

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«Προσομοιωτής Μπαταρίας»



Του φοιτητή
Καρακόλια Δημήτρη
Αρ. Μητρώου: 517048

Επιβλέπων
Ονοματεπώνυμο Κιοσκερίδης
Ιορδάνης
Βαθμίδα Καθηγητής

Ημερομηνία 04-09-2026

Τίτλος Π.Ε. Προσομοιωτής Μπαταρίας
Κωδικός Π.Ε. 25283
Ονοματεπώνυμο φοιτητή Καρακόλιας-Δημήτρης
Ονοματεπώνυμο εισηγητή Κιοσκερίδης-Ιορδάνης
Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε. 10-07-2025
Ημερομηνία περάτωσης Π.Ε. 04-09-2026

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως πτυχιακή εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Καρακόλια Δημήτρη που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Πρόλογος

Η επιλογή του θέματος της παρούσας πτυχιακής εργασίας βασίστηκε στο ενδιαφέρον για τη σχεδίαση και την υλοποίηση ηλεκτρονικών συστημάτων ισχύος, αλλά και στην πρακτική ανάγκη δημιουργίας ενός εργαστηριακού εργαλείου που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πραγματικές δοκιμές ηλεκτρονικών προϊόντων. Η ανάπτυξη ενός προσομοιωτή μπαταρίας αποτέλεσε μια ολοκληρωμένη διαδικασία, καθώς συνδύασε τη θεωρητική μελέτη ενός τελεστικού ενισχυτή ισχύος με τη σχεδίαση ηλεκτρονικού κυκλώματος, την κατασκευή πλακέτας, τη μηχανική σχεδίαση και, τελικά, την πειραματική αξιολόγηση της συσκευής.

Μέσα από την εκπόνηση της εργασίας δόθηκε η δυνατότητα να εφαρμοστούν στην πράξη γνώσεις ηλεκτρονικής, σχεδίασης PCB και θερμικής διαχείρισης, καθώς και να χρησιμοποιηθούν εργαλεία όπως τα Pulsonix, CircuitCAM, LPKF και SolidWorks. Ιδιαίτερα σημαντική ήταν η μετάβαση από τη θεωρητική σχεδίαση σε μια πραγματική λειτουργική κατασκευή, όπου παράμετροι όπως η συμπεριφορά υπό φορτίο, η σταθερότητα, η ψύξη και η ασφαλής διαχείριση του ρεύματος αποκτούν άμεση πρακτική σημασία.

Η εργασία αυτή συνέβαλε ουσιαστικά στην καλύτερη κατανόηση της συνολικής διαδικασίας ανάπτυξης ενός ηλεκτρονικού συστήματος, από τον αρχικό προσδιορισμό των απαιτήσεων έως την κατασκευή και την εργαστηριακή επαλήθευσή του.

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αφορά τη μελέτη, σχεδίαση, κατασκευή και πειραματική αξιολόγηση ενός προσομοιωτή μπαταρίας για εργαστηριακή χρήση και για τον έλεγχο ηλεκτρονικών προϊόντων υπό ελεγχόμενες συνθήκες τροφοδοσίας. Στόχος της κατασκευής είναι η δημιουργία μιας ρυθμιζόμενης ηλεκτρονικής πηγής που μπορεί να υποκαταστήσει λειτουργικά μια πραγματική μπαταρία σε συγκεκριμένες δοκιμές, παρέχοντας ελεγχόμενη τάση και δυνατότητα αμφίδρομης ροής ρεύματος.

Κεντρικό στοιχείο της βαθμίδας ισχύος αποτελεί ο τελεστικός ενισχυτής ισχύος OPA549. Μελετήθηκαν τα ηλεκτρικά και θερμικά χαρακτηριστικά του, η λειτουργία source και sink, ο προγραμματιζόμενος περιορισμός ρεύματος, η ασφαλής περιοχή λειτουργίας και οι απαιτήσεις ψύξης. Στη συνέχεια σχεδιάστηκε το συνολικό ηλεκτρονικό κύκλωμα και η πλακέτα PCB στο Pulsonix. Για την επαλήθευση της σχεδίασης κατασκευάστηκε δοκιμαστική πλακέτα με σύστημα LPKF, ενώ το μηχανικό περίβλημα και η πρόσοψη σχεδιάστηκαν στο SolidWorks.

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε θερμογραφική αξιολόγηση της βαθμίδας OPA549 με θερμική κάμερα FLIR κατά τη λειτουργία απορρόφησης ρεύματος, η οποία κατέδειξε την αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας της βαθμίδας ισχύος καθώς το ρεύμα αυξανόταν από 1A σε 5A.

Η τελική διάταξη αξιολογήθηκε εργαστηριακά με παλμογράφο και ηλεκτρικό φορτίο. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της εξόδου χωρίς και με ωμικό φορτίο $10\Omega / 10W$ στις ρυθμίσεις των 10V και 20V, καθώς και καταγραφή της μεταβατικής συμπεριφοράς κατά τη σύνδεση του φορτίου. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε δοκιμή με πραγματική μπαταρία 6,4V, κατά την οποία επιβεβαιώθηκε η αλλαγή της κατεύθυνσης του ρεύματος καθώς η τάση του προσομοιωτή μεταβαλλόταν εκατέρωθεν της τάσης της μπαταρίας. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τη βασική λειτουργικότητα της κατασκευής ως ελεγχόμενης εργαστηριακής πηγής και φορτίου, ενώ παράλληλα αναδεικνύουν τα πραγματικά όρια και τις δυνατότητες μελλοντικής εξέλιξής της σε ψηφιακά ελεγχόμενο προσομοιωτή μπαταρίας.

«Battery Simulator»

«Karakolias Dimitris»

Abstract

This thesis presents the study, design, construction, and experimental evaluation of a battery simulator intended for laboratory use and for testing electronic products under controlled power-supply conditions. The main objective is to develop an adjustable electronic source capable of functionally replacing a real battery in specific test scenarios by providing controlled output voltage and bidirectional current capability.

The OPA549 high-power operational amplifier is used as the core element of the power stage. Its electrical and thermal characteristics, source and sink operation, programmable current limiting, Safe Operating Area, and cooling requirements are examined. The complete electronic circuit and PCB were subsequently designed using Pulsonix. A prototype PCB was manufactured using an LPKF system in order to verify the design before final implementation, while the mechanical enclosure and front panel were designed in SolidWorks.

A thermal evaluation of the OPA549 power stage was also performed using a FLIR thermal camera during current-sinking operation, demonstrating an increase in the measured surface temperature as the absorbed current was increased from 1A to 5A.

The completed device was experimentally evaluated using an oscilloscope and electrical loads. Output measurements were performed under no-load and loaded conditions using a 10Ω / 10W resistor at 10V and 20V settings, together with measurements of the transient response during load connection. An additional experiment was conducted using a real 6.4V battery. By varying the simulator voltage above and below the battery voltage, the measurements demonstrated a reversal in current direction, confirming the intended source/sink behavior of the system. Overall, the experimental results verify the basic functionality of the developed device as a controllable laboratory power source and load, while also identifying practical limitations and providing a basis for future development toward a digitally controlled and programmable battery simulator.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	iii
Περίληψη.....	iv
Abstract	v
Περιεχόμενα	vi
Κατάλογος Σχημάτων	x
Κατάλογος Πινάκων.....	xii
Συντομογραφίες.....	xiii
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή, αντικείμενο, στόχοι και μεθοδολογία	14
1.1 Αντικείμενο της εργασίας	14
1.2 Ανάγκη και χρησιμότητα ενός προσομοιωτή μπαταρίας	14
1.3 Προσομοιωτής μπαταρίας και συμβατικό εργαστηριακό τροφοδοτικό	15
1.4 Ενδεικτικά σενάρια χρήσης.....	15
1.5 Στόχος της εργασίας.....	16
1.6 Βασικές τεχνικές απαιτήσεις της κατασκευής.....	16
1.7 Μεθοδολογία ανάπτυξης.....	17
1.8 Ασφάλεια, αξιοπιστία και επαναληψιμότητα.....	18
1.9 Περιορισμοί και όρια της προσέγγισης.....	18
1.10 Δομή Εργασίας.....	19
1.11 Συμπεράσματα κεφαλαίου	19
Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό υπόβαθρο και αναλυτική μελέτη OPA549.....	21
2.1 Εισαγωγή.....	21
2.2 Από τον ιδανικό τελεστικό ενισχυτή στον τελεστικό ενισχυτή ισχύος.....	22
2.3 Λειτουργία source και sink.....	23
2.4 Βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά.....	23
2.4.1 Ο OPA549 δεν είναι rail-to-rail.....	24
2.4.2 Ακρίβεια μικρού σήματος	24
2.4.3 Απόκριση συχνότητας και δυναμικά χαρακτηριστικά	25
2.5 Ακροδέκτες και λειτουργικές είσοδοι	26
2.5.1 Οι είσοδοι +IN και -IN	26
2.5.2 Ο ακροδέκτης Ref.....	26
2.5.3 Ο ακροδέκτης E/S.....	26
2.5.4 Πρακτική σημασία του E/S στην κατασκευή.....	26

2.6	Αρνητική ανάδραση και ρύθμιση τάσης εξόδου	27
2.7	Προγραμματιζόμενος περιορισμός ρεύματος.....	27
2.7.1	Πώς εμφανίζεται το current limit στην πράξη.....	29
2.7.2	Γιατί το current limit δεν είναι μετρητής ακριβείας.....	29
2.8	Τροφοδοσία και αποσύζευξη	29
2.9	Δυναμική συμπεριφορά και ευστάθεια	29
2.10	Safe Operating Area και ηλεκτρική καταπόνηση.....	30
2.11	Απώλειες ισχύος και θερμική συμπεριφορά	32
2.11.1	Παράδειγμα υπολογισμού ψύκτρας	32
2.11.2	Θερμοκρασία και προσδόκιμο λειτουργίας.....	33
2.11.3	Thermal shutdown και αξιοπιστία.....	34
2.12	Προστασία εξόδου και αντιδραστικά φορτία.....	34
2.13	Ο OPA549 ως προγραμματιζόμενη πηγή source/sink.....	34
2.13.1	Λειτουργία ως πηγή	36
2.13.2	Λειτουργία ως φορτίο	36
2.14	Σχέση του OPA549 με την παρούσα πτυχιική κατασκευή.....	36
2.15	Περιορισμοί της θεωρητικής περιγραφής της εσωτερικής δομής.....	36
2.15.1	Γενικό λειτουργικό μοντέλο ενός μονολιθικού power op-amp.....	37
2.15.2	Κέρδος ανοιχτού βρόχου, κέρδος κλειστού βρόχου και σφάλμα ρύθμισης.....	37
2.15.3	Περιοχές λειτουργίας CV και current limit.....	37
2.15.4	Θερμική ανάδραση και ηλεκτροθερμική αλληλεπίδραση	38
2.15.5	Μεταβατικά φαινόμενα κατά τη σύνδεση φορτίου	38
2.15.6	Επίδραση της καλωδίωσης και της γείωσης	38
2.15.7	Κριτήρια ασφαλούς εργαστηριακής λειτουργίας.....	39
2.16	Επίλογος.....	39
Κεφάλαιο 3ο:	Ανάλυση και σχεδίαση ηλεκτρονικού κυκλώματος	40
3.1	Εισαγωγή.....	40
3.2	Γενική αρχιτεκτονική της διάταξης.....	40
3.3	Κύρια τροφοδοσία ισχύος και ασφάλεια F1.....	41
3.4	Κεντρική βαθμίδα OPA549.....	42
3.5	Αποσύζευξη της κύριας τροφοδοσίας: C11 και C12.....	43
3.6	Δημιουργία τάσης αναφοράς 5V: U2 και βοηθητικό δίκτυο	43
3.7	Ρύθμιση του ορίου ρεύματος μέσω CN5.....	44
3.8	Ρύθμιση της τάσης μέσω CN6 και δικτύου ανάδρασης.....	45
3.9	Ο ρόλος του P1, των R10-R12 και των C13-C15	45

3.10	Δίκτυο εξόδου: D2, R4 και C10.....	45
3.11	Ψύξη και τροφοδοσία ανεμιστήρα: Z3.....	46
3.12	Κύκλωμα ενεργοποίησης εξόδου με relay	47
3.13	Ανεξάρτητη τροφοδοσία 230V/9V των οργάνων μέτρησης.....	47
3.14	Σύνδεση panel meter για τάση και ρεύμα	48
3.15	Συνολική λειτουργία ως πηγή και ως φορτίο	49
3.16	Επίλογος.....	49
3.17	Συνοπτικός πίνακας βασικών εξαρτημάτων και ρόλων	50
Κεφάλαιο 4ο: PCB, LPKF, Solid Works και 3D κατασκευή		51
4.1	Εισαγωγή.....	51
4.2	Οριστικοποίηση ηλεκτρονικού σχηματικού στο Pulsonix.....	51
4.3	Από το schematic στη σχεδίαση του PCB.....	52
4.4	Σχεδιαστικές απαιτήσεις της πλακέτας ισχύος.....	52
4.5	Εξαγωγή κατασκευαστικών δεδομένων και προετοιμασία στο CircuitCAM.....	53
4.6	Μεταφορά του έργου και ρύθμιση του LPKF.....	54
4.7	Διαδικασία χάραξης και απομόνωσης των αγωγίμων διαδρομών	55
4.8	Διάτρηση οπών και διαμόρφωση περιγράμματος	56
4.9	Ρόλος δοκιμαστικής πλακέτας πριν από την τελική παραγγελία	58
4.10	Σχεδίαση μηχανικού περιβλήματος στο SolidWorks	59
4.11	Σχεδίαση της πρόσοψης και εργονομία χειρισμού.....	60
4.12	Τελικό assembly και αερισμός της κατασκευής.....	61
4.13	Τρισδιάστατη εκτύπωση και προετοιμασία για συναρμολόγηση	61
4.14	Συνολική ροή υλοποίησης.....	62
4.15	Συμπεράσματα κεφαλαίου	62
Κεφάλαιο 5ο: Πειραματικές δοκιμές και αποτελέσματα		63
5.1	Δοκιμή εξόδου με ρύθμιση στα 10V.....	63
5.1.1	Λειτουργία χωρίς φορτίο	64
5.1.2	Λειτουργία με ωμικό φορτίο 10Ω / 10W.....	64
5.1.3	Μεταβατική απόκριση κατά την σύνδεση φορτίου.....	65
5.2	Δοκιμή εξόδου με ρύθμιση στα 20V.....	66
5.2.1	Λειτουργία χωρίς φορτίο	66
5.2.2	Λειτουργία με ωμικό φορτίο	67
5.2.3	Μεταβατική απόκριση στα 20V	67
5.3	Συγκριτική αξιολόγηση των δοκιμών 10V και 20V.....	68
5.4	Δοκιμή αμφίδρομης λειτουργίας με πραγματική μπαταρία	68

5.4.1	Πειραματικά δεδομένα	69
5.4.2	Ερμηνεία της αλλαγής πολικότητας του ρεύματος.....	69
5.5	Θερμική αξιολόγηση της βαθμίδας OPA549	69
5.5.1	Πειραματική διαδικασία και θερμογραφική μέτρηση	70
5.5.2	Αποτελέσματα μετρήσεων.....	70
5.5.3	Αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς.....	72
5.6	Συνολική αποτίμηση των πειραματικών αποτελεσμάτων	73
Κεφάλαιο 6ο:	Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης	74
6.1	Συνολική αποτίμηση εργασίας	74
6.2	Συμπεράσματα ως προς την ηλεκτρονική σχεδίαση	74
6.3	Θερμική διαχείριση και όρια λειτουργίας	75
6.4	Περιορισμοί της παρούσας έκδοσης	75
6.5	Μελλοντική ψηφιακή ρύθμιση τάσης και ρεύματος	76
6.6	Ενσωμάτωση μικροελεγκτή και επικοινωνία με υπολογιστή.....	76
6.7	Προσθήκη κυκλώματος μέτρησης τάσης και ρεύματος.....	76
6.8	Μελλοντική εξέλιξη προς προγραμματιζόμενο battery simulator	77
6.9	Τελικό συμπέρασμα	77
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		796

