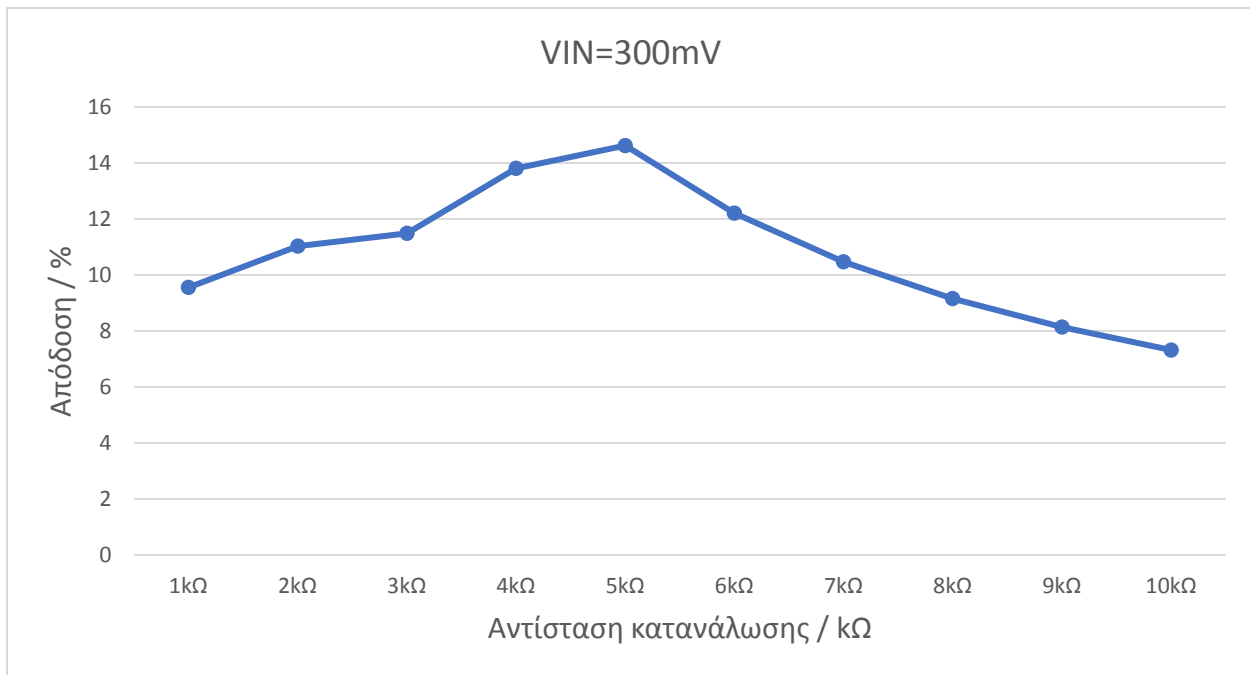
Σχήμα 2.25 Παράμετροι για τις εντολές εξαγωγής δεδομένων



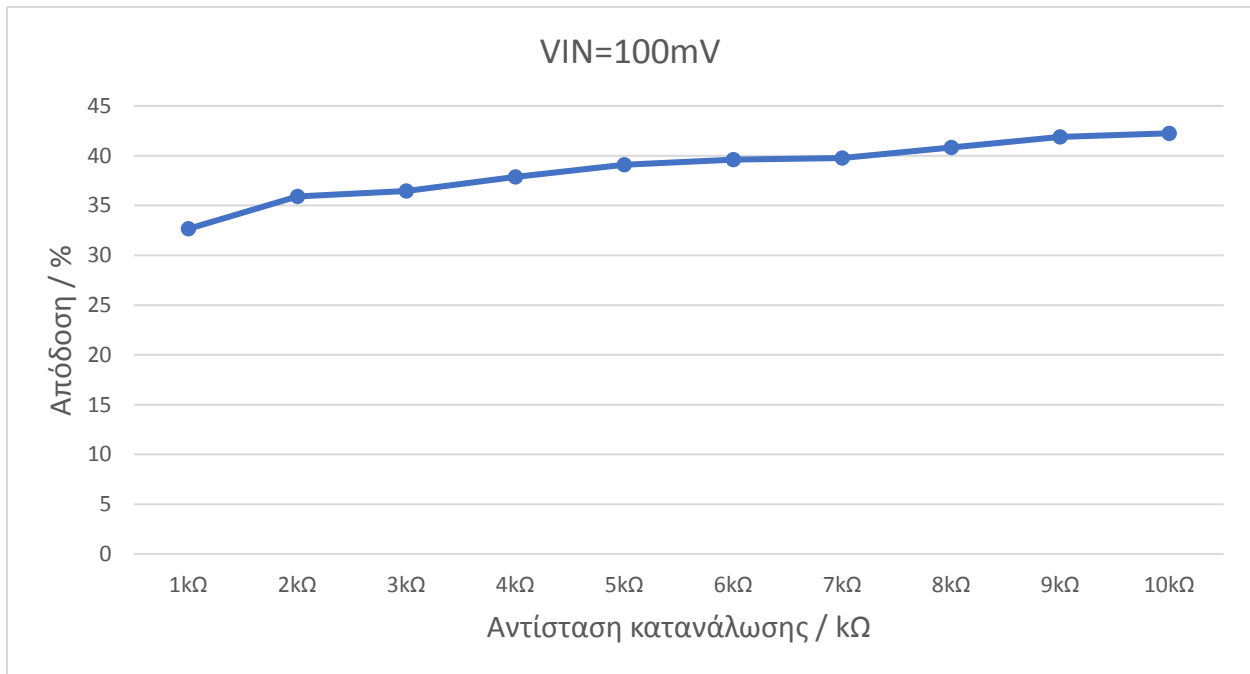
Σχήμα 2.26 Προσομοίωση SPICE της απόδοσης του συστήματος διαχείρισης ισχύος