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Συνοπτική παρουσίαση χαρακτηριστικών και βασικών ακροδεκτών του OPA549. Πηγή: [1].	19
Σχήμα 2.2: Πίνακας ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του OPA549. Πηγή: [1].	22
Σχήμα 2.3: Προγραμματισμός του ορίου ρεύματος με αντίσταση ή σήμα DAC. Πηγή: [1].	25
Σχήμα 2.4: Safe Operating Area και θερμικές λειτουργίες προστασίας του OPA549. Πηγή: [1].	28
Σχήμα 2.5: Θερμικό μοντέλο, επιλογή ψύκτρας και επίδραση της θερμικής αντίστασης. Πηγή: [1].	30
Σχήμα 2.6: Ενδεικτική programmable source/sink power supply του datasheet. Πηγή: [1].	32
Σχήμα 3.1: Συνολικό ηλεκτρονικό σχηματικό του προσομοιωτή μπαταρίας.	37
Σχήμα 3.2: Περιοχή OPA549, ψύξης και βασικών κυκλωμάτων ελέγχου.	39
Σχήμα 3.3: Κύκλωμα αναφοράς, εξωτερικών ποτενσιόμετρων και βοηθητικών παθητικών στοιχείων.	41
Σχήμα 3.4: Βοηθητική τροφοδοσία οργάνου και κύκλωμα relay/push button.	44
Σχήμα 4.1: Τελικό ηλεκτρονικό σχηματικό του battery simulator στο Pulsonix.	48
Σχήμα 4.2: Τελικό PCB layout στο Pulsonix, με τις κύριες διαδρομές ισχύος και τις περιοχές ελέγχου.	49
Σχήμα 4.3: Εισαγωγή και προετοιμασία του PCB στο CircuitCAM.	51
Σχήμα 4.4: Υπολογισμένες περιοχές και διαδρομές απομόνωσης για την κατεργασία του χαλκού.	52
Σχήμα 4.5: Πραγματική διαδικασία isolation milling της πλακέτας στο LPKF.	53
Σχήμα 4.6: Operation διάτρησης των οπών της πλακέτας στο BoardMaster.	54
Σχήμα 4.7: Το εργαστηριακό set up για τη λειτουργία του μηχανήματος LPKF.	55
Σχήμα 4.8: Αρχική γεωμετρία της πρόσοψης στο SolidWorks.	56
Σχήμα 4.9: Εσωτερική διαμόρφωση και στοιχεία μηχανικής στήριξης.	57
Σχήμα 4.10: Διαμόρφωση της πρόσοψης με ανοίγματα για όργανα, χειριστήρια και συνδέσεις.	58
Σχήμα 4.11: Τελικό assembly του περιβλήματος στο SolidWorks με πλευρικά ανοίγματα αερισμού.	59
Σχήμα 5.1: Πειραματική συνδεσμολογία παλμογράφου, ωμικού φορτίου και μπαταρίας στην έξοδο του προσομοιωτή.	61
Σχήμα 5.2: Θόρυβος εξόδου του προσομοιωτή στα 10V χωρίς φορτίο.	62
Σχήμα 5.3: Κυματομορφή εξόδου στα 10V με συνδεδεμένο φορτίο 10Ω / 10W.	63
Σχήμα 5.4: Μεταβατική βύθιση της τάσης κατά τη σύνδεση του φορτίου στα 10V.	64
Σχήμα 5.5: Θόρυβος εξόδου του προσομοιωτή στα 20V χωρίς φορτίο.	64
Σχήμα 5.6: Κυματομορφή εξόδου στα 20V με συνδεδεμένο φορτίο.	65
Σχήμα 5.7: Μεταβατική βύθιση της τάσης κατά τη σύνδεση του φορτίου στα 20V.	66
Σχήμα 5.8: Μεταβολή της μερούμενης θερμοκρασίας επιφάνειας ως προς το απορροφώμενο ρεύμα.	69
Σχήμα 5.9: Θερμογραφική καταγραφή για 1A – 41,8°C ($\epsilon = 0,95$).	69
Σχήμα 5.10: Θερμογραφική καταγραφή για 2A – 48,5°C ($\epsilon = 0,95$).	69
Σχήμα 5.11: Θερμογραφική καταγραφή για 3A – 67,5°C ($\epsilon = 0,95$).	70
Σχήμα 5.12: Θερμογραφική καταγραφή για 4A – 68,4°C ($\epsilon = 0,95$).	70

Σχήμα 5.13: Θερμογραφική καταγραφή για 5A – 71,4°C ($\varepsilon = 0,95$).....	70
--	----

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Επιλεγμένα χαρακτηριστικά του OPA549 από το datasheet [1].	22
Πίνακας 3.1: Συνοπτική αντιστοίχιση των βασικών εξαρτημάτων με τη λειτουργία τους	48
Πίνακας 5.1: Σύγκριση της τάσης εξόδου πριν και μετά τη σύνδεση του ωμικού φορτίου.....	66
Πίνακας 5.2: Μετρήσεις τάσης μπαταρίας και ρεύματος για διαφορετικές ρυθμίσεις του προσομοιωτή	67
Πίνακας 5.3: Θερμοκρασία επιφάνειας στην περιοχή του OPA549 για διαφορετικές τιμές απορροφώμενου ρεύματος	68

Συντομογραφίες

ADC	Analog-to-Digital Converter – Μετατροπέας αναλογικού σε ψηφιακό σήμα
CAD	Computer-Aided Design – Σχεδίαση με την βοήθεια υπολογιστή
CMRR	Common-Mode Rejection Ratio – Λόγος απόρριψης κοινού σήματος
CNC	Computer Numerical Control – Αριθμητικός έλεγχος μέσω υπολογιστή
CV	Constant Voltage – Λειτουργία σταθερής τάσης
DAC	Digital-to-Analog Converter – Μετατροπέας ψηφιακού σε αναλογικό σήμα
DC	Direct Current – Συνεχές ρεύμα
DUT	Device Under Test – Υπό δοκιμή κατασκευή
E/S	Enable/Status – Ακροδέκτης ενεργοποίησης/ένδειξης κατάστασης του OPA549
ILIM	Current Limit – Ακροδέκτης ρύθμισης του ορίου ρεύματος του OPA549
LED	Light-Emitting Diode – Δίοδος εκπομπής φωτός
LPKF	Σύστημα/μηχάνημα πρωτοτυποποίησης PCB
OLED	Organic Light-Emitting Diode – Οργανική δίοδος εκπομπής φωτός
PCB	Printed Circuit Board – Πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος
PE	Protective Earth – Αγωγός προστατευτικής γείωσης
PSRR	Power-Supply Rejection Ratio – Λόγος απόρριψης μεταβολών τροφοδοσίας
RCL	Αντίσταση προγραμματισμού του ορίου ρεύματος
RMS	Root Mean Square – Ενεργός τιμή
SOA	Safe Operating Area – Ασφαλής περιοχή λειτουργίας

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή, αντικείμενο, στόχοι και μεθοδολογία

1.1 Αντικείμενο της εργασίας

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη, σχεδίαση και κατασκευή ενός προσομοιωτή μπαταρίας για εργαστηριακή χρήση και για την πραγματοποίηση ελέγχων σε ηλεκτρονικά προϊόντα. Η κατασκευή προέκυψε από μία πραγματική ανάγκη, την ύπαρξη μιας συσκευής που να μπορεί να ενταχθεί σε διαδικασίες δοκιμών και να παρέχει ελεγχόμενες συνθήκες αντίστοιχες με εκείνες που θα συναντούσε ένα προϊόν κατά τη σύνδεσή του με κάποια μπαταρία. Το ενδιαφέρον της παρούσας εργασίας επικεντρώνεται, αποκλειστικά στην τεχνική χρησιμότητα της διάταξης και στη διαδικασία με την οποία μία πραγματική απαίτηση μετατρέπεται σε λειτουργικό ηλεκτρονικό σύστημα.

Ο όρος «προσομοιωτής μπαταρίας» χρησιμοποιείται εδώ με λειτουργική έννοια. Στόχος είναι η προσέγγιση της μπαταρίας, από την πλευρά της ηλεκτρονικής συσκευής που συνδέεται στους ακροδέκτες της. Δηλαδή, το ενδιαφέρον εστιάζεται στις ηλεκτρικές μεταβλητές που «βλέπει» το υπό δοκιμή κύκλωμα και στον τρόπο με τον οποίο αυτές μπορούν να ελεγχθούν, να περιοριστούν και να μεταβληθούν με ασφαλή και επαναλήψιμο τρόπο.

Η βασική λειτουργική μονάδα της κατασκευής είναι ένας ενισχυτής ισχύος OPA549, ο οποίος επιλέχθηκε λόγω της δυνατότητας λειτουργίας σε υψηλά ρεύματα, της ευρείας περιοχής τροφοδοσίας και της δυνατότητας ρύθμισης του ορίου ρεύματος. Το συγκεκριμένο ολοκληρωμένο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες διαμορφώσεις τελεστικού ενισχυτή και διαθέτει χαρακτηριστικά που είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε εφαρμογές ισχύος, όπως ελεγχόμενο current limit, προστασία έναντι υπερθέρμανσης και ακροδέκτη Enable/Status. Η λεπτομερής μελέτη του OPA549, των ηλεκτρικών ορίων του και της θερμικής του συμπεριφοράς πραγματοποιείται στο επόμενο κεφάλαιο, ώστε το παρόν κεφάλαιο να παραμείνει επικεντρωμένο στο γενικό πλαίσιο της κατασκευής.

1.2 Ανάγκη και χρησιμότητα ενός προσομοιωτή μπαταρίας

Σε ένα εργαστήριο ανάπτυξης ηλεκτρονικών προϊόντων είναι συχνά απαραίτητο να εξεταστεί η συμπεριφορά μιας συσκευής σε περισσότερες από μία συνθήκες τροφοδοσίας. Ένα προϊόν μπορεί να χρειάζεται να λειτουργεί κανονικά όταν η τάση της μπαταρίας βρίσκεται στην ονομαστική της περιοχή, να διατηρεί συγκεκριμένες λειτουργίες όταν η τάση μειώνεται, να ενεργοποιεί ενδείξεις ή προστασίες σε προκαθορισμένα κατώφλια και να επανέρχεται σωστά όταν η τροφοδοσία αποκαθίσταται [9]. Για την αξιολόγηση αυτών των καταστάσεων απαιτείται πηγή της οποίας η έξοδος μπορεί να ελεγχθεί συστηματικά και να επαναληφθεί στις ίδιες συνθήκες.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο έλεγχος της συμπεριφοράς προϊόντος καθώς η διαθέσιμη τάση μειώνεται. Με πραγματική μπαταρία, η επίτευξη συγκεκριμένων σημείων τάσης απαιτεί ελεγχόμενη εκφόρτιση και η κατάσταση του συσσωρευτή δεν είναι ακριβώς ίδια σε κάθε επανάληψη. Με τον προσομοιωτή, αντίθετα, μπορούν να επιλεγούν συγκεκριμένες τιμές και να παρατηρηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια το σημείο στο οποίο το προϊόν μεταβάλλει κατάσταση λειτουργίας. Η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί όσες φορές χρειάζεται, γεγονός ιδιαίτερα χρήσιμο κατά τη διερεύνηση σφαλμάτων, τη σύγκριση διαφορετικών εκδόσεων μιας πλακέτας ή την επιβεβαίωση ότι μία σχεδιαστική αλλαγή δεν επηρέασε ανεπιθύμητα τη λειτουργία.

Η επαναληψιμότητα αποτελεί επομένως μία από τις σημαντικότερες ιδιότητες της κατασκευής. Σε μία τεχνική διαδικασία ελέγχου δεν αρκεί ένα προϊόν να λειτουργήσει επιτυχώς μία φορά. Χρειάζεται οι

ίδιες συνθήκες να μπορούν να εφαρμοστούν σε περισσότερα δείγματα ή διαφορετικές χρονικές στιγμές, ώστε τα αποτελέσματα να μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους. Ο προσομοιωτής λειτουργεί ως κοινό σημείο αναφοράς, αντί η πηγή τροφοδοσίας να αποτελεί μία μεταβαλλόμενη παράμετρο, μετατρέπεται σε ελεγχόμενο τμήμα της δοκιμής.

Επιπλέον, η κατασκευή έχει πρακτική αξία σε περιπτώσεις όπου το υπό δοκιμή προϊόν διαθέτει κύκλωμα φόρτισης ή γενικότερα μπορεί, σε ορισμένες καταστάσεις, να μεταφέρει ενέργεια προς την πλευρά της μπαταρίας. Ο κύριος λόγος της σχεδίασης ενός τροφοδοτικού είναι για την παροχή ισχύος προς το φορτίο και δεν είναι αυτονόητη η απορρόφηση ρεύματος από αυτό. Για τον λόγο αυτό, όταν σχεδιάζεται μία διάταξη που προορίζεται να υποκαταστήσει λειτουργικά μια μπαταρία, πρέπει να εξετάζεται όχι μόνο η δυνατότητα παροχής ρεύματος αλλά και η συμπεριφορά της όταν η κατεύθυνση της ροής ισχύος μεταβάλλεται. Η συγκεκριμένη απαίτηση επηρεάζει ουσιαστικά την επιλογή τοπολογίας, την προστασία και τη θερμική σχεδίαση.

1.3 Προσομοιωτής μπαταρίας και συμβατικό εργαστηριακό τροφοδοτικό

Παρόλο που ένας προσομοιωτής μπαταρίας και ένα ρυθμιζόμενο τροφοδοτικό μπορεί εξωτερικά να μοιάζουν επειδή και τα δύο παρέχουν ελεγχόμενη τάση εξόδου, ο σκοπός τους είναι διαφορετικός. Το εργαστηριακό τροφοδοτικό αποτελεί μια γενική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ ο προσομοιωτής μπαταρίας αποτελεί ένα εξειδικευμένο εργαλείο δοκιμών, του οποίου η έξοδος χρησιμοποιείται για να αναπαράξει συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας στην εξεταζόμενη συσκευή.

Η διαφορά αυτή είναι σημαντική σε επίπεδο σχεδιασμού. Σε ένα συμβατικό τροφοδοτικό το κύριο ζητούμενο είναι συνήθως η σταθερή παροχή της επιλεγμένης τάσης και του απαιτούμενου ρεύματος. Σε έναν προσομοιωτή μπαταρίας λαμβάνεται υπόψη επιπλέον η δυνατότητα ελεγχόμενης μετάβασης μεταξύ διαφορετικών καταστάσεων, η προστασία του υπό δοκιμή κυκλώματος, η προβλέψιμη συμπεριφορά όταν εμφανίζονται μεταβατικά φαινόμενα και η δυνατότητα διαχείρισης ρεύματος που επιστρέφει από το συνδεδεμένο προϊόν.

Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι ότι ο προσομοιωτής μπορεί να αποτελέσει βάση για πιο οργανωμένες διαδικασίες verification. Για παράδειγμα, μπορούν να οριστούν συγκεκριμένα σημεία τάσης, χρόνοι παραμονής και αναμενόμενες αποκρίσεις της υπό δοκιμή συσκευής. Με αυτόν τον τρόπο μία δοκιμή που διαφορετικά θα εκτελούνταν εμπειρικά μπορεί να αποκτήσει συγκεκριμένα βήματα και κριτήρια. Η αξία της κατασκευής δεν περιορίζεται επομένως στο ότι «αντικαθιστά μία μπαταρία», αλλά επεκτείνεται στο ότι μετατρέπει την τροφοδοσία σε ελεγχόμενη μεταβλητή της διαδικασίας δοκιμών.

1.4 Ενδεικτικά σενάρια χρήσης

Η χρησιμότητα ενός τέτοιου συστήματος γίνεται περισσότερο κατανοητή όταν εξεταστούν συγκεκριμένα σενάρια. Ένα πρώτο σενάριο αφορά τον έλεγχο λειτουργίας ενός προϊόντος σε διαφορετικές τιμές τάσης [9]. Η έξοδος του προσομοιωτή μπορεί να μεταβάλλεται σταδιακά ή να ρυθμίζεται σε προκαθορισμένα σημεία, ώστε να ελέγχεται αν η συσκευή λειτουργεί εντός των απαιτούμενων ορίων. Μπορούν έτσι να εξεταστούν καταστάσεις κανονικής τροφοδοσίας, μειωμένης τάσης ή μετάβασης προς όρια στα οποία ενεργοποιούνται εσωτερικές προστασίες και ενδείξεις [14].

Το δεύτερο σενάριο είναι η επαλήθευση λειτουργιών που σχετίζονται με την ανίχνευση της κατάστασης της μπαταρίας. Πολλά ηλεκτρονικά συστήματα χρησιμοποιούν την τάση στους ακροδέκτες τροφοδοσίας ως μία από τις πληροφορίες για την εκτίμηση της διαθέσιμης ενέργειας ή για την

ενεργοποίηση ειδοποιήσεων. Ένας ελεγχόμενος προσομοιωτής επιτρέπει να εξεταστεί εάν τα αντίστοιχα κατώφλια ενεργοποιούνται στα αναμενόμενα επίπεδα και εάν η συσκευή μεταβαίνει ομαλά μεταξύ των διαφορετικών καταστάσεων.

Τρίτο σενάριο αφορά τον έλεγχο μετά από τροποποίηση hardware ή firmware. Όταν αλλάζει ένα τμήμα ενός προϊόντος, χρειάζεται συχνά να επιβεβαιωθεί ότι οι βασικές λειτουργίες εξακολουθούν να συμπεριφέρονται όπως πριν. Η δυνατότητα αναπαραγωγής των ίδιων συνθηκών τροφοδοσίας διευκολύνει τη σύγκριση πριν και μετά την αλλαγή και μειώνει την αβεβαιότητα που θα υπήρχε μία πραγματική μπαταρία με διαφορετική κατάσταση φόρτισης και διαφορετική ηλικία.

Τέταρτο σενάριο είναι η διερεύνηση οριακών ή μη κανονικών συνθηκών. Σε ένα ελεγχόμενο εργαστηριακό περιβάλλον μπορεί να είναι χρήσιμο να εξεταστεί τι συμβαίνει όταν το προϊόν απαιτεί μεγαλύτερο ρεύμα, όταν η τάση πλησιάζει ένα όριο λειτουργίας ή όταν εμφανίζεται μία κατάσταση που οδηγεί στην ενεργοποίηση προστασίας. Η ύπαρξη ρυθμιζόμενου περιορισμού ρεύματος και θερμικής προστασίας στην τελική βαθμίδα ισχύος είναι πολύ σημαντική για τέτοιες δοκιμές, επειδή μειώνει τον κίνδυνο μιας λανθασμένης σύνδεσης ή ένα σφάλμα του φορτίου να εξελιχθεί σε υπερφόρτιση.

1.5 Στόχος της εργασίας

Ο κύριος στόχος της εργασίας είναι η υλοποίηση μιας λειτουργικής και αξιοποιήσιμης διάταξης προσομοιωτή μπαταρίας, η οποία να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πραγματικές εργαστηριακές δοκιμές ηλεκτρονικών προϊόντων. Η επιτυχία της κατασκευής δεν κρίνεται μόνο από το αν παράγεται μία τάση στην έξοδο, αλλά από το κατά πόσο η διάταξη είναι ελεγχόμενη, επαναλήψιμη, ασφαλής και κατάλληλη για σύνδεση με πραγματικά κυκλώματα.

Οι επιμέρους στόχοι περιλαμβάνουν τη δυνατότητα ελεγχόμενης ρύθμισης της εξόδου, την παροχή του απαιτούμενου ρεύματος προς το υπό δοκιμή προϊόν, την ύπαρξη μηχανισμού περιορισμού του ρεύματος, τη διατήρηση της βαθμίδας ισχύος εντός ασφαλών θερμικών ορίων και τη δυνατότητα παρακολούθησης ή διαχείρισης καταστάσεων προστασίας. Παράλληλα, ζητούμενο είναι η διάταξη να είναι πρακτική στη χρήση, ώστε οι ρυθμίσεις της να μπορούν να πραγματοποιούνται χωρίς πολύπλοκες διαδικασίες κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής.

Ένας ακόμη στόχος είναι η σύνδεση της θεωρητικής ανάλυσης με την πραγματική κατασκευή. Για κάθε βασικό τμήμα της πλακέτας επιδιώκεται να εξηγηθεί όχι μόνο ποιο εξάρτημα χρησιμοποιείται, αλλά και για ποιον λόγο βρίσκεται στη συγκεκριμένη θέση, ποια ηλεκτρική λειτουργία καλύπτει και πώς συνδυάζεται με τα υπόλοιπα τμήματα. Με αυτόν τον τρόπο η εργασία δεν περιορίζεται στην παρουσίαση ενός τελικού κυκλώματος, αλλά αποτυπώνει τη λογική σχεδιασμού που κατέληξε σε αυτό.

Τέλος, σημαντικός στόχος είναι η αξιολόγηση των περιορισμών της κατασκευής. Ένας προσομοιωτής μπαταρίας δεν πρέπει να θεωρείται ιδανική πηγή χωρίς όρια. Η μέγιστη τάση, το συνεχές και στιγμιαίο ρεύμα, η απώλεια ισχύος στα ενεργά στοιχεία, η θερμοκρασία του ημιαγωγού, η δυνατότητα της ψύκτρας και η ασφαλής περιοχή λειτουργίας καθορίζουν το πραγματικό πεδίο χρήσης. Η αναγνώριση αυτών των ορίων είναι σημαντική τόσο για την αξιοπιστία του συστήματος όσο και για την ορθή ερμηνεία των αποτελεσμάτων μιας δοκιμής.

1.6 Βασικές τεχνικές απαιτήσεις της κατασκευής

Η μετάβαση από την ανάγκη για ένα εργαλείο δοκιμών στην πραγματική κατασκευή απαιτεί τη μετατροπή της λειτουργικής περιγραφής σε τεχνικές απαιτήσεις. Πρώτη απαίτηση είναι η δυνατότητα ελέγχου της τάσης εξόδου. Η τάση αποτελεί την κύρια μεταβλητή μέσω της οποίας η διάταξη

αναπαριστά διαφορετικές καταστάσεις μπαταρίας και συνεπώς πρέπει να μπορεί να ρυθμιστεί με προβλέψιμο τρόπο στην επιθυμητή περιοχή.

Δεύτερη απαίτηση είναι η ικανότητα διαχείρισης του ρεύματος που απαιτεί το φορτίο. Η βαθμίδα ισχύος πρέπει να μπορεί να παρέχει το αναγκαίο ρεύμα χωρίς υπέρβαση των ηλεκτρικών και θερμικών ορίων της. Παράλληλα, είναι απαραίτητο να υπάρχει δυνατότητα περιορισμού του μέγιστου ρεύματος. Ο περιορισμός αυτός αποτελεί τόσο λειτουργικό χαρακτηριστικό όσο και μηχανισμό προστασίας, επειδή επιτρέπει στον χειριστή να καθορίσει ένα ανώτατο όριο πριν από τη σύνδεση του υπό δοκιμή κυκλώματος.

Τρίτη απαίτηση είναι η θερμική διαχείριση. Σε μία γραμμική βαθμίδα ισχύος η διαφορά μεταξύ της τάσης τροφοδοσίας και της τάσης εξόδου μετατρέπεται σε θερμότητα ανάλογα με το ρεύμα που διαρρέει το ενεργό στοιχείο. Αυτό σημαίνει ότι μία κατάσταση με σχετικά χαμηλή τάση εξόδου και υψηλό ρεύμα μπορεί να είναι θερμικά μεγαλύτερη από μία κατάσταση υψηλότερης τάσης εξόδου. Η επιλογή ψύκτρας και ο έλεγχος της απώλειας ισχύος αποτελούν επομένως μέρος του ηλεκτρικού σχεδιασμού που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη.

Τέταρτη απαίτηση είναι η ασφαλής συμπεριφορά σε μη κανονικές καταστάσεις. Σε περίπτωση βραχυκυκλώματος στην έξοδο, υπερβολικής απαίτησης ρεύματος, ανεπαρκούς ψύξης ή λανθασμένης ρύθμισης, η βαθμίδα ισχύος μπορεί να οδηγηθεί κοντά στα όριά της. Για τον λόγο αυτό η σχεδίαση πρέπει να λαμβάνει υπόψη τόσο τις ενσωματωμένες προστασίες του ενεργού στοιχείου όσο και τα εξωτερικά κυκλώματα, τη συνδεσμολογία, την ψύξη και τον τρόπο χρήσης της συσκευής.

1.7 Μεθοδολογία ανάπτυξης

Σε αρχικό στάδιο προσδιορίστηκε η ανάγκη που έπρεπε να καλύψει η κατασκευή, η δημιουργία μιας ελεγχόμενης πηγής που θα μπορεί να χρησιμοποιείται αντί πραγματικής μπαταρίας κατά τη δοκιμή ηλεκτρονικών προϊόντων. Από αυτή την ανάγκη προέκυψαν οι βασικές ηλεκτρικές απαιτήσεις, όπως η περιοχή τάσης, η απαίτηση για σημαντική ικανότητα ρεύματος, ο περιορισμός ρεύματος και η ασφαλής λειτουργία υπό φορτίο.

Στη συνέχεια εξετάστηκε η κατάλληλη αρχιτεκτονική για τη βαθμίδα ισχύος. Η επιλογή του OPA549 έδωσε τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ένας ισχυρός τελεστικός ενισχυτής ως ελεγχόμενο ενεργό στοιχείο, διατηρώντας παράλληλα λειτουργίες που είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Η ανάλυση του datasheet αποτέλεσε βασικό βήμα, καθώς από αυτό προκύπτουν όχι μόνο οι ονομαστικές δυνατότητες του ολοκληρωμένου αλλά και οι πραγματικοί περιορισμοί που καθορίζουν τον σχεδιασμό όπως: μέγιστο συνεχές ρεύμα, current limit, περιοχή τροφοδοσίας, Safe Operating Area, θερμική αντίσταση και απαιτήσεις ψύξης.

Ακολούθησε η ανάπτυξη του ηλεκτρονικού κυκλώματος γύρω από τη βαθμίδα ισχύος. Σε αυτό το στάδιο καθορίστηκαν οι συνδέσεις τροφοδοσίας, το κύκλωμα ελέγχου, η ρύθμιση του περιορισμού ρεύματος, τα στοιχεία αποσύζευξης και οι υπόλοιπες βοηθητικές λειτουργίες. Κάθε επιμέρους επιλογή εξετάστηκε σε σχέση με τη λειτουργία του συνολικού συστήματος. Για παράδειγμα, οι πυκνωτές αποσύζευξης δεν αντιμετωπίζονται ως τυπικά εξαρτήματα που τοποθετούνται μηχανικά σε κάθε κύκλωμα, αλλά ως στοιχεία που συμβάλλουν στη σταθερότητα και στη χαμηλή εμπέδηση της τροφοδοσίας της βαθμίδας ισχύος.

Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στη θερμική σχεδίαση. Η ηλεκτρική ισχύς που δεν παραδίδεται στο φορτίο πρέπει να διαχυθεί από τον OPA549 προς το περιβάλλον. Επομένως εξετάζονται η θερμική αντίσταση από την επαφή του ημιαγωγού προς το περίβλημα, η θερμική σύζευξη με την ψύκτρα και η θερμική

αντίσταση της ψύκτρας προς τον αέρα. Η μεθοδολογία δεν βασίζεται στο γεγονός ότι η εσωτερική θερμική προστασία αρκεί για κανονική λειτουργία. Αντίθετα, η προστασία θεωρείται τελευταίο επίπεδο ασφάλειας, ενώ ο σχεδιασμός πρέπει να κρατά τη θερμοκρασία σε αποδεκτά επίπεδα κατά τη συνεχή και επαναλαμβανόμενη χρήση.

Μετά τον σχεδιασμό ακολουθεί η κατασκευή της πλακέτας και η πρακτική επαλήθευση. Η διαδικασία ελέγχου ξεκινά από βασικούς ελέγχους συνδεσμολογίας και τροφοδοσίας πριν συνδεθεί πραγματικό φορτίο. Στη συνέχεια εξετάζεται η ρύθμιση της εξόδου, η απόκριση σε διαφορετικά φορτία και η λειτουργία του περιορισμού ρεύματος. Οι δοκιμές πρέπει να γίνονται σταδιακά, ώστε μία πιθανή αστοχία να εντοπίζεται πριν εφαρμοστούν οι λανθασμένες συνθήκες λειτουργίας.

Η τελική αξιολόγηση δεν αφορά μόνο το αν το κύκλωμα λειτουργεί, αλλά και το αν η συμπεριφορά του είναι κατάλληλη για τον σκοπό για τον οποίο κατασκευάστηκε. Εξετάζεται δηλαδή εάν οι ρυθμίσεις είναι πρακτικές, εάν η έξοδος παραμένει ελεγχόμενη στις τιμές ενδιαφέροντος, εάν οι θερμοκρασίες παραμένουν σε ασφαλή επίπεδα και εάν οι προστασίες ανταποκρίνονται όπως αναμένεται. Με αυτή τη λογική, η μεθοδολογία ολοκληρώνεται με έναν κύκλο σχεδιασμού, μέτρησης, αξιολόγησης και, όπου απαιτείται, βελτίωσης.

1.8 Ασφάλεια, αξιοπιστία και επαναληψιμότητα

Η ασφάλεια αποτελεί κεντρική απαίτηση σε μία διάταξη που μπορεί να διαχειριστεί σημαντικά ρεύματα. Ακόμη και σε σχετικά χαμηλές τάσεις, ένα βραχυκύκλωμα ή μία λανθασμένη σύνδεση μπορούν να οδηγήσουν σε υψηλή απώλεια ισχύος, υπερθέρμανση αγωγών και καταστροφή εξαρτημάτων. Για τον λόγο αυτό η προστασία δεν πρέπει να βασίζεται σε ένα μόνο χαρακτηριστικό. Ο ρυθμιζόμενος περιορισμός ρεύματος, η θερμική προστασία, η κατάλληλη ψύκτρα, η ορθή επιλογή αγωγών και συνδέσεων και η σταδιακή διαδικασία δοκιμών θα πρέπει να λειτουργούν συμπληρωματικά.

Η αξιοπιστία συνδέεται άμεσα με τη θερμική καταπόνηση. Ένα κύκλωμα μπορεί να λειτουργεί φαινομενικά σωστά ενώ το ενεργό στοιχείο βρίσκεται για μεγάλα χρονικά διαστήματα σε υψηλή θερμοκρασία. Η κατάσταση αυτή μπορεί να μην προκαλέσει άμεση αστοχία, αλλά μειώνει το περιθώριο ασφαλείας και μπορεί να επιβαρύνει τη μακροχρόνια λειτουργία. Για αυτόν τον λόγο η κατασκευή εξετάζεται όχι μόνο ως προς τα μέγιστα όρια, αλλά και ως προς μία ρεαλιστική περιοχή συνεχούς λειτουργίας.

Η επαναληψιμότητα είναι εξίσου σημαντική με την ασφάλεια. Ένα εργαλείο δοκιμών πρέπει να επιτρέπει στον χρήστη να επανέρχεται στην ίδια ρύθμιση και να λαμβάνει συγκρίσιμη συμπεριφορά. Αυτό απαιτεί σταθερότητα του κυκλώματος, σαφή τρόπο ρύθμισης και κατανόηση των παραμέτρων που μπορούν να επηρεάσουν την έξοδο. Η θερμοκρασία, το φορτίο, η πτώση τάσης στις συνδέσεις και η ενεργοποίηση του current limit είναι ένα παράδειγμα παραγόντων που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όταν αξιολογούνται τα αποτελέσματα.

1.9 Περιορισμοί και όρια της προσέγγισης

Παρότι ο όρος προσομοιωτής μπαταρίας υποδηλώνει αντικατάσταση της πραγματικής μπαταρίας, είναι σημαντικό να οριστούν τα όρια αυτής της προσομοίωσης. Μία πραγματική μπαταρία παρουσιάζει πολύπλοκη ηλεκτροχημική συμπεριφορά, εσωτερική αντίσταση που μεταβάλλεται με την κατάσταση φόρτισης και τη θερμοκρασία, δυναμικά φαινόμενα, μεταβολή της τάσης με τον χρόνο και περιορισμένη αποθηκευμένη ενέργεια. Η παρούσα κατασκευή δεν αποσκοπεί στην πλήρη φυσική αναπαραγωγή όλων αυτών των χαρακτηριστικών.

Η διάταξη πρέπει επομένως να αντιμετωπίζεται ως ελεγχόμενος ηλεκτρονικός προσομοιωτής για συγκεκριμένες εργαστηριακές δοκιμές. Η αξία της βρίσκεται στην ελεγχόμενη αναπαραγωγή των ηλεκτρικών συνθηκών που είναι σημαντικές για το υπό δοκιμή προϊόν. Όταν απαιτείται διερεύνηση φαινομένων που εξαρτώνται από την πραγματική χημεία, τη γήρανση ή τη μακροχρόνια εκφόρτιση ενός συγκεκριμένου τύπου συσσωρευτή, η χρήση πραγματικής μπαταρίας ή ενός πιο σύνθετου προγραμματιζόμενου μοντέλου παραμένει απαραίτητη.