Σχήμα 2.27 Προσομοίωση SPICE της απόδοσης του συστήματος διαχείρισης ισχύος

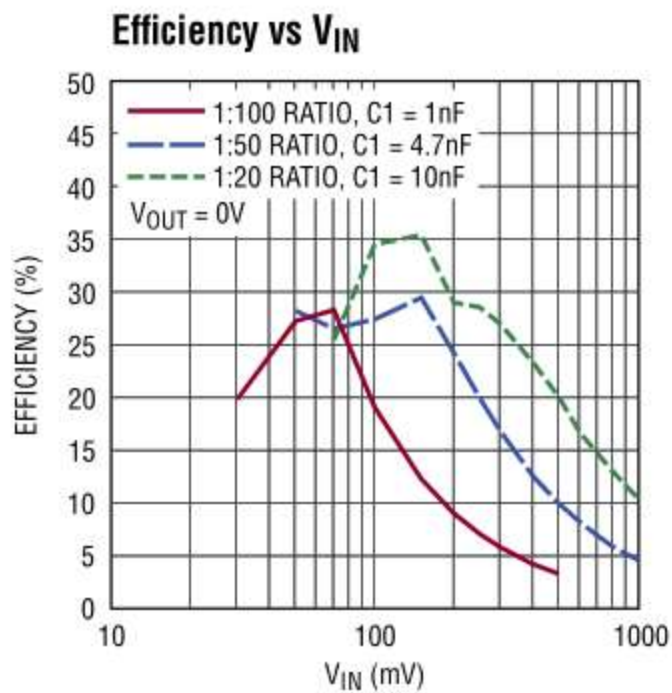


Σχήμα 2.28 Προσομοίωση SPICE της απόδοσης του συστήματος διαχείρισης ισχύος



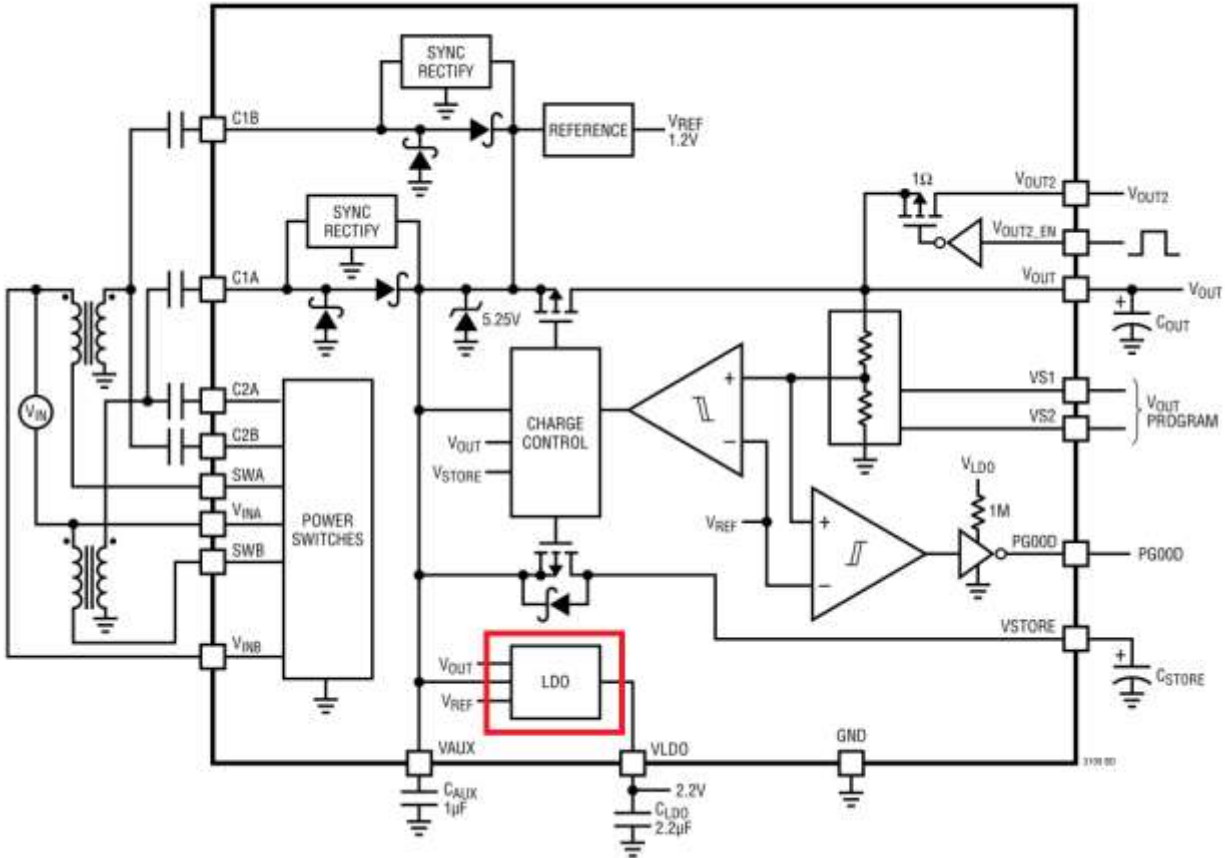
Σχήμα 2.29 Προσομοίωση SPICE της απόδοσης του συστήματος διαχείρισης ισχύος

Διακρίνουμε ότι οι τιμές που παίρνουμε κυμαίνονται πολύ κοντά σε αυτές του κατασκευαστή, με χαμηλότερες τιμές V_{in} να ισοδυναμούν με μεγαλύτερη αποδοτικότητα



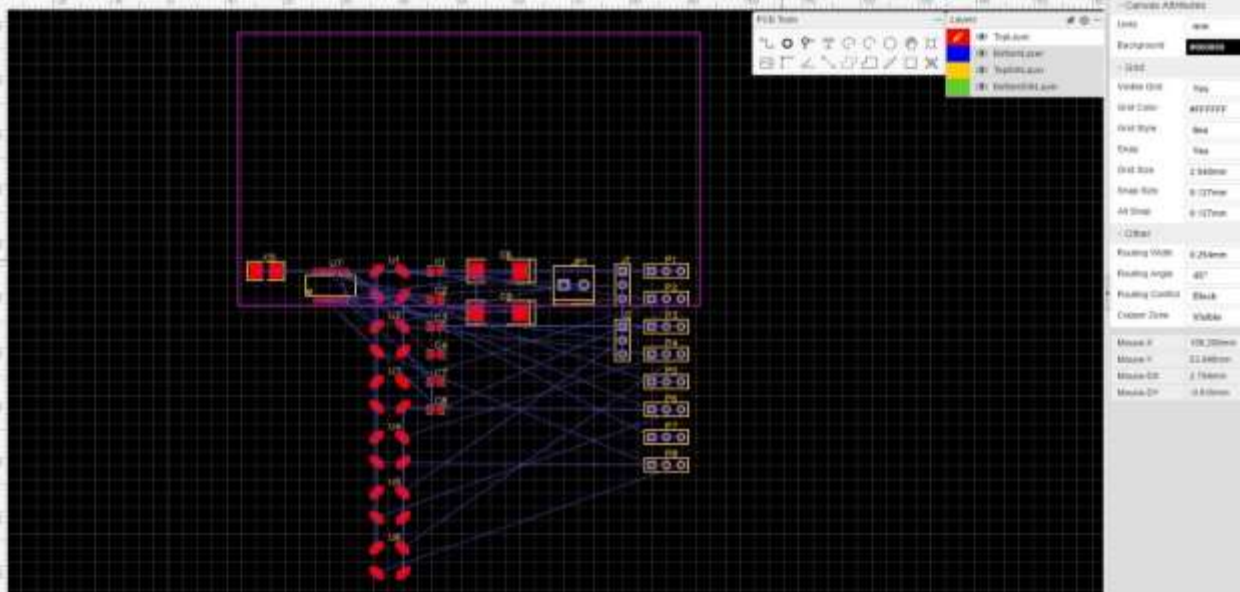
Σχήμα 2.30 Καμπύλες απόδοσης/τάσης εισόδου [7]

Οι απώλειες από τα εσωτερικά κυκλώματα του ολοκληρωμένου, οφείλονται κυρίως στον LDO(Low Dropout Linear Regulator) καθώς είναι γραμμικός, αλλά και στις αντιστάσεις που έχουν τα mosfet των sync rectify, power switches, charge control όταν άγουν

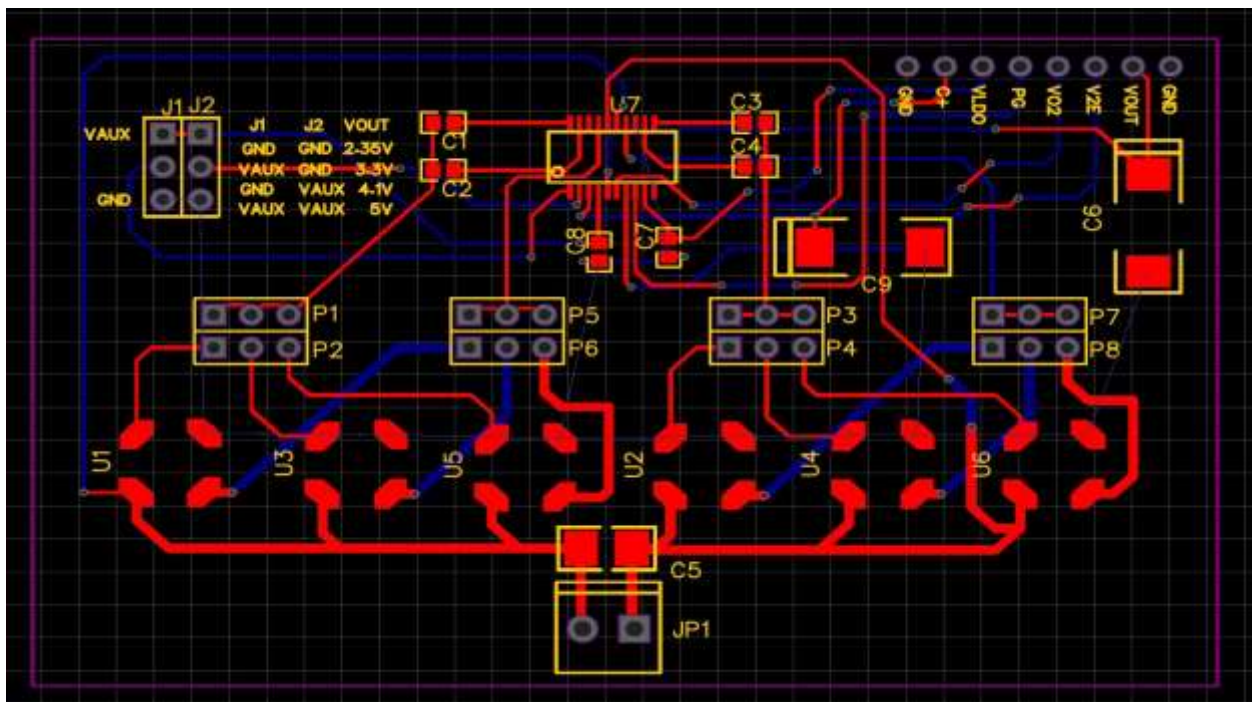


Σχήμα 2.31 Μπλόκ διάγραμμα LTC3109 [7]

Κατά την σχεδίαση θα πρέπει να επιλέξουμε τα σωστά μεγέθη των εξαρτημάτων μας, ώστε να βγαίνουν στο σωστό μέγεθος ύστερα στην σχεδίαση της πλακέτας. Αφού έχουμε το επιθυμητό σχέδιο, επιλέγουμε την επιλογή Convert to PCB ώστε να μεταφερθούμε στην σελίδα σχεδίασης. Το πρόγραμμα αυτόματα θα τοποθετήσει τα εξαρτήματα και θα ενώσει τις νοητές συνδέσεις, προκειμένου να ξέρουμε που συνδέονται οι γραμμές.