Επιπλέον, η γραμμική φύση της βαθμίδας ισχύος επιβάλλει περιορισμούς στην απόδοση και στη θερμική διαχείριση. Η διάταξη δεν πρέπει να αξιολογείται μόνο με βάση το μέγιστο ρεύμα που μπορεί θεωρητικά να παρέχει το ενεργό στοιχείο. Για κάθε συνθήκη λειτουργίας πρέπει να εξετάζεται η ταυτόχρονη παρουσία τάσης και ρεύματος, η απώλεια ισχύος και η Safe Operating Area. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε δοκιμές χαμηλής τάσης εξόδου με υψηλό ρεύμα, όπου μεγάλο μέρος της ισχύος μπορεί να καταλήγει ως θερμότητα στον OPA549.

1.10 Δομή Εργασίας

Η εργασία οργανώνεται έτσι ώστε ο αναγνώστης να μεταβαίνει από το γενικό πρόβλημα προς τη λεπτομερή τεχνική ανάλυση και τελικά στην πραγματική κατασκευή. Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει το αντικείμενο, τη χρησιμότητα του προσομοιωτή μπαταρίας, τους βασικούς στόχους, τις απαιτήσεις και τη μεθοδολογία ανάπτυξης. Σκοπός του είναι να εξηγήσει γιατί χρειάζεται η συγκεκριμένη διάταξη και με ποια λογική προσεγγίζεται η σχεδιάσή της.

Στο επόμενο κεφάλαιο αναλύεται το OPA549, το οποίο αποτελεί την κεντρική βαθμίδα ισχύος της κατασκευής. Παρουσιάζονται τα βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, η ρύθμιση του current limit, ο ακροδέκτης Enable/Status, η Safe Operating Area, η απώλεια ισχύος και η θερμική σχεδίαση. Η ανάλυση αυτή δημιουργεί το θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτείται για να γίνει κατανοητό γιατί το ολοκληρωμένο χρησιμοποιήθηκε με τον συγκεκριμένο τρόπο στην πλακέτα.

Στα επόμενα κεφάλαια η μελέτη μεταφέρεται από το επίπεδο του επιμέρους ολοκληρωμένου στο συνολικό κύκλωμα. Η πλακέτα αναλύεται ανά λειτουργικό τμήμα, εξετάζεται ο ρόλος των επιμέρους εξαρτημάτων και παρουσιάζεται η μεταξύ τους αλληλεπίδραση. Ακολουθεί η διαδικασία κατασκευής και οι απαραίτητοι έλεγχοι, ενώ τα αποτελέσματα των δοκιμών χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της λειτουργίας και των πραγματικών ορίων του συστήματος.

1.11 Συμπεράσματα κεφαλαίου

Η ανάγκη για επαναλήψιμες και ελεγχόμενες δοκιμές ηλεκτρονικών προϊόντων καθιστά τον προσομοιωτή μπαταρίας ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαστηριακό εργαλείο. Η χρήση πραγματικών μπαταριών είναι απαραίτητη σε ορισμένα στάδια αξιολόγησης, αλλά δεν αποτελεί πάντοτε την πιο πρακτική λύση όταν ζητούμενο είναι η συστηματική εφαρμογή συγκεκριμένων συνθηκών. Η δυνατότητα ελέγχου της τάσης και του ρεύματος επιτρέπει την οργανωμένη διερεύνηση της συμπεριφοράς ενός προϊόντος και διευκολύνει τη σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών δοκιμών.

Η παρούσα κατασκευή αντιμετωπίζει το πρόβλημα από ηλεκτρονική και πρακτική σκοπιά. Δεν επιχειρεί να αναπαράγει πλήρως την ηλεκτροχημεία ενός συσσωρευτή, αλλά να δημιουργήσει μία ελεγχόμενη διεπαφή ισχύος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί μπαταρίας στις δοκιμές για τις οποίες σχεδιάστηκε. Η επιλογή μιας ισχυρής γραμμικής βαθμίδας με δυνατότητα ρύθμισης του ορίου ρεύματος επιτρέπει την υλοποίηση ενός συστήματος απλού ως προς τη βασική αρχή λειτουργίας, αλλά απαιτητικού ως προς τη σωστή διαχείριση ισχύος, θερμοκρασίας και προστασίας.

Με βάση το πλαίσιο αυτό, η συνέχεια της εργασίας επικεντρώνεται στα επιμέρους τεχνικά στοιχεία που καθορίζουν τη λειτουργία της κατασκευής. Πρώτο από αυτά είναι το OPA549, καθώς οι δυνατότητες και οι περιορισμοί του επηρεάζουν άμεσα το επιτρεπόμενο ρεύμα, την περιοχή λειτουργίας, τη θερμική συμπεριφορά και τελικά την αξιοπιστία ολόκληρου του προσομοιωτή.

Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό υπόβαθρο και αναλυτική μελέτη OPA549

2.1 Εισαγωγή

Ο OPA549 αποτελεί το κεντρικό ενεργό στοιχείο της υπό μελέτη διάταξης και, κατά συνέπεια, η κατανόηση της λειτουργίας του είναι απαραίτητη για την ερμηνεία της συνολικής συμπεριφοράς του προσομοιωτή μπαταρίας. Πρόκειται για μονολιθικό τελεστικό ενισχυτή ισχύος υψηλής τάσης και υψηλού ρεύματος, σχεδιασμένο ώστε να συνδυάζει τη λειτουργική συμπεριφορά ενός τελεστικού ενισχυτή με ένα ισχυρό στάδιο εξόδου. Ο κατασκευαστής τον προορίζει, μεταξύ άλλων, για τροφοδοτικά, εξοπλισμό δοκιμών, οδηγούς ενεργοποιητών και εφαρμογές όπου απαιτείται ακριβής έλεγχος τάσης σε φορτία υψηλού ρεύματος [1].

Σε έναν συμβατικό τελεστικό ενισχυτή, το κύριο ζητούμενο είναι συνήθως η επεξεργασία ενός σήματος με πολύ μικρό ρεύμα εξόδου. Στον OPA549, αντίθετα, το στάδιο εξόδου είναι σχεδιασμένο για συνεχή ρεύματα έως 8 A και κορυφές έως 10 A, υπό την προϋπόθεση ότι τηρούνται τα όρια θερμοκρασίας και η Safe Operating Area. Αυτό επιτρέπει στον ίδιο βρόχο αρνητικής ανάδρασης που καθορίζει την τάση εξόδου να ελέγχει ταυτόχρονα ένα πραγματικό φορτίο ισχύος [1].



SBOS093E – MARCH 1999 – REVISED OCTOBER 2005

High-Voltage, High-Current OPERATIONAL AMPLIFIER

FEATURES

- **HIGH OUTPUT CURRENT:**
8A Continuous
10A Peak
- **WIDE POWER-SUPPLY RANGE:**
Single Supply: +8V to +60V
Dual Supply: ± 4 V to ± 30 V
- **WIDE OUTPUT VOLTAGE SWING**
- **FULLY PROTECTED:**
Thermal Shutdown
Adjustable Current Limit
- **OUTPUT DISABLE CONTROL**
- **THERMAL SHUTDOWN INDICATOR**
- **HIGH SLEW RATE:** 9V/ μ s
- **CONTROL REFERENCE PIN**
- **11-LEAD POWER PACKAGE**

APPLICATIONS

- VALVE, ACTUATOR DRIVERS
- SYNCHRO, SERVO DRIVERS
- POWER SUPPLIES
- TEST EQUIPMENT
- TRANSDUCER EXCITATION
- AUDIO POWER AMPLIFIERS

DESCRIPTION

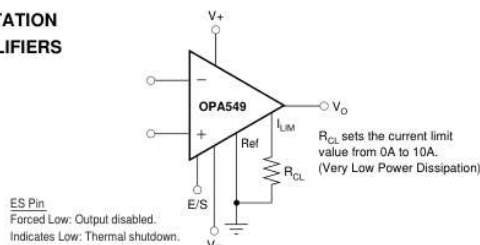
The OPA549 is a low-cost, high-voltage/high-current operational amplifier ideal for driving a wide variety of loads. This laser-trimmed monolithic integrated circuit provides excellent low-level signal accuracy and high output voltage and current.

The OPA549 operates from either single or dual supplies for design flexibility. The input common-mode range extends below the negative supply.

The OPA549 is internally protected against over-temperature conditions and current overloads. In addition, the OPA549 provides an accurate, user-selected current limit. Unlike other designs which use a "power" resistor in series with the output current path, the OPA549 senses the load indirectly. This allows the current limit to be adjusted from 0A to 10A with a resistor/potentiometer, or controlled digitally with a voltage-out or current-out Digital-to-Analog Converter (DAC).

The Enable/Status (E/S) pin provides two functions. It can be monitored to determine if the device is in thermal shutdown, and it can be forced low to disable the output stage and effectively disconnect the load.

The OPA549 is available in an 11-lead power package. Its copper tab allows easy mounting to a heat sink for excellent thermal performance. Operation is specified over the extended industrial temperature range, -40°C to $+85^{\circ}\text{C}$.



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

All trademarks are the property of their respective owners.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.



Copyright © 1999-2005, Texas Instruments Incorporated

Σχήμα 2.1: Συνοπτική παρουσίαση χαρακτηριστικών και βασικών ακροδεκτών του OPA549. Πηγή: [1].

2.2 Από τον ιδανικό τελεστικό ενισχυτή στον τελεστικό ενισχυτή ισχύος

Η θεμελιώδης λειτουργία του OPA549 βασίζεται στην αρχή της πολύ μεγάλης διαφορικής ενίσχυσης ανοικτού βρόχου. Αν V_{+in} και V_{-in} είναι οι τάσεις στις μη αναστρέφουσα και αναστρέφουσα εισόδους αντίστοιχα, η ιδανικοποιημένη σχέση ανοικτού βρόχου γράφεται:

$$V_{out} = AOL \cdot (V_{+in} - V_{-in})$$

Επειδή το AOL είναι πολύ μεγάλο, ακόμη και μικρή διαφορά μεταξύ των δύο εισόδων θα επιχειρούσε να οδηγήσει την έξοδο σε μεγάλη μεταβολή. Για αυτό ο OPA549 χρησιμοποιείται σχεδόν πάντοτε με αρνητική ανάδραση. Μέρος της εξόδου επιστρέφει στην αναστρέφουσα είσοδο και ο ενισχυτής μεταβάλλει συνεχώς το Vout μέχρι η διαφορά των δύο εισόδων να γίνει πολύ μικρή. Στην περιοχή γραμμικής λειτουργίας ισχύει επομένως η γνωστή προσέγγιση $V_{+in} \approx V_{-in}$.

Η διαφορά από έναν μικρού σήματος op-amp βρίσκεται κυρίως στο στάδιο ισχύος. Ο OPA549 πρέπει όχι μόνο να δημιουργήσει την κατάλληλη τάση αλλά και να επιβάλει αυτή την τάση ενώ διακινούνται αρκετά ampere. Η ανάδραση αποφασίζει ποια τάση απαιτείται στην έξοδο, ενώ το ισχυρό στάδιο εξόδου παρέχει ή απορροφά το απαιτούμενο ρεύμα, μέσα πάντοτε στα ηλεκτρικά και θερμικά όρια του ολοκληρωμένου.

2.3 Λειτουργία source και sink

Ιδιαίτερα σημαντικό για έναν προσομοιωτή μπαταρίας είναι ότι η έξοδος ενός power op-amp δεν λειτουργεί μόνο ως πηγή ρεύματος. Ανάλογα με τη διαφορά μεταξύ επιθυμητής και πραγματικής τάσης εξόδου, ο βρόχος ανάδρασης μπορεί να απαιτήσει είτε παροχή ρεύματος προς το εξωτερικό κύκλωμα (source) είτε απορρόφηση ρεύματος από αυτό (sink). Η κατεύθυνση του ρεύματος δεν καθορίζεται από μια ξεχωριστή εντολή «source/load», αλλά από την προσπάθεια του κλειστού βρόχου να διατηρήσει την καθορισμένη τάση εξόδου.

Αυτό είναι το θεμελιώδες στοιχείο που καθιστά τον OPA549 κατάλληλο για προγραμματιζόμενη πηγή source/sink. Το ίδιο το datasheet παρουσιάζει εφαρμογή programmable source/sink power supply, στην οποία τόσο η τάση όσο και το όριο ρεύματος ελέγχονται από τον χρήστη [1]. Επομένως, σε μια εφαρμογή προσομοίωσης μπαταρίας ο OPA549 μπορεί να αναπαραστήσει την πλευρά της μπαταρίας που τροφοδοτεί ένα φορτίο, αλλά και, με κατάλληλη συνολική τοπολογία και ενεργειακή διαχείριση, την κατάσταση κατά την οποία ένα εξωτερικό κύκλωμα επιχειρεί να διοχετεύσει ρεύμα προς την προσομοιωμένη μπαταρία.

2.4 Βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

Ο OPA549 μπορεί να λειτουργήσει με μονή τροφοδοσία από 8 V έως 60 V ή με διπολική τροφοδοσία από ± 4 V έως ± 30 V. Η δυνατότητα μονής τροφοδοσίας είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε εργαστηριακά τροφοδοτικά που διαθέτουν μία κύρια DC γραμμή. Το μέγιστο συνεχές ρεύμα εξόδου καθορίζεται στα ± 8 A, ενώ επιτρέπεται κορυφή 10 A μόνο υπό τις κατάλληλες συνθήκες. Ο κατασκευαστής προειδοποιεί ότι συνεχής λειτουργία πάνω από 8 A υποβαθμίζει τη μακροχρόνια αξιοπιστία [1].

Πίνακας 2.1: Επιλεγμένα χαρακτηριστικά του OPA549 από το datasheet [1].

Παράμετρος	Τυπική/ονομαστική τιμή	Σημασία
Εύρος τροφοδοσίας	8–60 V συνολικά	Επιτρέπει μονή ή διπολική τροφοδοσία.
Συνεχές ρεύμα εξόδου	έως ± 8 A	Κύριο όριο για συνεχή λειτουργία.
Ρεύμα κορυφής	έως ± 10 A	Δεν αποτελεί επιτρεπτό μόνιμο σημείο λειτουργίας.
Gain-bandwidth product	$\approx 0,9$ MHz	Καθορίζει τη δυναμική απόκριση μαζί με το κλειστό κέρδος.

Slew rate	$\approx 9 \text{ V}/\mu\text{s}$	Περιορίζει τον μέγιστο ρυθμό μεταβολής της εξόδου.
Θερμική αντίσταση θ_{JC}	$0,1 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$ (θ_{JC} bottom, HiRel/KVC)	Χρησιμοποιείται στη θερμική διαδρομή προς την ψύκτρα για τη συγκεκριμένη συσκευασία.
Thermal shutdown	$\approx 160 \text{ } ^\circ\text{C}$	Απενεργοποίηση εξόδου για προστασία.
Thermal reset	$\approx 140 \text{ } ^\circ\text{C}$	Αυτόματη επανενεργοποίηση μετά την ψύξη.
Open-loop gain	100–110 dB	Υψηλό κέρδος ανοικτού βρόχου, βασικό για ακριβή λειτουργία με αρνητική ανάδραση.
Input offset voltage	τυπ. $\pm 1 \text{ mV}$, μέγ. $\pm 5 \text{ mV}$ στους $25 \text{ } ^\circ\text{C}$	Συνεισφέρει στο στατικό σφάλμα της ρύθμισης.
Quiescent current	τυπ. $\pm 26 \text{ mA}$, shutdown περίπου $\pm 6 \text{ mA}$	Δείχνει την κατανάλωση χωρίς φορτίο και το όφελος του E/S.
E/S χρόνος disable / enable	$\approx 1 \mu\text{s} / \approx 3 \mu\text{s}$	Επιτρέπει γρήγορη ηλεκτρονική ενεργοποίηση και απενεργοποίηση της εξόδου.

2.4.1 Ο OPA549 δεν είναι rail-to-rail

Η τάση εξόδου δεν μπορεί να φτάσει ιδανικά μέχρι τις γραμμές τροφοδοσίας, ιδιαίτερα όταν το ρεύμα εξόδου είναι μεγάλο. Το datasheet δείχνει ότι το απαιτούμενο περιθώριο μεταξύ τροφοδοσίας και εξόδου αυξάνεται με το ρεύμα. Για παράδειγμα, σε υψηλό ρεύμα αρκετά volt παραμένουν πάνω στο εσωτερικό στάδιο εξόδου. Αυτό έχει δύο συνέπειες: πρώτον, η μέγιστη διαθέσιμη τάση στο φορτίο είναι μικρότερη από την τάση τροφοδοσίας και, δεύτερον, η διαφορά τάσης μετατρέπεται σε θερμότητα μέσα στον OPA549.

2.4.2 Ακρίβεια μικρού σήματος

Παρά το γεγονός ότι είναι εξάρτημα ισχύος, ο OPA549 διατηρεί χαρακτηριστικά τυπικού op-amp, όπως υψηλό open-loop gain, πεπερασμένο input offset voltage, input bias current, CMRR και PSRR. Αυτά επηρεάζουν την ακρίβεια της ρυθμιζόμενης τάσης, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται μεγάλα κέρδη ή απαιτείται πολύ χαμηλή τάση εξόδου. Για την παρούσα εφαρμογή, οι παράμετροι ισχύος και θερμικής συμπεριφοράς είναι συνήθως πιο περιοριστικές από τον θόρυβο ή το bandwidth, αλλά η ύπαρξη αυτών των σφαλμάτων πρέπει να λαμβάνεται υπόψη.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Boldface limits apply over the specified temperature range, $T_A = -40^{\circ}\text{C}$ to $+85^{\circ}\text{C}$.

At $T_{CASE} = +25^{\circ}C$, $V_S = \pm 30V$, $Ref = 0V$, and E/S pin open, unless otherwise noted.

		OPA549T, S				
PARAMETER		CONDITION	MIN	TYP	MAX	UNITS
OFFSET VOLTAGE						
Input Offset Voltage	V_{OS}	$V_{CM} = 0V, I_O = 0$		± 1	± 5	mV
vs Temperature	dV_{OS}/dT	$T_{CASE} = -40^{\circ}C \text{ to } +85^{\circ}C$		± 20		$\mu V/^{\circ}C$
vs Power Supply	PSRR	$V_S = \pm 4V \text{ to } \pm 30V, \text{ Ref} = V-$		25	100	$\mu V/V$
INPUT BIAS CURRENT⁽¹⁾						
Input Bias Current ⁽²⁾	I_B	$V_{CM} = 0V$		-100	-500	nA
vs Temperature		$T_{CASE} = -40^{\circ}C \text{ to } +85^{\circ}C$		± 0.5		nA/ $^{\circ}C$
Input Offset Current	I_{OS}	$V_{CM} = 0V$		± 5	± 50	nA
NOISE						
Input Voltage Noise Density	e_n	$f = 1 \text{ kHz}$		70		nV/ $\sqrt{Hz}$
Current Noise Density	i_n	$f = 1 \text{ kHz}$		1		pA/ $\sqrt{Hz}$
INPUT VOLTAGE RANGE						
Common-Mode Voltage Range: Positive	V_{CM}	Linear Operation	$(V+) - 3$	$(V+) - 2.3$		V
Negative	V_{CM}	Linear Operation	$(V-) - 0.1$	$(V-) - 0.2$		V
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	$V_{CM} = (V-) - 0.1V \text{ to } (V+) - 3V$	80	95		dB
INPUT IMPEDANCE						
Differential				$10^7 \parallel 6$		$\Omega \parallel pF$
Common-Mode				$10^9 \parallel 4$		$\Omega \parallel pF$
OPEN-LOOP GAIN						
Open-Loop Voltage Gain	A_{OL}	$V_O = \pm 25V, R_L = 1 \text{ k}\Omega$ $V_O = \pm 25V, R_L = 4\Omega$	100	110 100		dB dB
FREQUENCY RESPONSE						
Gain Bandwidth Product	GBW			0.9		MHz
Slew Rate	SR	$G = 1, 50V/p\text{-p Step}, R_L = 4\Omega$		9		V/ μs
Full-Power Bandwidth				See Typical Curve		
Settling Time: $\pm 0.1\%$		$G = -10, 50V \text{ Step}$		0.015		μs
Total Harmonic Distortion + Noise ⁽³⁾	THD+N	$f = 1 \text{ kHz}, R_L = 4\Omega, G = +3, \text{ Power} = 25W$		20		%
OUTPUT						
Voltage Output, Positive		$I_O = 2A$	$(V+) - 3.2$	$(V+) - 2.7$		V
Negative		$I_O = -2A$	$(V+) - 1.7$	$(V+) - 1.4$		V
Positive		$I_O = 8A$	$(V+) - 4.8$	$(V+) - 4.3$		V
Negative		$I_O = -8A$	$(V-) - 4.6$	$(V-) - 3.9$		V
Negative		$R_L = 8\Omega \text{ to } V-$	$(V-) + 0.3$	$(V-) + 0.1$		V
Maximum Continuous Current Output: dc ⁽⁴⁾			± 8			A
ac ⁽⁴⁾		Waveform Cannot Exceed 10A peak	8			A rms
Output Current Limit				0 to ± 10		A
Current Limit Range				$I_{LM} = 15800 \times 4.75V / (7500\Omega + R_{CL})$		A
Current Limit Equation				± 200	± 500	mA
Current Limit Tolerance ⁽¹⁾		$R_{CL} = 7.5 \text{ k}\Omega (I_{LM} = \pm 5A), R_L = 4\Omega$		See Typical Curve		
Capacitive Load Drive (Stable Operation) C_{LOAD}						
Output Disabled		Output Disabled, $V_O = 0V$	-2000	± 200	+2000	μA
Leakage Current		Output Disabled		750		pF
Output Capacitance						
OUTPUT ENABLE/STATUS (E/S) PIN						
Shutdown Input Mode						
V_{ES} High (output enabled)		E/S Pin Open or Forced High	(Ref) + 2.4		(Ref) + 0.8	V
V_{ES} Low (output disabled)		E/S Pin Forced Low				V
I_{ES} High (output enabled)		E/S Pin Indicates High		-50		μA
I_{ES} Low (output disabled)		E/S Pin Indicates Low		-55		μA
Output Disable Time				1		μs
Output Enable Time				3		μs
Thermal Shutdown Status Output						
Normal Operation		Sourcing 20 μA	(Ref) + 2.4	(Ref) + 3.5		V
Thermally Shutdown		Sinking 5 $\mu A, T_J > 160^{\circ}C$		(Ref) + 0.2	(Ref) + 0.8	V
Junction Temperature, Shutdown				+160		$^{\circ}C$
Reset from Shutdown				+140		$^{\circ}C$
Ref (Reference Pin for Control Signals)						
Voltage Range			V-		$(V+) - 8$	V
Current ⁽²⁾				-3.5		mA
POWER SUPPLY						
Specified Voltage	V_S			± 30		V
Operating Voltage Range, $(V+) - (V-)$			8		60	V
Quiescent Current	I_Q	I_{LM} Connected to Ref $I_O = 0$		± 26	± 35	mA
Quiescent Current in Shutdown Mode		I_{LM} Connected to Ref		± 6		mA
TEMPERATURE RANGE						
Specified Range			-40		+85	$^{\circ}C$
Operating Range			-40		+125	$^{\circ}C$
Storage Range			-55		+125	$^{\circ}C$
Thermal Resistance, θ_{JC}				1.4		$^{\circ}C/W$
Thermal Resistance, θ_{JA}		No Heat Sink		30		$^{\circ}C/W$

NOTES: (1) High-speed test at $T_J = +25^\circ\text{C}$. (2) Positive conventional current is defined as flowing into the terminal. (3) See "Total Harmonic Distortion + Noise vs. Frequency" in the Typical Characteristics section for additional power levels. (4) See "Safe Operating Area" (SOA) in the Typical Characteristics section.

Σχήμα 2.2: Πίνακας ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του OPA549. Πηγή: [1].

2.4.3 Απόκριση συχνότητας και δυναμικά χαρακτηριστικά

Το HiRel datasheet προσδιορίζει gain-bandwidth product περίπου 0,9 MHz, slew rate 9 V/μs για κέρδος μονάδας και φορτίο 4 Ω, καθώς και settling time περίπου 20 μs για βήμα 50 V σε κέρδος -10. Οι τιμές αυτές δείχνουν ότι, παρά τον προσανατολισμό του OPA549 στην ισχύ, το ολοκληρωμένο διατηρεί χαρακτηριστικά πραγματικού τελεστικού ενισχυτή και μπορεί να ακολουθεί σχετικά γρήγορες μεταβολές εντολής. Στην παρούσα εφαρμογή, όπου η κύρια χρήση είναι ρύθμιση DC τάσης και

ρεύματος, το bandwidth δεν αποτελεί τον βασικό περιορισμό, αλλά επηρεάζει τη μεταβατική συμπεριφορά όταν συνδέεται ή αποσυνδέεται φορτίο [6].

Το output voltage swing εξαρτάται έντονα από το ρεύμα. Για παράδειγμα, το datasheet δείχνει ότι σε υψηλό ρεύμα η έξοδος χρειάζεται αρκετά volt περιθώριο από τις γραμμές τροφοδοσίας. Αυτό επιβεβαιώνει ότι ο OPA549 δεν είναι rail-to-rail και ότι η μέγιστη διαθέσιμη τάση στους ακροδέκτες του προσομοιωτή μειώνεται όσο αυξάνεται το ρεύμα εξόδου [6].

2.5 Ακροδέκτες και λειτουργικές είσοδοι

Η συσκευασία ισχύος του OPA549 διαθέτει πολλαπλούς ακροδέκτες για τις γραμμές υψηλού ρεύματος. Οι δύο ακροδέκτες εξόδου πρέπει να συνδέονται μεταξύ τους, όπως και οι δύο ακροδέκτες V+ και οι δύο V-. Η απαίτηση αυτή δεν είναι διακοσμητική: μειώνει την αντίσταση και την καταπόνηση των ακροδεκτών όταν ρέουν μεγάλα ρεύματα. Το μεταλλικό tab της συσκευασίας συνδέεται εσωτερικά στο V- και δεν πρέπει να χρησιμοποιείται ως αγωγός ρεύματος [1].

2.5.1 Οι είσοδοι +IN και -IN

Η μη αναστρέφουσα είσοδος λαμβάνει συνήθως το σήμα αναφοράς που αντιστοιχεί στην επιθυμητή τάση εξόδου. Η αναστρέφουσα είσοδος λαμβάνει το σήμα ανάδρασης από την έξοδο μέσω δικτύου αντιστάσεων. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται κλειστός βρόχος ρύθμισης.

2.5.2 Ο ακροδέκτης Ref

Ο Ref αποτελεί σημείο αναφοράς για τις λειτουργίες ILIM και E/S. Δεν είναι γενική έξοδος αναφοράς τάσης. Ο χρήστης μπορεί να τον συνδέσει στο V-, στη γείωση ή σε άλλη κατάλληλη τάση αναφοράς, αρκεί να τηρείται το επιτρεπτό εύρος. Έτσι οι λειτουργίες current limit και enable/status μπορούν να μετατοπιστούν ως προς το δυναμικό που εξυπηρετεί καλύτερα την εφαρμογή [1].

2.5.3 Ο ακροδέκτης E/S

Ο Enable/Status είναι διπλής λειτουργίας. Όταν εξαναγκάζεται χαμηλά, απενεργοποιεί το στάδιο εξόδου. Όταν παρακολουθείται ως status, πληροφορεί το εξωτερικό κύκλωμα ότι ο OPA549 έχει εισέλθει σε thermal shutdown. Σε κανονική λειτουργία μπορεί να αφεθεί ανοικτός ή να οδηγηθεί αρκετά πάνω από το Ref. Το datasheet δίνει τυπικό χρόνο απενεργοποίησης περίπου 1 μ s και επανενεργοποίησης περίπου 3 μ s [1].

2.5.4 Πρακτική σημασία του E/S στην κατασκευή

Η λειτουργία E/S συνδέεται άμεσα με το ζητούμενο της ασφαλούς ενεργοποίησης της εξόδου. Το HiRel datasheet ορίζει ως λογικό low τάση έως $\text{Ref} + 0,8 \text{ V}$, ενώ η κανονική ενεργοποίηση επιτυγχάνεται με ανοικτό ακροδέκτη ή με στάθμη τουλάχιστον $\text{Ref} + 2,4 \text{ V}$. Σε θερμικό shutdown η τάση status πέφτει τυπικά περίπου στα 0,2 V πάνω από το Ref, ενώ σε κανονική λειτουργία βρίσκεται τυπικά περίπου στα 3,5 V πάνω από το Ref. Επομένως ο ίδιος ακροδέκτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για διακοπή της εξόδου όσο και για διάγνωση υπερθέρμανσης [6].

2.6 Αρνητική ανάδραση και ρύθμιση τάσης εξόδου

Σε μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία, το κέρδος κλειστού βρόχου καθορίζεται κυρίως από δύο αντιστάσεις. Αν R1 συνδέει την αναστρέφουσα είσοδο προς το σημείο αναφοράς και R2 την έξοδο προς την αναστρέφουσα είσοδο, τότε:

$$G = 1 + R2/R1$$

$$V_{out} \approx V_{in} \cdot (1 + R2/R1)$$

Η εξίσωση αυτή εξηγεί γιατί ένα ποτενσιόμετρο χαμηλής τάσης μπορεί να ελέγξει πολύ μεγαλύτερη τάση εξόδου. Ο OPA549 δεν «ρυθμίζει» την τάση όπως ένας απλός γραμμικός ρυθμιστής τριών ακροδεκτών. Συγκρίνει συνεχώς την αναφορά με το feedback και αυξάνει ή μειώνει το ρεύμα του σταδίου εξόδου μέχρι να αποκατασταθεί η ισορροπία. Η σελίδα Electronics-Lab που χρησιμοποιείται ως πρακτική αναφορά περιγράφει εφαρμογή με τροφοδοσία 30 V, ρυθμιζόμενη έξοδο περίπου 1,2–25 V και ανεξάρτητη ρύθμιση current limit [2].

Η λειτουργία αυτή είναι εξαιρετικά σημαντική σε προσομοιωτή μπαταρίας. Το ποτενσιόμετρο τάσης δεν χρειάζεται να μεταφέρει το ρεύμα του φορτίου. Παράγει μόνο το σήμα εντολής. Το μεγάλο ρεύμα διακινείται από το στάδιο ισχύος του OPA549, ενώ ο βρόχος ανάδρασης φροντίζει η έξοδος να ακολουθεί την εντολή.

2.7 Προγραμματιζόμενος περιορισμός ρεύματος

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του OPA549 είναι ο ενσωματωμένος, προγραμματιζόμενος περιορισμός ρεύματος. Σε πολλές συμβατικές υλοποιήσεις απαιτείται αντίσταση shunt σε σειρά με το φορτίο, πάνω στην οποία αναπτύσσεται τάση ανάλογη του ρεύματος. Στον OPA549 η ανίχνευση του φορτίου γίνεται εσωτερικά και ο χρήστης χειρίζεται μόνο ένα σήμα πολύ μικρού ρεύματος στο ILIM. Έτσι η αντίσταση ή το ποτενσιόμετρο προγραμματισμού δεν χρειάζεται να μεταφέρει τα ampere της εξόδου [1].

Με αντίσταση RCL μεταξύ ILIM και Ref, το datasheet δίνει τη σχέση:

$$ILIM = 15800 \cdot 4,75V / (7500\Omega + RCL)$$

Ισοδύναμα, για δεδομένο επιθυμητό όριο ρεύματος:

$$RCL = 75000 / ILIM - 7500\Omega$$

Όταν ο ILIM παραμένει ανοικτός, το προγραμματισμένο όριο τείνει προς 0A. Όταν ο ILIM συνδέεται απευθείας στο Ref, προγραμματίζεται το μέγιστο όριο, τυπικά 10 A. Για παράδειγμα, $RCL = 7,5k\Omega$ αντιστοιχεί ονομαστικά σε περίπου 5A [6]. Το datasheet επισημαίνει ότι η ακρίβεια μειώνεται σε πολύ χαμηλά όρια, ιδιαίτερα κάτω από 1A, ενώ ακόμη και στα 5 A υπάρχει συγκεκριμένη ανοχή [1].