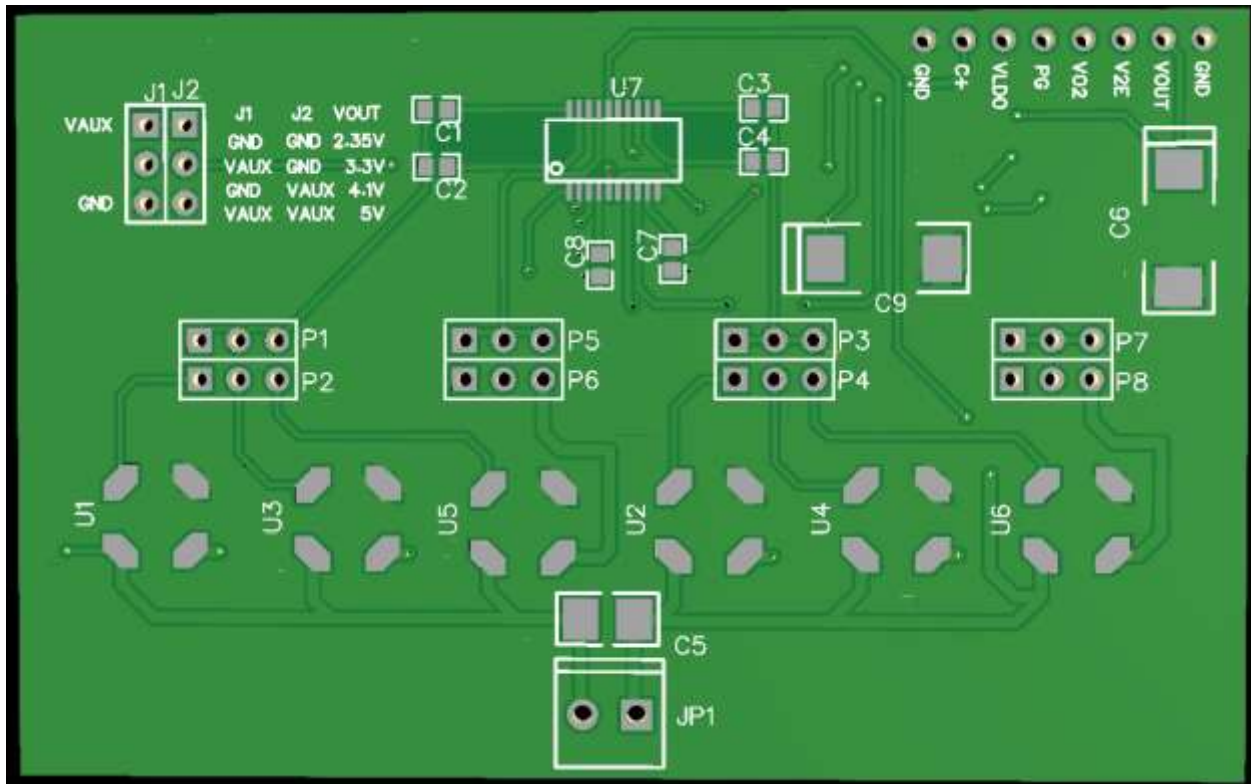


Σχήμα 3.2 Περιβάλλον σχεδίασης PCB [10]

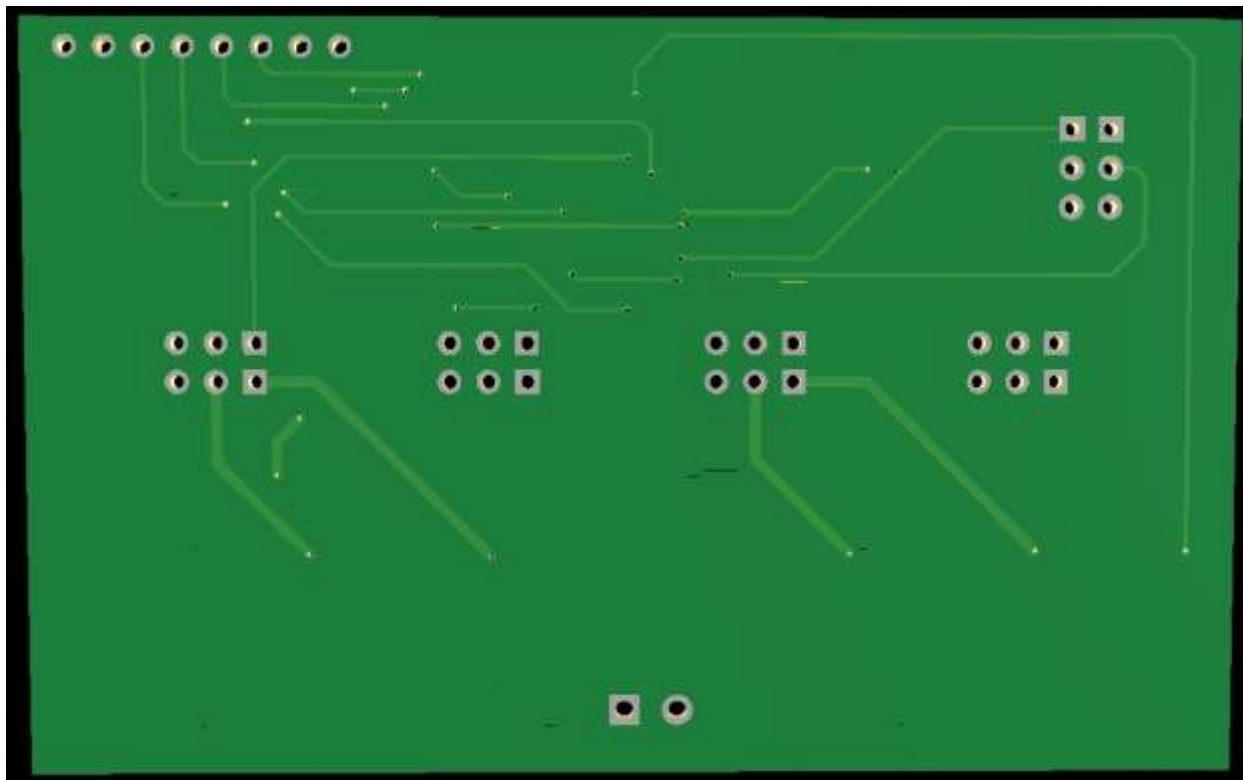


Σχήμα 3.3 Τελικό σχέδιο του PCB [10]

Ύστερα τοποθετούμε τα εξαρτήματα στα επιθυμητά σημεία ανάλογα τον σχεδιασμό μας, και συνδέουμε τις γραμμές μεταξύ τους. Οι κόκκινες γραμμές είναι στην επάνω πλευρά της πλακέτας και οι μπλε στην κάτω. Οι γραμμές τροφοδοσίας εισόδου είναι W-0.7mm με βάρος χαλκού 28Gram (1 Oz) , πλάτος πλακέτας 1.6mm και είναι ικανές να αντέξουν μέχρι και 1A ρεύμα. Οι υπόλοιπες μπορούν να είναι από W-0.3mm και κάτω, μιας και η λειτουργία τους είναι για σήματα και χαμηλή ισχύ. Η έξοδοι της πλακέτας επάνω αριστερά δίνουν την δυνατότητα για χρήση των γραμμών, Gnd, Vout, Vout2_En, Vout2, PowerGood, Vldo και μία γραμμή για εξωτερικό πυκνωτή αποθήκευσης. Η επάνω στρώση της πλακέτας που περισσεύει θα χρησιμοποιηθεί ως Gnd. Η τελική όψη θα είναι κάπως έτσι.