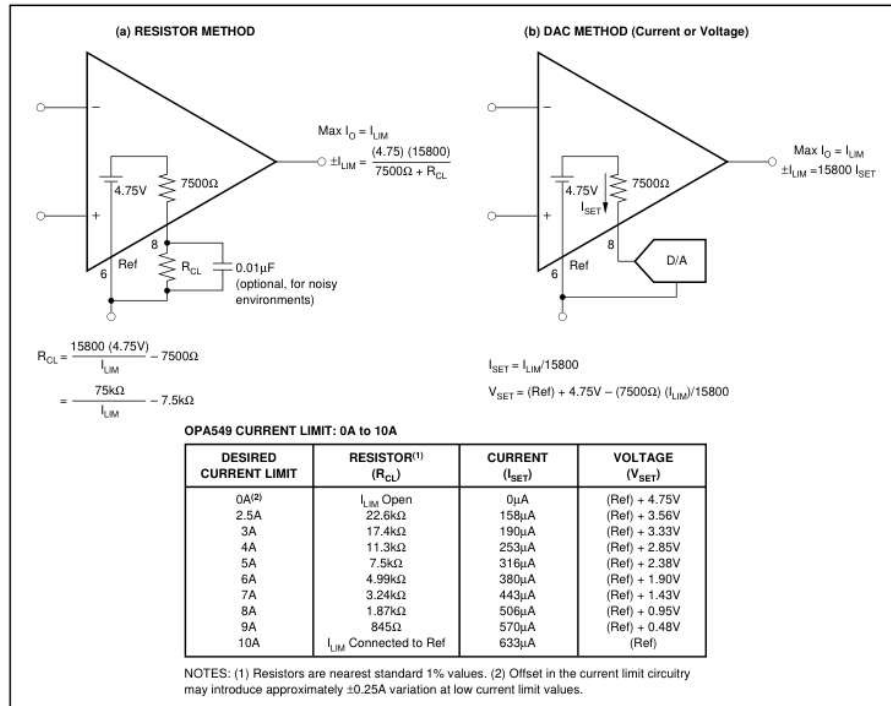


FIGURE 2. Adjustable Current Limit.

ENABLE/STATUS (E/S) PIN

The Enable/Status Pin provides two unique functions: 1) output disable by forcing the pin low, and 2) thermal shutdown indication by monitoring the voltage level at the pin. Either or both of these functions can be utilized in an application. For normal operation (output enabled), the E/S pin can be left open or driven high (at least 2.4V above Ref). A small value capacitor connected between the E/S pin and C_{REF} may be required for noisy applications.

Output Disable

To disable the output, the E/S pin is pulled to a logic low (no greater than 0.8V above Ref). Typically the output is shut down in 1μs. To return the output to an enabled state, the E/S pin should be disconnected (open) or pulled to at least 2.4V above Ref. It should be noted that driving the E/S pin high (output enabled) *does not defeat internal thermal shutdown*; however, it does prevent the user from monitoring the thermal shutdown status. Figure 3 shows an example implementing this function.

This function not only conserves power during idle periods (quiescent current drops to approximately 6mA) but also allows multiplexing in multi-channel applications. See Figure 12 for two

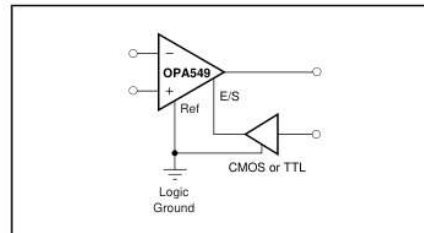


FIGURE 3. Output Disable.

OPA549s in a switched amplifier configuration. The on/off state of the two amplifiers is controlled by the voltage on the E/S pin. Under these conditions, the disabled device will behave like a 750pF load. Slewing faster than 3V/μs will cause leakage current to rapidly increase in devices that are disabled, and will contribute additional load. At high temperature (125°C), the slewing threshold drops to approximately 2V/μs. Input signals must be limited to avoid excessive slewing in multiplexed applications.

OPA549
SBOS093E

TEXAS
INSTRUMENTS
www.ti.com

9

Σχήμα 2.3: Προγραμματισμός του ορίου ρεύματος με αντίσταση ή σήμα DAC. Πηγή: [1].

Το HiRel datasheet δίνει επίσης έναν ιδιαίτερα χρήσιμο πίνακα αντιστοίχισης της RCL με το επιθυμητό όριο. Ενδεικτικά, για 2,5 A προτείνεται περίπου 22,6 kΩ, για 3 A 17,4 kΩ, για 4 A 11,3 kΩ, για 5 A 7,5 kΩ, για 6 A 4,99 kΩ, για 7 A 3,24 kΩ, για 8 A 1,87 kΩ και για 9 A περίπου 845 Ω. Η σύνδεση του ILIM απευθείας στο Ref αντιστοιχεί στο μέγιστο όριο των 10 A. Οι τιμές αυτές είναι πολύ χρήσιμες κατά τη βαθμονόμηση του ποτενσιόμετρου ρεύματος της κατασκευής [6].

Επιπλέον, η εσωτερική διεπαφή ILIM λειτουργεί με σήμα ελέγχου μόλις 0 έως 633 μΑ. Αυτό εξηγεί γιατί το ποτενσιόμετρο του current limit δεν χρειάζεται να είναι εξάρτημα ισχύος: δεν διαρρέεται από

το ρεύμα του φορτίου, αλλά προγραμματίζει ένα εσωτερικό κύκλωμα ελέγχου. Το datasheet αναφέρει επίσης ότι offset του κυκλώματος περιορισμού μπορεί να προκαλέσει περίπου $\pm 0,25$ A μεταβολή στις χαμηλές τιμές current limit [6].

2.7.1 Πως εμφανίζεται το current limit στην πράξη

Όσο το φορτίο ζητά ρεύμα μικρότερο από το επιλεγμένο ILIM, ο κύριος βρόχος τάσης καθορίζει τη λειτουργία και η έξοδος συμπεριφέρεται ως πηγή σταθερής τάσης. Αν η απαίτηση ρεύματος αυξηθεί πάνω από το όριο, το εσωτερικό κύκλωμα περιορισμού εμποδίζει περαιτέρω αύξηση. Τότε η τάση εξόδου παύει να μπορεί να διατηρηθεί στην αρχική τιμή και προσαρμόζεται ανάλογα με το φορτίο. Αυτό αποτελεί τη μετάβαση από περιοχή constant-voltage σε περιοχή current-limited λειτουργίας.

2.7.2 Γιατί το current limit δεν είναι μετρητής ακριβείας

Η λειτουργία ILIM έχει κυρίως χαρακτήρα ελέγχου και προστασίας και όχι εργαστηριακής μέτρησης υψηλής ακριβείας. Η Texas Instruments δίνει ανοχή για συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας και παρουσιάζει μεταβολές του ορίου με τη θερμοκρασία και την τροφοδοσία. Συνεπώς, η πραγματική τιμή πρέπει να επιβεβαιωθεί πειραματικά στην τελική κατασκευή και να μην θεωρηθεί ότι η θεωρητική εξίσωση παράγει απόλυτα ακριβές ρεύμα [1].

2.8 Τροφοδοσία και αποσύζευξη

Σε έναν power op-amp, η τροφοδοσία αποτελεί μέρος του δυναμικού συστήματος. Τα ρεύματα μπορούν να μεταβάλλονται γρήγορα και η παρασιτική επαγωγή ή αντίσταση των αγωγών τροφοδοσίας μπορεί να προκαλέσει πτώσεις τάσης, παλμούς ή αστάθεια. Για αυτό το datasheet συνιστά πυκνωτές χαμηλής σειριακής εμπέδησης κοντά στους ακροδέκτες τροφοδοσίας και παρουσιάζει παράλληλη χρήση κεραμικού 0,1μF και μεγαλύτερου πυκνωτή 10μF [1].

Ο μικρός κεραμικός πυκνωτής είναι αποτελεσματικός στις υψηλότερες συχνότητες, ενώ ο μεγαλύτερος πυκνωτής παρέχει τοπικό απόθεμα ενέργειας για βραδύτερες μεταβολές του ρεύματος. Η τοποθέτησή τους κοντά στους ακροδέκτες είναι εξίσου σημαντική με την ονομαστική χωρητικότητα, επειδή μεγάλα μήκη διαδρομών προσθέτουν παρασιτική επαγωγή και μειώνουν την αποτελεσματικότητα της αποσύζευξης.

Το επίσημο κύκλωμα εφαρμογής προτείνει παράλληλη χρήση πυκνωτή 0,1μF και 10μF σε κάθε γραμμή τροφοδοσίας, τοποθετημένων όσο το δυνατόν πλησιέστερα στους ακροδέκτες ισχύος. Ο μικρός πυκνωτής εξυπηρετεί τις γρήγορες συνιστώσες και τις υψηλές συχνότητες, ενώ ο μεγαλύτερος λειτουργεί ως τοπικό απόθεμα ενέργειας για βραδύτερες μεταβολές ρεύματος. Η χαμηλή σειριακή αντίσταση και επαγωγή των διαδρομών τροφοδοσίας είναι εξίσου σημαντική με την ονομαστική χωρητικότητα [6].

2.9 Δυναμική συμπεριφορά και ευστάθεια

Ο OPA549 έχει gain-bandwidth product περίπου 0,9MHz και slew rate περίπου 9V/μs. Αυτές οι τιμές είναι υπεραρκετές για αργές DC ρυθμίσεις τάσης ενός battery simulator, αλλά η ευστάθεια δεν πρέπει να θεωρείται δεδομένη όταν το φορτίο περιλαμβάνει μεγάλη χωρητικότητα, επαγωγή ή μακριά καλώδια. Τέτοια φορτία εισάγουν πρόσθετη μετατόπιση φάσης στον βρόχο ανάδρασης.

Το datasheet αναφέρει ότι σε δύσκολα φορτία ή όταν ο ενισχυτής πρόκειται να οδηγείται συχνά σε current limit μπορεί να απαιτηθεί δίκτυο R-C τύπου snubber στην έξοδο. Για μεγάλες χωρητικότητες

άνω περίπου του 1nF, επαγωγικά φορτία ή φορτία σε μεγάλη απόσταση, αναφέρονται ως τυπική αφετηρία αντιστάσεις 3–10Ω σε σειρά με πυκνωτές 0,01–0,1μF, με τις τελικές τιμές να εξαρτώνται από το πραγματικό φορτίο [1].

Η πρακτική σημασία είναι ότι ένας προσομοιωτής μπαταρίας μπορεί να συνδεθεί σε DUT με σημαντική χωρητικότητα εισόδου. Η έξοδος επομένως πρέπει να ελεγχθεί με παλμογράφο για overshoot, ringing ή αυτοταλάντωση, ιδιαίτερα σε απότομες αλλαγές τάσης ή ρεύματος.

2.10 Safe Operating Area και ηλεκτρική καταπόνηση

Το ονομαστικό ρεύμα των 8A δεν σημαίνει ότι ο OPA549 μπορεί να παρέχει 8 A σε οποιαδήποτε τάση και θερμοκρασία. Η Safe Operating Area συνδυάζει το ρεύμα εξόδου με την τάση που αναπτύσσεται πάνω στο αγωγίμο εσωτερικό στοιχείο ισχύος. Όσο αυξάνεται η διαφορά $|V_S - V_O|$, τόσο μειώνεται το ασφαλές συνεχές ρεύμα. Το βραχυκύκλωμα είναι ιδιαίτερα απαιτητική περίπτωση, επειδή σχεδόν ολόκληρη η τάση τροφοδοσίας εμφανίζεται πάνω στο στάδιο εξόδου ενώ ρέει μεγάλο ρεύμα [1].

$$PD \approx I_{out} \cdot (V_S - V_{out}) \quad [\text{για κατάλληλη DC περίπτωση}]$$

Για παράδειγμα, με τροφοδοσία 30V, έξοδο 5V και ρεύμα 3A, η προσεγγιστική ισχύς που πρέπει να μετατραπεί σε θερμότητα μέσα στο αγωγίμο στάδιο είναι $(30-5) \cdot 3 = 75\text{W}$. Το παράδειγμα δείχνει γιατί οι χαμηλές τάσεις εξόδου σε μεγάλο ρεύμα είναι συχνά δυσκολότερες θερμικά από μια υψηλή τάση εξόδου. Η αριθμητική αυτή τιμή δεν αρκεί από μόνη της για να δηλώσει ότι το σημείο είναι επιτρεπτό. Πρέπει πάντοτε να ελέγχεται και η καμπύλη SOA του κατασκευαστή.

Thermal Shutdown Status

The OPA549 has thermal shutdown circuitry that protects the amplifier from damage. The thermal protection circuitry disables the output when the junction temperature reaches approximately 160°C and allows the device to cool. When the junction temperature cools to approximately 140°C, the output circuitry is automatically re-enabled. Depending on load and signal conditions, the thermal protection circuit may cycle on and off. The E/S pin can be monitored to determine if the device is in shutdown. During normal operation, the voltage on the E/S pin is typically 3.5V above Ref. Once shutdown has occurred, this voltage drops to approximately 200mV above Ref. Figure 4 shows an example implementing this function.

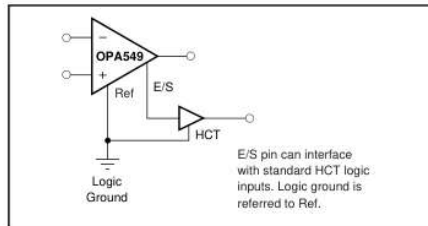


FIGURE 4. Thermal Shutdown Status.

External logic circuitry or an LED can be used to indicate if the output has been thermally shutdown, see Figure 10.

Output Disable and Thermal Shutdown Status

As mentioned earlier, the OPA549's output can be disabled and the disable status can be monitored simultaneously. Figure 5 provides an example of interfacing to the E/S pin.

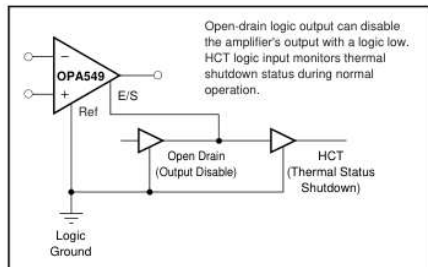


FIGURE 5. Output Disable and Thermal Shutdown Status.

SAFE OPERATING AREA

Stress on the output transistors is determined both by the output current and by the output voltage across the conducting output transistor, $V_S - V_O$. The power dissipated by the output transistor is equal to the product of the output current and the voltage across the conducting transistor, $V_S - V_O$. The Safe Operating Area (SOA curve, Figure 6) shows the permissible range of voltage and current.

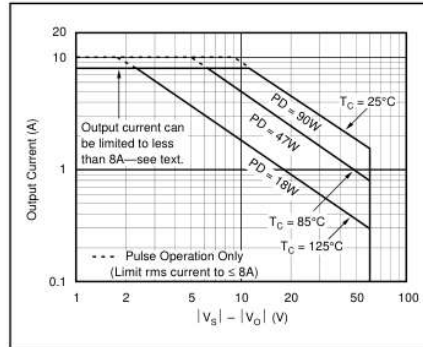


FIGURE 6. Safe Operating Area.

The safe output current decreases as $V_S - V_O$ increases. Output short circuits are a very demanding case for SOA. A short circuit to ground forces the full power-supply voltage (V_+ or V_-) across the conducting transistor. Increasing the case temperature reduces the safe output current that can be tolerated without activating the thermal shutdown circuit of the OPA549. For further insight on SOA, consult Application Report SBOA022 at the Texas Instruments web site (www.ti.com).

POWER DISSIPATION

Power dissipation depends on power supply, signal, and load conditions. For dc signals, power dissipation is equal to the product of output current times the voltage across the conducting output transistor. Power dissipation can be minimized by using the lowest possible power-supply voltage necessary to assure the required output voltage swing.

For resistive loads, the maximum power dissipation occurs at a dc output voltage of one-half the power-supply voltage. Dissipation with ac signals is lower. Application Bulletin SBOA022 explains how to calculate or measure power dissipation with unusual signals and loads.

THERMAL PROTECTION

Power dissipated in the OPA549 will cause the junction temperature to rise. Internal thermal shutdown circuitry shuts down the output when the die temperature reaches approximately 160°C and resets when the die has cooled to 140°C. Depending on load and signal conditions, the thermal protection circuit may cycle on and off. This limits the dissipation of the amplifier but may have an undesirable effect on the load.