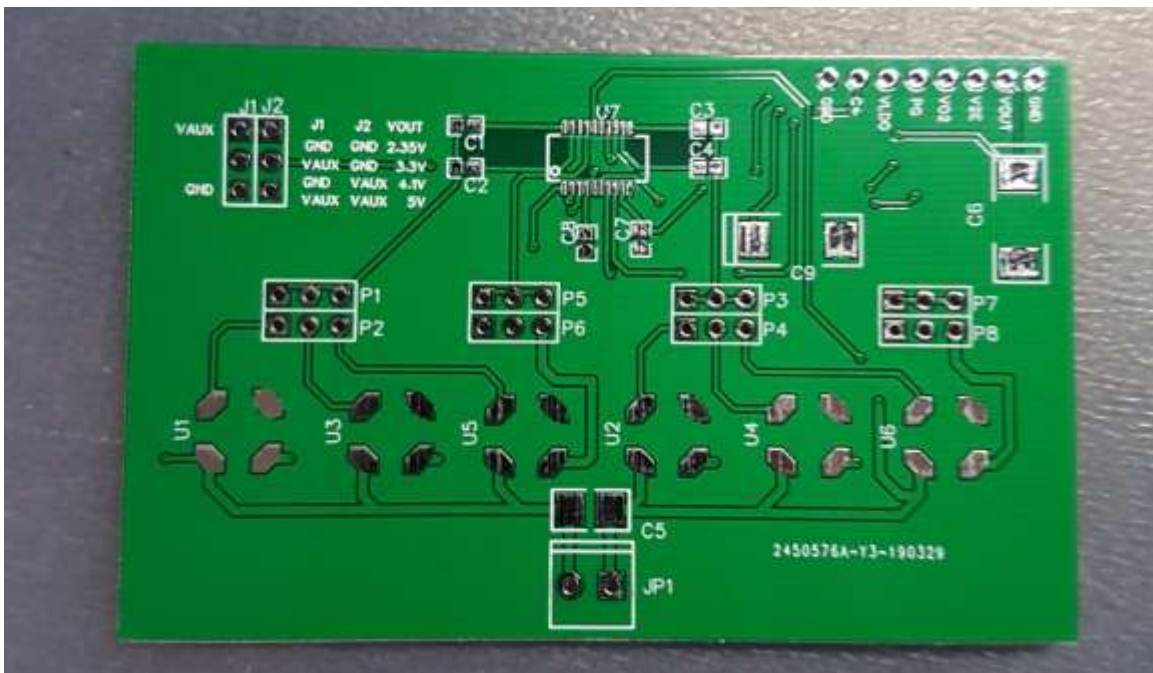
Σχήμα 3.4 Μπροστινό όψη της πλακέτας [10]



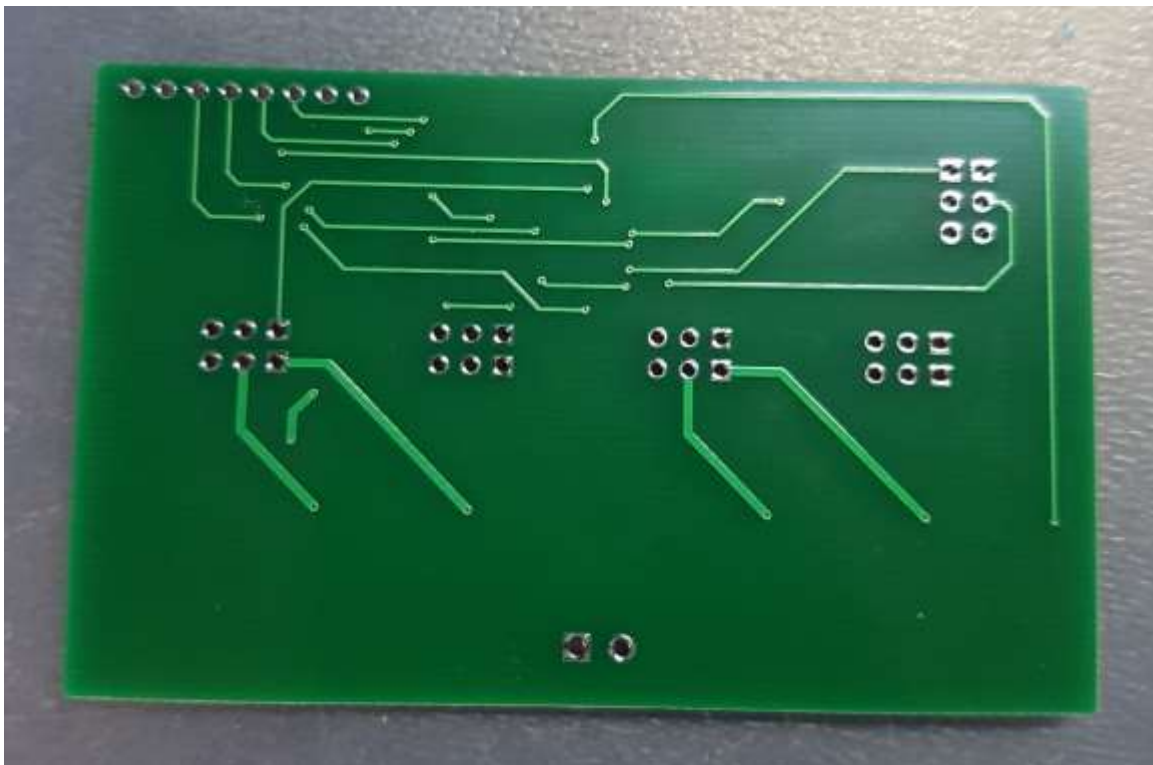
Σχήμα 3.5 Πίσω όψη της πλακέτας [10]

Αφού ολοκληρώσαμε και αυτό το κομμάτι, δημιουργούμε τα αρχεία Gerber, με τα οποία θα παραγγείλουμε την πλακέτα από τον κατασκευαστή. Η εταιρία παραγγελίας που θα χρησιμοποιήσουμε είναι η <https://jlcpcb.com/> καθώς προσφέρει παραγγελίες για διαστάσεις πλακέτας 100x100mm για 2 layers και 10 κομμάτια από 2 ευρώ στη πρώτη παραγγελία με παράδοση εντός 10 ημερών με DHL μεταφορική.

Μετά την παραλαβή, φαίνεται ότι έχει γίνει πολύ καλή δουλειά, και το PCB είναι ποιοτικό και όπως το ζητήσαμε

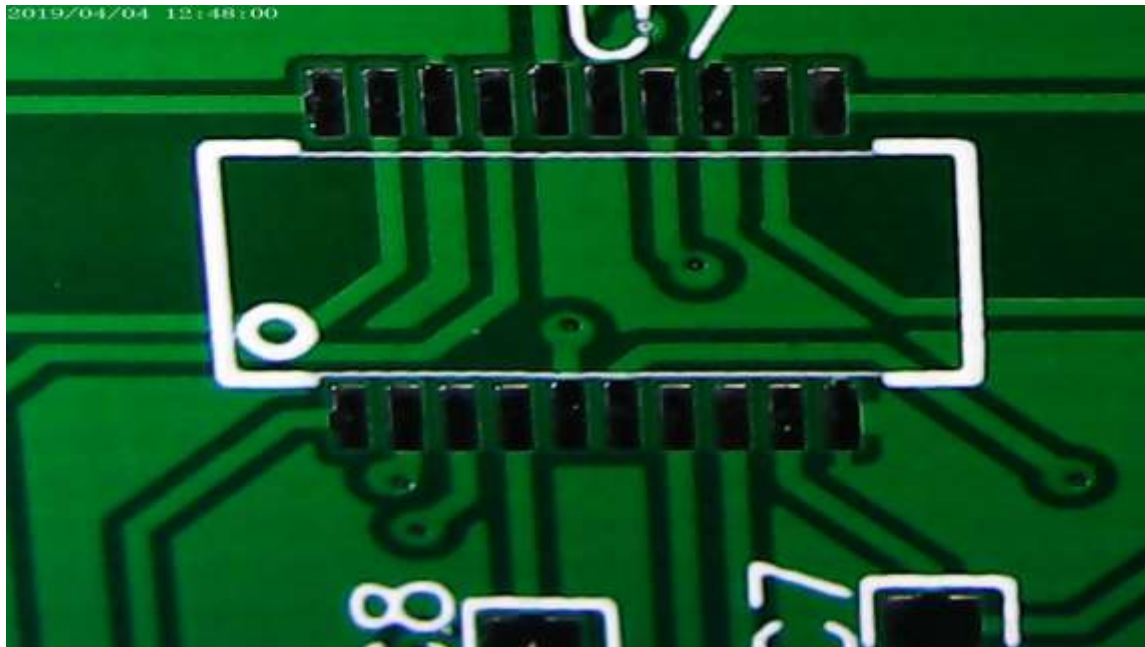


Σχήμα 3.6 Μπροστινή όψη της πλακέτας

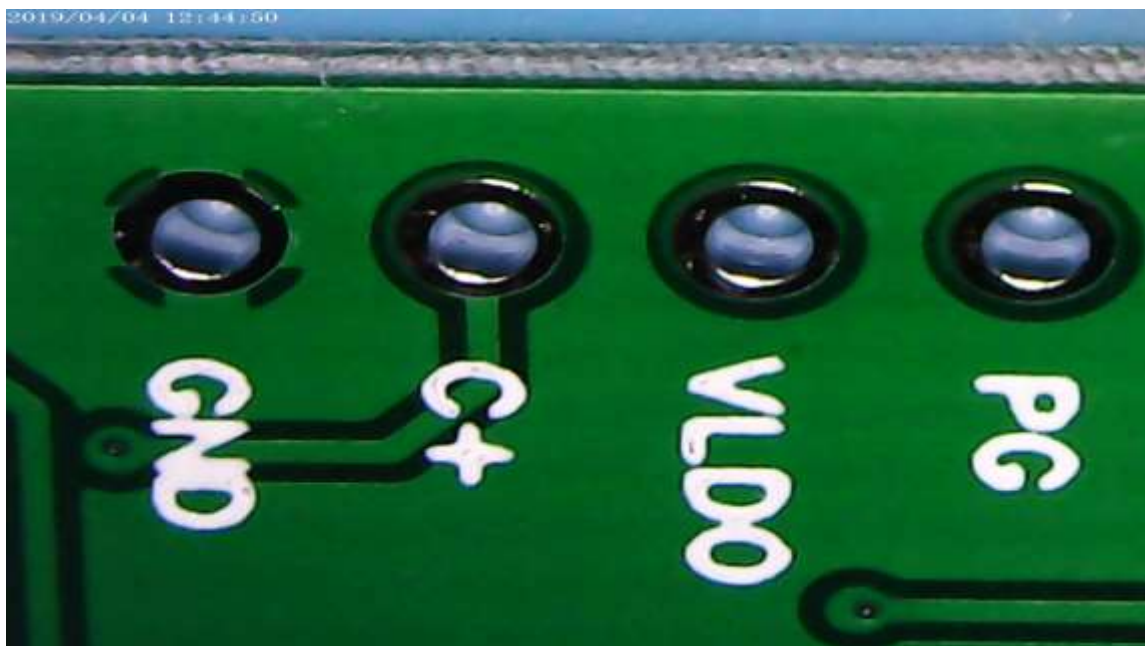


Σχήμα 3.7 Πίσω όψη της πλακέτας

Με έναν έλεγχο με το μικροσκόπιο, βλέπουμε ότι τα κενά ανάμεσα στα ποδαράκια του ολοκληρωμένου είναι σωστά και το στρώμα της πράσινης μάσκας είναι ομοιόμορφο, τα VIA είναι εντάξει, και οι οπές είναι σωστά γεμισμένες