Any tendency to activate the thermal protection circuit indicates excessive power dissipation or an inadequate heat sink. For reliable operation, junction temperature should be limited to 125°C maximum. To estimate the margin of safety in a complete design (including heat sink) increase the ambient temperature until the thermal protection is triggered.

Σχήμα 2.4: Safe Operating Area και θερμικές λειτουργίες προστασίας του OPA549. Πηγή: [1].

Η καμπύλη SOA του HiRel datasheet παρουσιάζει διαφορετικά όρια για θερμοκρασίες case 25°C, 85°C και 125°C. Αυτό είναι κρίσιμο: ένα σημείο λειτουργίας που μπορεί να είναι αποδεκτό με ψυχρή ψύκτρα μπορεί να γίνει μη επιτρεπτό όταν η θερμοκρασία case αυξηθεί. Η ίδια καμπύλη διαχωρίζει επίσης περιοχές που επιτρέπονται μόνο παλμικά από περιοχές συνεχούς λειτουργίας και υπενθυμίζει ότι το RMS ρεύμα δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 8A [6].

2.11 Απώλειες ισχύος και θερμική συμπεριφορά

Η θερμική σχεδίαση είναι ίσως το σημαντικότερο πρακτικό ζήτημα του OPA549. Σε αντίθεση με έναν διακοπτικό μετατροπέα, ο γραμμικός power op-amp διαχειρίζεται τη διαφορά μεταξύ τάσης τροφοδοσίας και τάσης εξόδου ως απώλεια ισχύος. Η ηλεκτρική αυτή ισχύς μετατρέπεται σε θερμότητα στο die και πρέπει να μεταφερθεί διαδοχικά από το junction στο package, από το package στην ψύκτρα και από την ψύκτρα στον αέρα.

Η θερμική αλυσίδα μοντελοποιείται με θερμικές αντιστάσεις, με μονάδα °C/W. Για μόνιμη κατάσταση:

$$T_J = T_A + P_D \cdot \theta_{JA}$$

$$\theta_{JA} = \theta_{JC} + \theta_{CH} + \theta_{HA}$$

όπου T_J είναι η θερμοκρασία επαφής, T_A η θερμοκρασία περιβάλλοντος, θ_{JC} η θερμική αντίσταση junction-to-case, θ_{CH} η αντίσταση case-to-heatsink και θ_{HA} η αντίσταση heatsink-to-ambient. Στην έκδοση OPA549-HiRel με συσκευασία KVC, το datasheet δίνει $\theta_{JC}(\text{bottom}) = 0,1^\circ\text{C/W}$, ενώ η θ_{JA} υπό τις καθορισμένες συνθήκες JEDEC είναι $21,5^\circ\text{C/W}$. Οι τιμές αυτές εξαρτώνται από τη συσκευασία και τη μέθοδο μέτρησης και δεν πρέπει να συγχέονται με θερμικές παραμέτρους άλλων εκδόσεων του OPA549 [6].

2.11.1 Παράδειγμα υπολογισμού ψύκτρας

Αν θεωρηθεί ενδεικτικά ότι η έκδοση HiRel/KVC διαχέει 20W, το περιβάλλον βρίσκεται στους 35°C , η $\theta_{JC}(\text{bottom})$ είναι $0,1^\circ\text{C/W}$ και η θερμική επαφή package-ψύκτρας αντιστοιχεί σε $0,5^\circ\text{C/W}$, τότε για στόχο $T_J \leq 125^\circ\text{C}$:

$$\theta_{HA} \leq (125 - 35)/20 - 0,1 - 0,5 = 3,9^\circ\text{C/W}$$

Επομένως, στο συγκεκριμένο θεωρητικό παράδειγμα, απαιτείται ψύκτρα με θ_{HA} μικρότερη περίπου από $3,9^\circ\text{C/W}$ στις πραγματικές συνθήκες τοποθέτησης. Το επίσημο HiRel datasheet δίνει αντίστοιχο παράδειγμα επιλογής ψύκτρας για 10 W και τονίζει ότι η εξαναγκασμένη ροή αέρα από ανεμιστήρα μπορεί να μειώσει δραστικά τη συνολική θερμική αντίσταση case-to-ambient [6].

Use worst-case load and signal conditions. For good reliability, thermal protection should trigger more than 35°C above the maximum expected ambient condition of your application. This produces a junction temperature of 125°C at the maximum expected ambient condition.

The internal protection circuitry of the OPA549 was designed to protect against overload conditions. It was not intended to replace proper heat sinking. Continuously running the OPA549 into thermal shutdown will degrade reliability.

AMPLIFIER MOUNTING AND HEAT SINKING

Most applications require a heat sink to assure that the maximum operating junction temperature (125°C) is not exceeded. In addition, the junction temperature should be kept as low as possible for increased reliability. Junction temperature can be determined according to the Equations:

$$T_J = T_A + P_D \theta_{JA} \quad (4)$$

$$\text{where } \theta_{JA} = \theta_{JC} + \theta_{CH} + \theta_{HA} \quad (5)$$

T_J = Junction Temperature (°C)

T_A = Ambient Temperature (°C)

P_D = Power Dissipated (W)

θ_{JC} = Junction-to-Case Thermal Resistance (°C/W)

θ_{CH} = Case-to-Heat Sink Thermal Resistance (°C/W)

θ_{HA} = Heat Sink-to-Ambient Thermal Resistance (°C/W)

θ_{JA} = Junction-to-Air Thermal Resistance (°C/W)

Figure 7 shows maximum power dissipation versus ambient temperature with and without the use of a heat sink. Using a heat sink significantly increases the maximum power dissipation at a given ambient temperature, as shown in Figure 7.

The challenge in selecting the heat sink required lies in determining the power dissipated by the OPA549. For dc output, power dissipation is simply the load current times the voltage developed across the conducting output transistor, $P_D = I_L (V_S - V_O)$. Other loads are not as simple. Consult the SBOA022 Application Report for further insight on calculating power dissipation. Once power dissipation for an application is known, the proper heat sink can be selected.

Heat Sink Selection Example—An 11-lead power ZIP package is dissipating 10 Watts. The maximum expected ambient temperature is 40°C. Find the proper heat sink to keep the junction temperature below 125°C (150°C minus 25°C safety margin).

Combining Equations (4) and (5) gives:

$$T_J = T_A + P_D (\theta_{JC} + \theta_{CH} + \theta_{HA}) \quad (6)$$

T_J , T_A , and P_D are given. θ_{JC} is provided in the Specifications Table, 1.4°C/W (dc). θ_{CH} can be obtained from the heat sink manufacturer. Its value depends on heat sink size, area, and material used. Semiconductor package type, mounting screw torque, insulating material used (if any), and thermal joint

compound used (if any) also affect θ_{CH} . A typical θ_{CH} for a mounted 11-lead power ZIP package is 0.5°C/W. Now we can solve for θ_{HA} :

$$\theta_{HA} = [(T_J - T_A)/P_D] - \theta_{JC} - \theta_{CH}$$

$$\theta_{HA} = [(125^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C})/10\text{W}] - 1.4^\circ\text{C/W} - 0.5^\circ\text{C/W}$$

$$\theta_{HA} = 6.6^\circ\text{C/W}$$

To maintain junction temperature below 125°C, the heat sink selected must have a θ_{HA} less than 6.6°C/W. In other words, the heat sink temperature rise above ambient must be less than 66°C (6.6°C/W • 10W). For example, at 10W Thermalloy model number 6396B has a heat sink temperature rise of 56°C ($\theta_{HA} = 56^\circ\text{C}/10\text{W} = 5.6^\circ\text{C/W}$), which is below the required 66°C required in this example. Thermalloy model number 6399B has a sink temperature rise of 33°C ($\theta_{HA} = 33^\circ\text{C}/10\text{W} = 3.3^\circ\text{C/W}$), which is also below the required 66°C required in this example. Figure 7 shows power dissipation versus ambient temperature for a 11-lead power ZIP package with the Thermalloy 6396B and 6399B heat sinks.

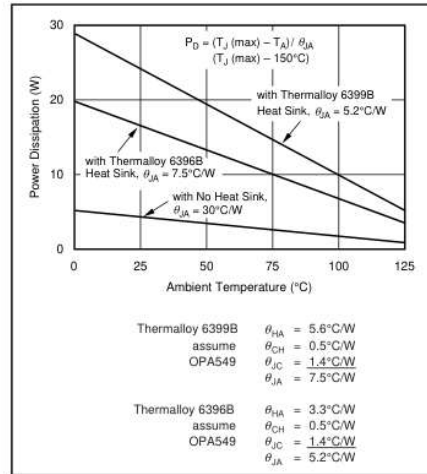


FIGURE 7. Maximum Power Dissipation vs Ambient Temperature.

Another variable to consider is natural convection versus forced convection air flow. Forced-air cooling by a small fan can lower θ_{CA} ($\theta_{CH} + \theta_{HA}$) dramatically. Some heat sink manufacturers provide thermal data for both of these cases. Heat sink performance is generally specified under idealized conditions that may be difficult to achieve in an actual application. For additional information on determining heat sink requirements, consult Application Report SBOA021.

OPA549
SBOS093E

TEXAS
INSTRUMENTS
www.ti.com

11

Σχήμα 2.5: Θερμικό μοντέλο, επιλογή ψύκτρας και επίδραση της θερμικής αντίστασης. Πηγή: [1].

2.11.2 Θερμοκρασία και προσδόκιμο λειτουργίας

Η έκδοση HiRel περιλαμβάνει καμπύλη derating του εκτιμώμενου χρόνου ζωής ως προς τη συνεχή θερμοκρασία junction για λειτουργία με 8 A. Ο κατασκευαστής αναφέρει ως στόχο σχεδίασης διάρκεια ζωής δέκα ετών σε συνεχή θερμοκρασία junction 105 °C, με την πρόβλεψη να βασίζεται σε μοντέλο αξιοπιστίας όπου η ηλεκτρομετανάστευση θεωρείται ο κυρίαρχος μηχανισμός φθοράς. Η πληροφορία

αυτή ενισχύει τη βασική σχεδιαστική αρχή ότι η χαμηλότερη θερμοκρασία junction δεν αφορά μόνο την αποφυγή άμεσου thermal shutdown αλλά και τη μακροχρόνια αξιοπιστία [6].

2.11.3 Thermal shutdown και αξιοπιστία

Ο OPA549 διαθέτει εσωτερικό thermal shutdown. Όταν η θερμοκρασία junction φτάσει περίπου τους 160°C, το στάδιο εξόδου απενεργοποιείται. Όταν το die ψυχθεί περίπου στους 140°C, επανενεργοποιείται. Η υστέρηση αυτή αποτρέπει εξαιρετικά γρήγορο on/off γύρω από μία μόνο θερμοκρασία. Παρ' όλα αυτά, υπό συνεχές υπερβολικό φορτίο είναι δυνατό να εμφανιστεί θερμικός κύκλος ενεργοποίησης-απενεργοποίησης [1].

Η ύπαρξη thermal shutdown δεν σημαίνει ότι οι 160°C αποτελούν κανονικό σημείο λειτουργίας. Ο κατασκευαστής συνιστά για αξιόπιστη λειτουργία η θερμοκρασία junction να περιορίζεται έως 125°C και τονίζει ότι η συνεχής είσοδος σε thermal shutdown υποβαθμίζει την αξιοπιστία. Η προστασία αποτελεί τελευταίο δίκτυ ασφαλείας, όχι υποκατάστατο της σωστής ψύκτρας [1].

2.12 Προστασία εξόδου και αντιδραστικά φορτία

Ένα αντιδραστικό ή ηλεκτρομηχανικό φορτίο μπορεί να επιστρέψει ενέργεια προς την έξοδο του ενισχυτή. Στην περίπτωση αυτή η τάση εξόδου μπορεί στιγμιαία να επιχειρήσει να ξεπεράσει τις γραμμές τροφοδοσίας. Το datasheet προτείνει clamp διόδους προς τις τροφοδοσίες για εφαρμογές με τέτοιο κίνδυνο και, για υψηλά ρεύματα, Schottky διόδους κατάλληλης ονομαστικής ικανότητας [1].

Η παρατήρηση αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία στη λειτουργία source/sink. Όταν το DUT μπορεί να επιστρέψει ενέργεια, δεν αρκεί να εξεταστεί μόνο αν ο OPA549 μπορεί να απορροφήσει στιγμιαία ρεύμα. Πρέπει να εξεταστεί πού καταλήγει τελικά η ενέργεια, τι επιτρέπει η κύρια τροφοδοσία και αν η τάση του DC bus μπορεί να αυξηθεί. Το ακριβές ενεργειακό μονοπάτι αποτελεί χαρακτηριστικό της συνολικής υλοποίησης και πρέπει να αναλυθεί στο κεφάλαιο του πραγματικού κυκλώματος.

2.13 Ο OPA549 ως προγραμματιζόμενη πηγή source/sink

Το επίσημο datasheet παρουσιάζει ρητά προγραμματιζόμενη πηγή source/sink με ποτενσιόμετρα για ρύθμιση τάσης και ρεύματος. Στην ενδεικτική υλοποίηση χρησιμοποιείται μονή τροφοδοσία +30V, το κέρδος τάσης καθορίζεται από δίκτυο ανάδρασης και ξεχωριστό ποτενσιόμετρο οδηγεί το ILIM. Το παράδειγμα είναι ιδιαίτερα κοντά στη φιλοσοφία ενός εργαστηριακού battery simulator [1].

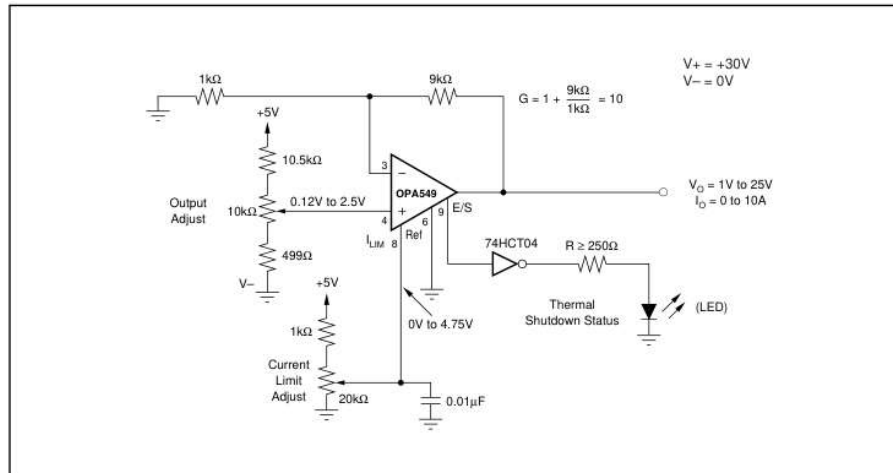


FIGURE 10. Resistor-Controlled Programmable Power Supply.

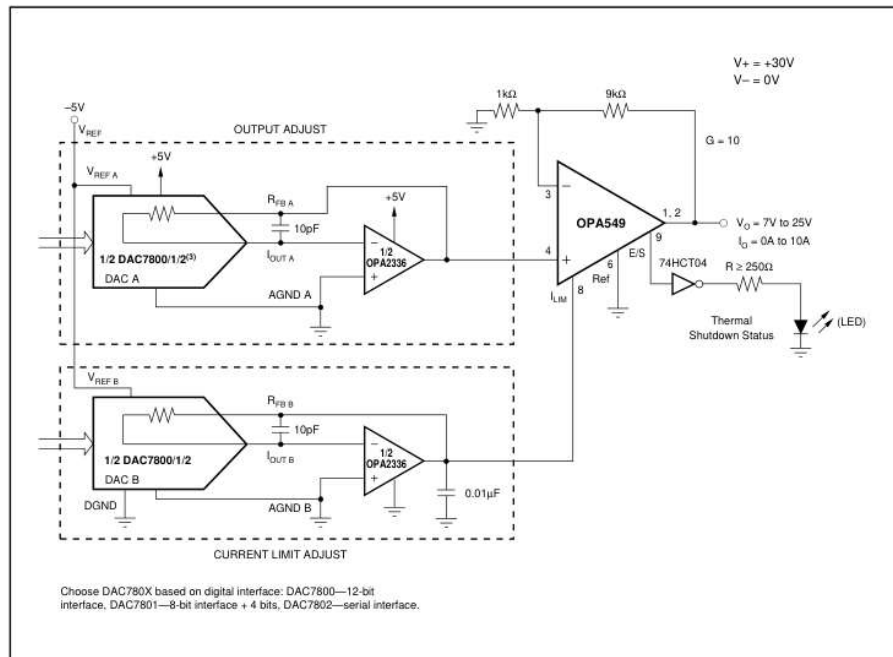


FIGURE 11. Digitally-Controlled Programmable Power Supply.