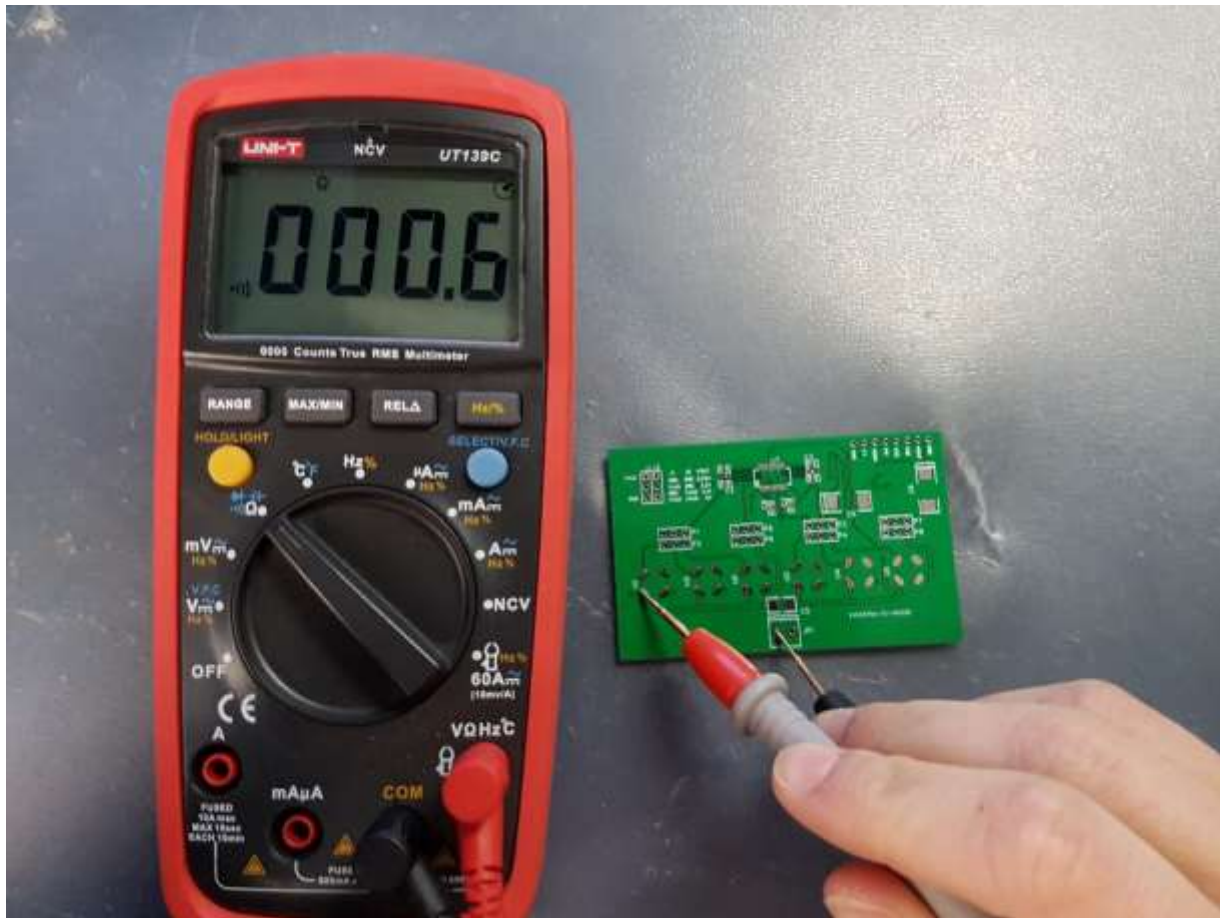


Σχήμα 3.7 Τα Solder pads του ολοκληρωμένου



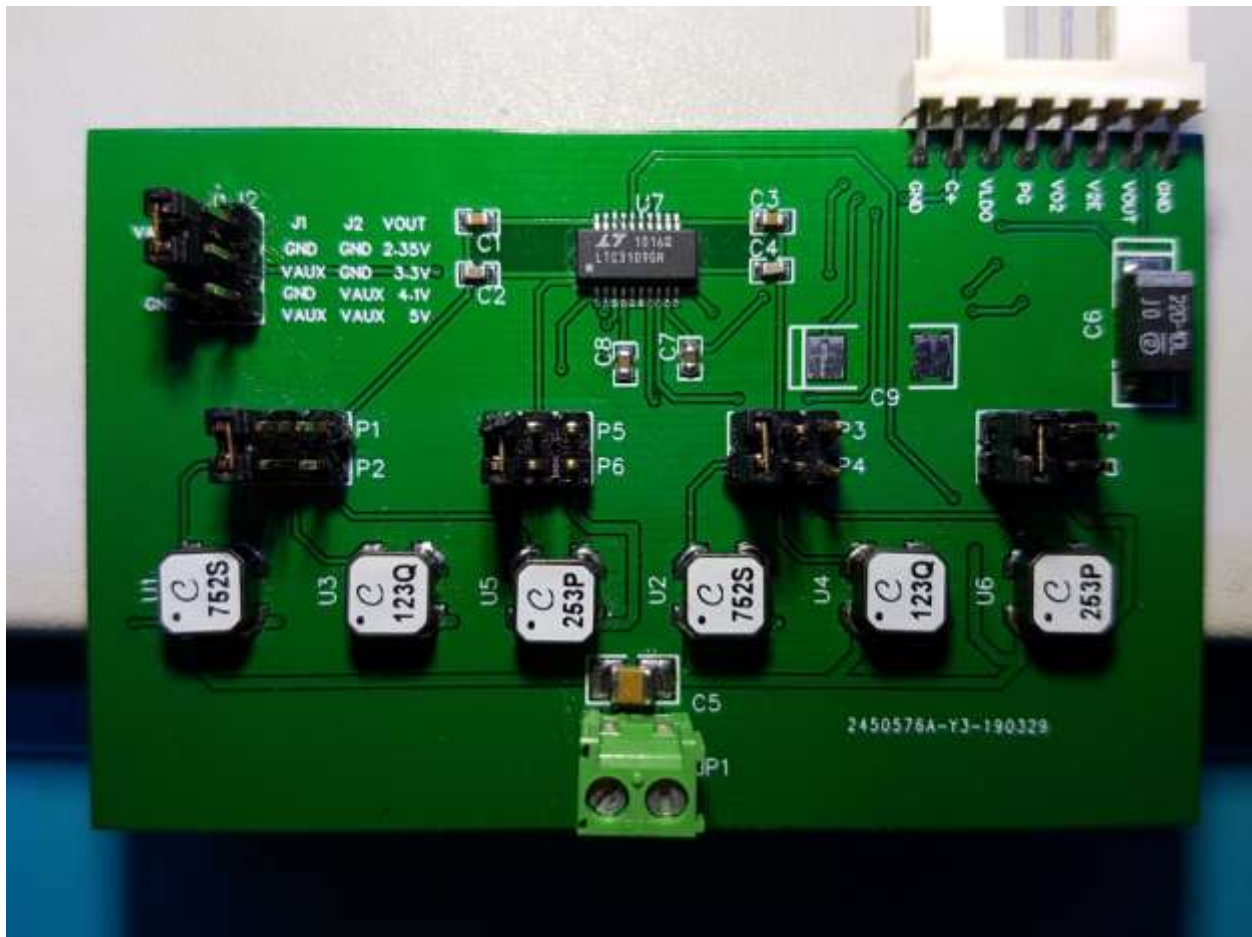
Σχήμα 3.8 Οι θύρες οπές των θυρών εξόδου

Ο επόμενος έλεγχος που θα πρέπει να κάνουμε με το πολύμετρο, είναι με continuity mode να ελέγξουμε την αντίσταση μεταξύ των γραμμών, ώστε να βεβαιωθούμε ότι όλα είναι σωστά



Σχήμα 3.9 Έλεγχος συνέχειας στις γραμμές της πλακέτας

Στην συνέχεια μπορούμε να συνεχίσουμε στις κολλήσεις των εξαρτημάτων. Η τεχνική που χρησιμοποιήθηκε για την κόλληση των SMD εξαρτημάτων, είναι με χρήση πάστας (solder paste) και ζεστού αέρα. Εφαρμόζουμε solder paste στα σημεία που πατάνε τα εξαρτήματα, τοποθετούμε τα SMD εξαρτήματα και τέλος με τον ζεστό αέρα γίνονται οι κολλήσεις. Με αυτόν τον τρόπο τα εξαρτήματα μπαίνουν αυτόματα στην σωστή θέση τους, λόγω της επιφανειακής τάσης όταν ρευστοποιείτε η πάστα επάνω στην πλακέτα (Surface Tension). Το μυστικό είναι όταν φυσάμε με τον ζεστό αέρα και δούμε την πάστα να ρευστοποιείται, να κουνάμε με τον αέρα δεξιά και αριστερά το εξάρτημα, ούτως ώστε να ευθυγραμμιστεί μόνο του. Με λίγο οινόπνευμα (IPA) καθαρίζουμε τα ορισμένα σημεία που έχουν κατάλοιπα από το flux της πάστας. Το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 3.10 Η τελική μορφή της πλακέτας

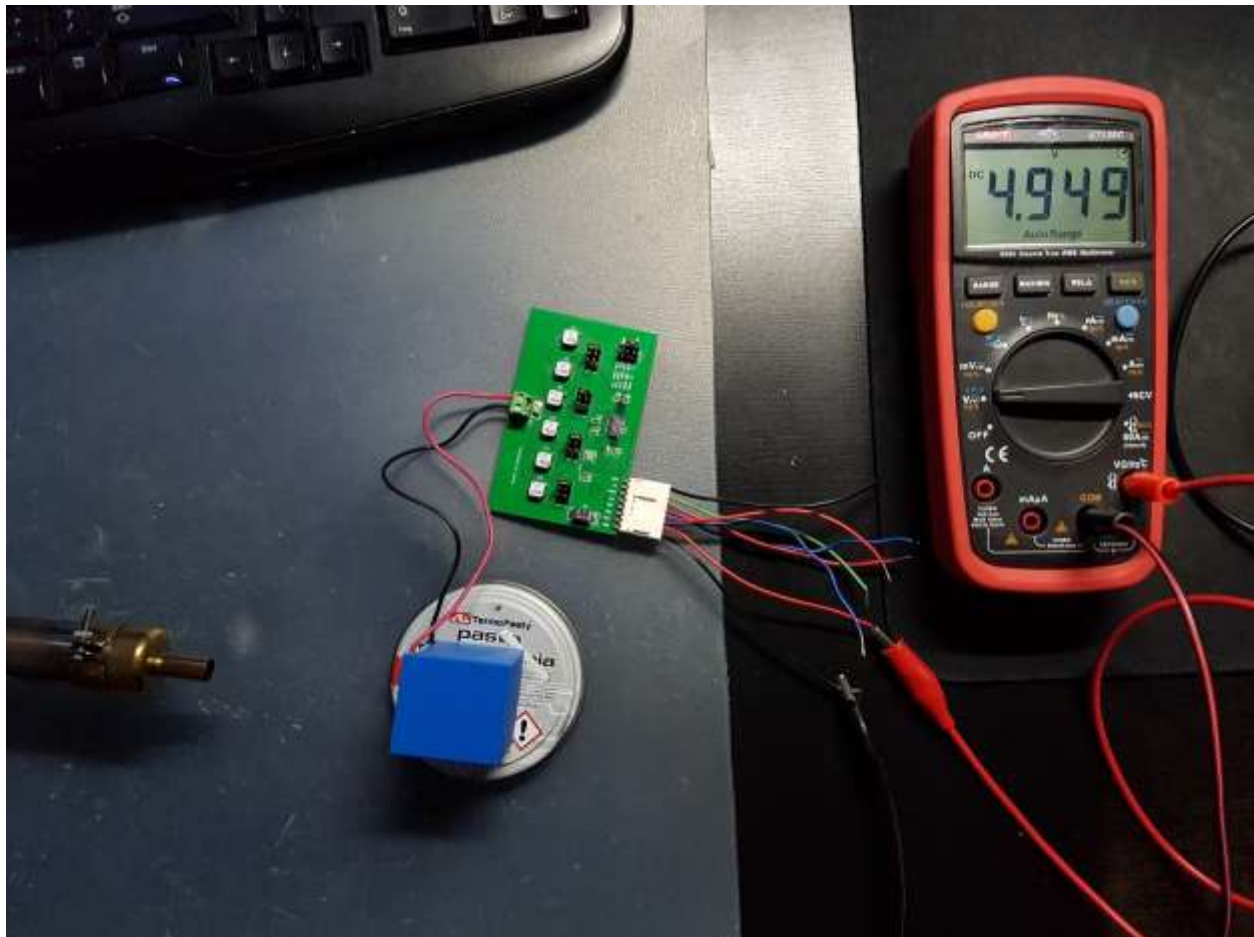


Σχήμα 3.11 Κόλληση των SMD μετασχηματιστών



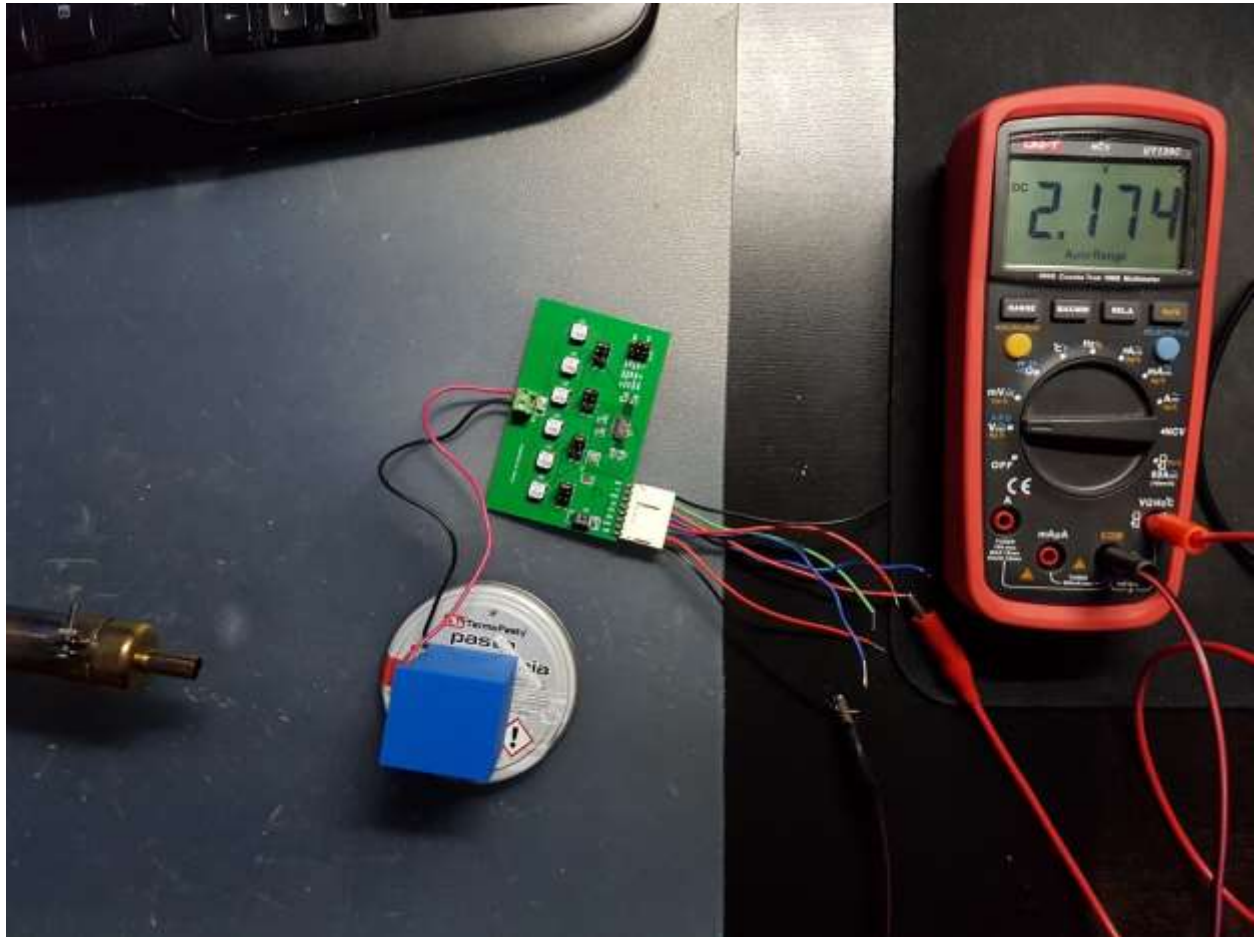
Σχήμα 3.12 Τα ποδαράκια του ολοκληρωμένου χωρίς γεφυρώματα

Στην συνέχεια αφού έχουμε σιγουρευτεί πως όλες οι κολλήσεις είναι σωστές και πως δεν υπάρχουν γεφυρώσεις και βραχυκυκλώματα, προχωράμε στον έλεγχο λειτουργίας. Χρησιμοποιώντας ένα TEG στην είσοδο, και με ένα πιστόλι θερμού αέρα ζεσταίνουμε ελάχιστα την μία πλευρά, και κρατάμε την άλλη δροσερή με την χρήση ενός PCM, το οποίο περιέχει νερό και ως αυτού προσφέρει μεγάλη χωρητικότητα θερμικής ενέργειας, ώστε να πετύχουμε ΔT τουλάχιστον 15-20 °C ανά πλευρά. Παρακάτω έχουμε ρυθμίσει τάση V_{out} 5V με 1:100 μετασχηματιστές και η τιμή που παίρνουμε είναι πολύ κοντά στην αναμενόμενη.



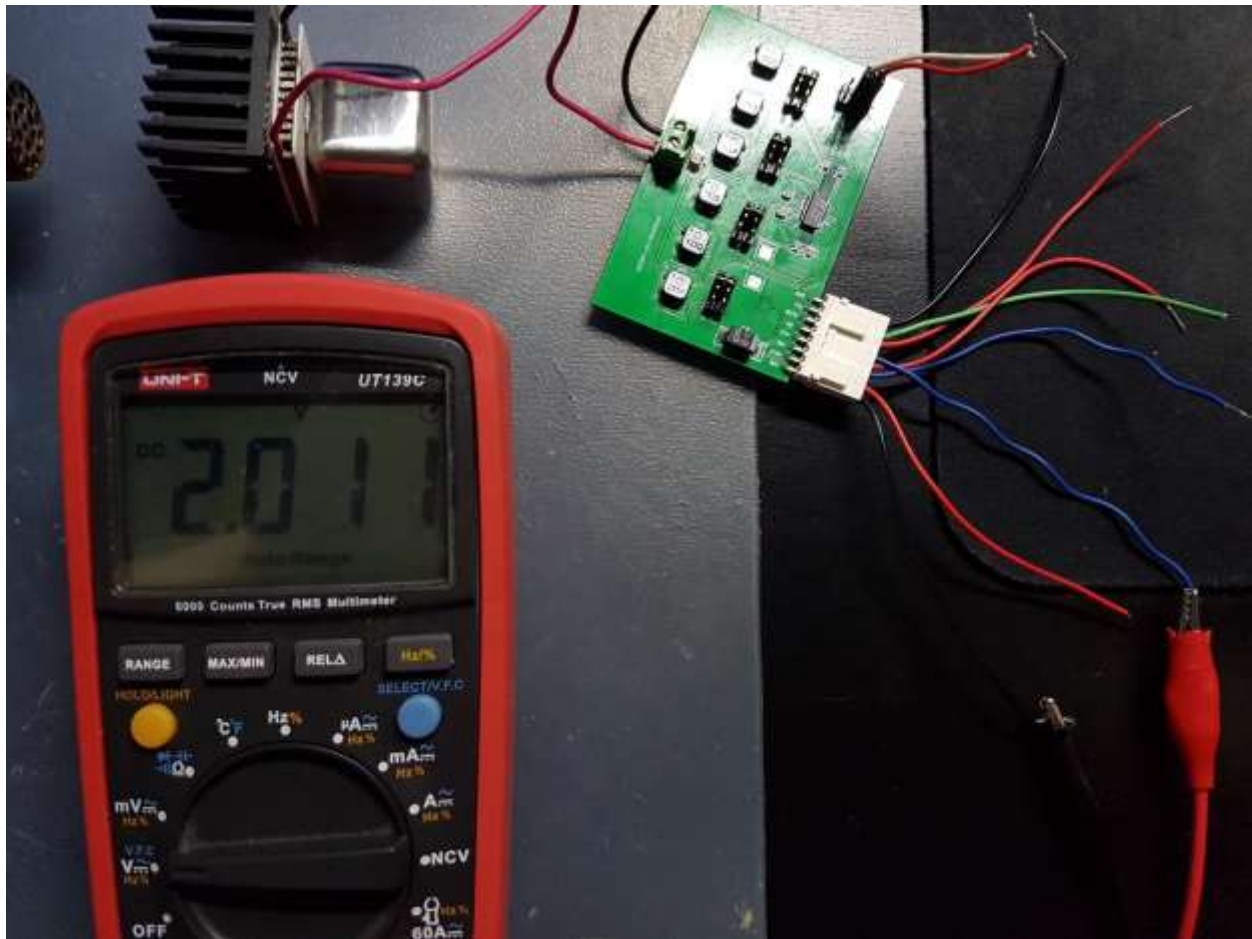
Σχήμα 3.13 Γραμμή V_{out}

Παρακάτω στην ίδια διάταξη μετράμε τάση V_{ldo} , και η τιμή είναι κοντά στην αναμενόμενη των 2.2V



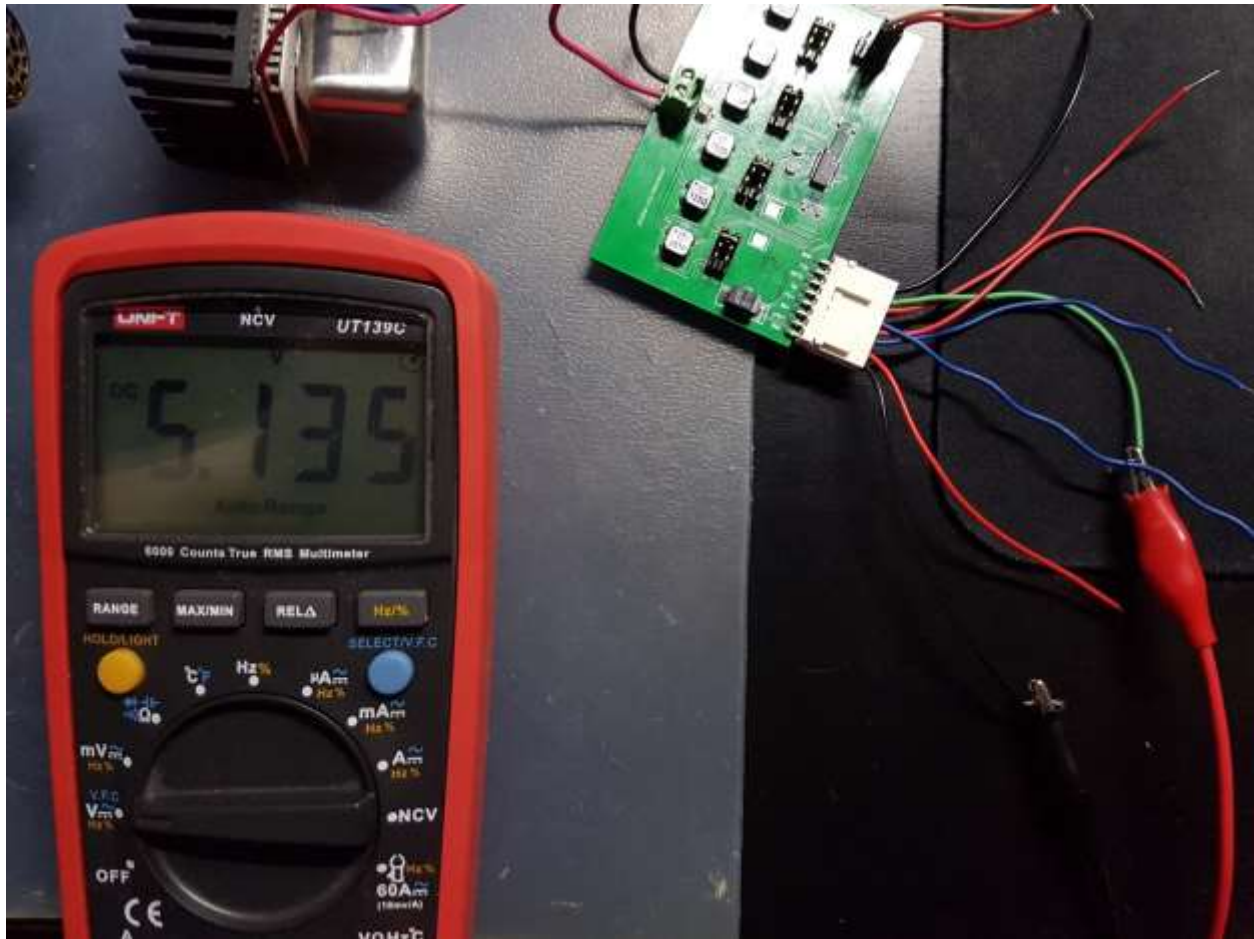
Σχήμα 3.14 Η γραμμή V_{ldo}

Με μία μικρή τροποποίηση στην διάταξη, πρόσθεσα μία ψύκτρα στην ζεστή πλευρά, και το PCM χωρίς το πλαστικό περίβλημα, προκειμένου το TEG να δίνει ενέργεια για λίγο περισσότερο χρόνο, μιάς και θα αποθηκεύει θερμότητα η ψύκτρα. Και οι δύο διατάξεις λειτουργούν το ίδιο καλά, απλά η τροποποίηση έγινε για λόγους ευκολίας αναπαράστασης. Παρακάτω φαίνεται η γραμμή PGOOD



Σχήμα 3.15 Η γραμμή PGOOD

Η γραμμή C+ για την φόρτιση του πυκνωτή.



Σχήμα 3.16 Η γραμμή φόρτισης του πυκνωτή C+

Συμπεράσματα

Η εφαρμογές για την συγκεκριμένη συσκευή είναι αμέτρητες, και μπορούν να προσφέρουν βοήθεια σε διάφορους επιστημονικούς κλάδους όπου υπάρχει ανάγκη για συνεχή τροφοδότηση κυκλωμάτων με μικρές ενεργειακές απαιτήσεις (αισθητήρες, ασύρματη επικοινωνία κ.ο.κ). Παρόλα αυτά ακόμη και με τις διάφορες κλίμακες με την χρήση των μετασχηματιστών, είναι δύσκολο να πετύχουμε μια σταθερή κατάσταση με την απαραίτητη διαφορά θερμοκρασίας, προκειμένου να έχουμε και μία σταθερή είσοδο ενέργειας από το TEG. Ας μην ξεχνάμε όμως ότι η ύπαρξη ενός υπερπυκνωτή βοηθάει στο να μην χάνουμε κανένα ποσό ενέργειας που λαμβάνουμε, προκειμένου να έχουμε ένα απόθεμα σε περίπτωση ανάγκης. Η συσκευή θα μπορούσε να βελτιωθεί και περαιτέρω με την προσθήκη SMD εναλλάκτη τύπου 2 way 3 pole slide switch, η ακόμη και να προστεθεί ένα κύκλωμα όπου θα κάνει αυτόματα την εναλλαγή των μετασχηματιστών, με βάση τα δεδομένα εισόδου

Βιβλιογραφία

- [1] TEG: <https://uk.rs-online.com/web/p/peltier-modules/4901323/>
- [2] SSOP/QFN: <https://gr.mouser.com/Search/Refine?Keyword=ltc3109>
- [3] Blackbox: <https://www.aviationcv.com/aviation-blog/2016/black-boxes-surprising-facts>
- [4] Weather station: <http://www.romcomm.com/WeatherStation.html>
- [5] Wireless sensor:
http://www.libelium.com/wireless_sensor_networks_m2m_logistics_operations/
- [6] Smart home: <https://medium.com/@joshdotai/smart-homes-will-change-our-way-of-life-573399678b29>
- [7] Power sequence/Schematics/Efficiency graphs:
<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3109fb.pdf>
- [8] Sea Sensors: <http://www3.mbari.org/chemsensor/teamdurafet/>
- [9] SMD Transformer: <https://uk.farnell.com/coilcraft/lpr6235-752smrb/coupled-inductor-7-5uh-1-6a-20/dp/2434775>
- [10] Περιβάλλον σχεδίασης EasyEDA: <https://easyeda.com/>
- [11] Πρόγραμμα LTSPICE: <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltpice-simulator.html>