OPA549
SBOS093E

TEXAS
INSTRUMENTS
www.ti.com

13

Σχήμα 2.6: Ενδεικτική programmable source/sink power supply του datasheet. Πηγή: [1].

Η πρακτική υλοποίηση που παρουσιάζεται στο Electronics-Lab ακολουθεί την ίδια γενική αρχή: κύρια τροφοδοσία 30V, ρυθμιζόμενη τάση εξόδου, ρυθμιζόμενο current limit και θερμική ένδειξη. Η συγκεκριμένη πηγή είναι χρήσιμη ως παράδειγμα εφαρμογής, όμως για αριθμητικά όρια, εξισώσεις και κρίσιμες συνθήκες λειτουργίας προτιμάται το επίσημο datasheet του κατασκευαστή [1], [2].

2.13.1 Λειτουργία ως πηγή

Όταν η ρυθμισμένη τάση του προσομοιωτή είναι υψηλότερη από την τάση που επιβάλλει το συνδεδεμένο φορτίο, ο βρόχος ανάδρασης οδηγεί το output stage ώστε να παρέχει ρεύμα προς το DUT. Η τάση διατηρείται στην καθορισμένη τιμή μέχρι είτε να ενεργοποιηθεί το current limit είτε να προσεγγιστεί άλλο όριο, όπως το output swing, η SOA ή η θερμική προστασία.

2.13.2 Λειτουργία ως φορτίο

Όταν ένα εξωτερικό κύκλωμα, για παράδειγμα ένας φορτιστής, επιχειρεί να ανυψώσει την τάση στον κοινό κόμβο πάνω από την επιλεγμένη τιμή, ο αρνητικός βρόχος ανάδρασης μπορεί να οδηγήσει τον OPA549 σε απορρόφηση ρεύματος ώστε να συγκρατήσει την τάση. Από την οπτική του εξωτερικού κυκλώματος, η διάταξη εμφανίζεται τότε ως ενεργό φορτίο ή ως προσομοιωμένη μπαταρία που δέχεται ρεύμα.

Η δυνατότητα αυτή δεν πρέπει να συγχέεται με ιδανική αναγεννητική φόρτιση. Η ενέργεια που απορροφάται πρέπει να διαχειριστεί από το αναλογικό στάδιο και τη συνολική τροφοδοσία. Συνεπώς η θερμική καταπόνηση μπορεί να γίνει πολύ υψηλή και η πραγματική συμπεριφορά πρέπει να επαληθευθεί με το πλήρες schematic και με πειραματικές μετρήσεις.

2.14 Σχέση του OPA549 με την παρούσα πτυχιακή κατασκευή

Στην παρούσα εργασία ο OPA549 δεν χρησιμοποιείται απλώς ως ενισχυτής ενός σήματος. Αποτελεί το στοιχείο που μετατρέπει τις χαμηλής ισχύος εντολές ρύθμισης σε ελεγχόμενη έξοδο ισχύος. Το ποτενσιόμετρο τάσης καθορίζει το επιθυμητό επίπεδο εξόδου, ενώ το ποτενσιόμετρο ρεύματος καθορίζει το επιτρεπτό όριο μέσω της λειτουργίας ILIM. Η κύρια τροφοδοσία παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια και ο OPA549 λειτουργεί ως γραμμικό στοιχείο ελέγχου μεταξύ αυτής και των μπόρνων εξόδου.

Η επιλογή ενεργής ψύξης με ανεμιστήρα συνδέεται άμεσα με τη φύση του OPA549 ως γραμμικού στοιχείου ισχύος. Όταν υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ της τάσης τροφοδοσίας και της τάσης εξόδου, ιδίως σε υψηλό ρεύμα, η απώλεια ισχύος αυξάνεται έντονα. Συνεπώς η θερμική διαχείριση δεν αποτελεί βοηθητική λεπτομέρεια της κατασκευής αλλά μέρος της βασικής ηλεκτρικής σχεδίασης.

Στο επόμενο κεφάλαιο, όπου θα αναλυθεί το πραγματικό schematic, οι παραπάνω αρχές θα συνδεθούν με τις συγκεκριμένες αντιστάσεις, πυκνωτές, ποτενσιόμετρα και προστατευτικά στοιχεία της πλακέτας. Εκεί θα υπολογιστούν το πραγματικό κέρδος τάσης, το εύρος current limit, οι τάσεις αναφοράς και οι θερμικά δυσμενέστερες συνθήκες της συγκεκριμένης υλοποίησης.

2.15 Περιορισμοί της θεωρητικής περιγραφής της εσωτερικής δομής

Για ακαδημαϊκή ακρίβεια πρέπει να γίνει μία σαφής διάκριση. Το επίσημο datasheet περιγράφει τις εξωτερικά παρατηρήσιμες λειτουργίες του OPA549, τις ηλεκτρικές προδιαγραφές, το current-limit interface, το E/S, τη θερμική προστασία και εφαρμογές. Δεν δημοσιεύει όμως πλήρες transistor-level εσωτερικό κύκλωμα. Επομένως δεν είναι τεκμηριωμένο να αποδοθεί στον OPA549 συγκεκριμένη εσωτερική τοπολογία τρανζίστορ, αριθμός σταδίων ή ακριβής μέθοδος εσωτερικής ανίχνευσης ρεύματος πέρα από όσα δηλώνει ο κατασκευαστής.

Στην τελική εργασία μπορεί να παρουσιαστεί ένα γενικό λειτουργικό μοντέλο power op-amp με διαφορεικό στάδιο εισόδου, ενδιάμεσο στάδιο υψηλού κέρδους, κύκλωμα αντιστάθμισης, ισχυρό στάδιο εξόδου και κυκλώματα προστασίας, αρκεί να δηλώνεται ρητά ότι πρόκειται για θεωρητικό λειτουργικό

μοντέλο και όχι για δημοσιευμένο εσωτερικό schematic του OPA549. Με αυτό τον τρόπο η ανάλυση παραμένει τεχνικά πλούσια χωρίς να αποδίδει στον κατασκευαστή μη τεκμηριωμένες λεπτομέρειες.

2.15.1 Γενικό λειτουργικό μοντέλο ενός μονολιθικού power op-amp

Παρότι ο κατασκευαστής δεν δημοσιεύει το πλήρες εσωτερικό κύκλωμα του OPA549, η λειτουργία του μπορεί να ερμηνευθεί με βάση το γενικό μοντέλο ενός μονολιθικού τελεστικού ενισχυτή ισχύος. Σε λειτουργικό επίπεδο διακρίνονται ένα διαφορικό τμήμα εισόδου, βαθμίδες ενίσχυσης τάσης, εσωτερική αντιστάθμιση συχνότητας, οδηγητική βαθμίδα και τελικό στάδιο ισχύος. Παράλληλα λειτουργούν βοηθητικά κυκλώματα πόλωσης και προστασίας. Το διαφορικό τμήμα παρακολουθεί το σφάλμα μεταξύ των δύο εισόδων, ενώ οι επόμενες βαθμίδες μετατρέπουν το πολύ μικρό αυτό σφάλμα σε κατάλληλη εντολή προς το στάδιο εξόδου. Η αρνητική ανάδραση είναι εκείνη που μετατρέπει ένα ολοκληρωμένο με πολύ μεγάλο κέρδος ανοικτού βρόχου σε ελεγχόμενο σύστημα συγκεκριμένου κέρδους και προβλέψιμης τάσης εξόδου.

Στον OPA549 το τελικό στάδιο πρέπει να λειτουργεί σε τέσσερα ουσιαστικά διαφορετικά τεταρτημόρια ως προς το πρόσημο της τάσης και του ρεύματος όταν χρησιμοποιείται διπολική τροφοδοσία, ενώ σε μονή τροφοδοσία το διαθέσιμο εύρος περιορίζεται από τις γραμμές τροφοδοσίας. Η ικανότητα παροχής και απορρόφησης ρεύματος προκύπτει από την ενεργή οδήγηση της εξόδου και όχι από μία παθητική αντίσταση. Για αυτό η συμπεριφορά του είναι ουσιαστικά διαφορετική από ένα απλό τροφοδοτικό που διαθέτει μόνο στοιχείο σειράς και δεν μπορεί να απορροφήσει ενέργεια από το φορτίο.

2.15.2 Κέρδος ανοικτού βρόχου, κέρδος κλειστού βρόχου και σφάλμα ρύθμισης

Η προσέγγιση $V_{+in} \approx V_{-in}$ είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, αλλά δεν είναι απόλυτη ισότητα. Για να παραχθεί πεπερασμένη τάση εξόδου απαιτείται μικρό διαφορικό σφάλμα ίσο περίπου με V_{out}/AOL . Καθώς το open-loop gain μειώνεται με τη συχνότητα, αυξάνεται το δυναμικό σφάλμα του βρόχου. Στην εφαρμογή προσομοιωτή μπαταρίας οι μεταβολές της εντολής είναι κατά κανόνα αργές, επομένως η λειτουργία πραγματοποιείται σε περιοχή όπου το διαθέσιμο loop gain είναι μεγάλο. Αυτό ευνοεί τη στατική ακρίβεια και τη χαμηλή αντίσταση εξόδου του κλειστού βρόχου.

Η πραγματική ακρίβεια της εξόδου δεν εξαρτάται μόνο από το open-loop gain. Επηρεάζεται από το offset των εισόδων, τις ανοχές και τον θερμικό συντελεστή των αντιστάσεων ανάδρασης, την πτώση τάσης στους αγωγούς υψηλού ρεύματος, την ποιότητα του σημείου γείωσης και τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Σε ρεύματα αρκετών amperes ακόμη και αντίσταση διαδρομής μερικών δεκάδων milliohm δημιουργεί μετρήσιμη πτώση τάσης. Για τον λόγο αυτό η τοπολογία της πλακέτας και η θέση από την οποία λαμβάνεται το feedback έχουν άμεση επίδραση στην πραγματική τάση που εμφανίζεται στους ακροδέκτες του DUT.

2.15.3 Περιοχές λειτουργίας CV και current limit

Η λειτουργία του κυκλώματος μπορεί να χωριστεί σε δύο βασικές περιοχές. Στην πρώτη, το απαιτούμενο ρεύμα είναι μικρότερο από το προγραμματισμένο όριο και ο βρόχος τάσης έχει τον έλεγχο. Η διάταξη λειτουργεί ως πηγή σταθερής τάσης και το ρεύμα καθορίζεται από το φορτίο. Στη δεύτερη περιοχή, η απαίτηση του φορτίου θα οδηγούσε σε ρεύμα μεγαλύτερο από το ILIM. Τότε η εσωτερική λειτουργία περιορισμού υπερισχύει της απαίτησης του βρόχου τάσης και η έξοδος δεν μπορεί πλέον να διατηρήσει την αρχική τιμή της. Η μετάβαση αυτή είναι κρίσιμη σε δοκιμές ηλεκτρονικών συσκευών, επειδή επιτρέπει ελεγχόμενη αντιμετώπιση υπερφόρτωσης χωρίς να βασίζεται αποκλειστικά στην αποκοπή της τροφοδοσίας.

Η διάκριση αυτή είναι επίσης χρήσιμη για την ερμηνεία των μετρήσεων. Αν, για παράδειγμα, επιλεγούν 12 V και όριο 2 A και το φορτίο ισοδυναμεί με 12 Ω, το ιδανικό ρεύμα είναι 1 A και η έξοδος παραμένει περίπου στα 12 V. Αν όμως το φορτίο μειωθεί στα 3 Ω, η ιδανική απαίτηση θα ήταν 4 A. Εφόσον το ILIM έχει οριστεί στα 2 A, ο ενισχυτής δεν μπορεί να διατηρήσει τα 12 V και η τάση θα μειωθεί προς τιμή συμβατή με το περιορισμένο ρεύμα. Το παράδειγμα περιγράφει την αρχή λειτουργίας και όχι την ακριβή μεταβατική συμπεριφορά, η οποία εξαρτάται από το πραγματικό κύκλωμα και το φορτίο.

2.15.4 Θερμική ανάδραση και ηλεκτροθερμική αλληλεπίδραση

Η θερμοκρασία δεν αποτελεί ανεξάρτητη παράμετρο αλλά συνδέεται άμεσα με το ηλεκτρικό σημείο λειτουργίας. Μεγαλύτερο ρεύμα ή μεγαλύτερη πτώση τάσης πάνω στον OPA549 αυξάνει την ισχύ απωλειών, η οποία αυξάνει τη θερμοκρασία junction. Η αύξηση της θερμοκρασίας μεταβάλλει με τη σειρά της ηλεκτρικές παραμέτρους και μειώνει το περιθώριο μέχρι το thermal shutdown. Πρόκειται επομένως για ηλεκτροθερμικό σύστημα, στο οποίο η επιλογή της τάσης τροφοδοσίας, της τάσης εξόδου, του φορτίου και της ψύξης πρέπει να εξετάζεται ταυτόχρονα.

Ιδιαίτερα δυσμενής κατάσταση για γραμμικό στάδιο είναι η ταυτόχρονη απαίτηση χαμηλής τάσης εξόδου και υψηλού ρεύματος από υψηλή σταθερή τροφοδοσία. Η ωφέλιμη ισχύς στο φορτίο μπορεί τότε να είναι μικρότερη από την ισχύ που μετατρέπεται σε θερμότητα μέσα στο ολοκληρωμένο. Αυτό εξηγεί γιατί η ονομαστική ένδειξη 10 A δεν πρέπει να χρησιμοποιείται ως μοναδικό κριτήριο σχεδίασης. Η επιτρεπτή λειτουργία προκύπτει από τον συνδυασμό current limit, SOA, θερμοκρασίας περιβάλλοντος και πραγματικής θερμικής αντίστασης του συστήματος ψύξης.

2.15.5 Μεταβατικά φαινόμενα κατά την σύνδεση φορτίου

Κατά τη σύνδεση ενός φορτίου, το ρεύμα μπορεί στιγμιαία να είναι πολύ μεγαλύτερο από την τιμή μόνιμης κατάστασης, ιδίως όταν το DUT διαθέτει μεγάλους πυκνωτές εισόδου. Ο OPA549 αντιλαμβάνεται τη μεταβολή ως απόκλιση της τάσης εξόδου και ο βρόχος προσπαθεί να την αποκαταστήσει. Η απόκριση περιορίζεται από το bandwidth, το slew rate, την ικανότητα ρεύματος και το ILIM. Επομένως η εκκίνηση ενός χωρητικού φορτίου μπορεί να οδηγήσει προσωρινά το κύκλωμα σε current limit, ακόμη και όταν το ρεύμα μόνιμης κατάστασης είναι πολύ μικρότερο.

Από πλευράς προσομοίωσης μπαταρίας, αυτό είναι επιθυμητό μόνο εφόσον η συμπεριφορά είναι ελεγχόμενη. Μία πραγματική μπαταρία έχει πολύ χαμηλή εσωτερική αντίσταση και μπορεί να παρέχει μεγάλες παροδικές αιχμές ρεύματος. Ένας γραμμικός simulator με OPA549 έχει σαφώς καθορισμένα ηλεκτρονικά και θερμικά όρια. Συνεπώς δεν αναπαράγει αυτομάτως κάθε δυναμική ιδιότητα μιας πραγματικής μπαταρίας. Αναπαράγει κυρίως μια ελεγχόμενη DC τάση με συγκεκριμένη ικανότητα source/sink και προγραμματιζόμενο περιορισμό ρεύματος.

2.15.6 Επίδραση της καλωδίωσης και της γείωσης

Σε ισχύ αρκετών amperes η καλωδίωση παύει να μπορεί να αντιμετωπίζεται ως ιδανικός αγωγός. Η αντίσταση των καλωδίων, των βυσμάτων και των διαδρομών PCB προκαλεί πτώση τάσης I·R, ενώ η παρασιτική επαγωγή δημιουργεί πρόσθετες τάσεις κατά τις γρήγορες μεταβολές του ρεύματος. Για τον λόγο αυτό οι διαδρομές υψηλού ρεύματος πρέπει να είναι κοντές και χαμηλής αντίστασης, ενώ οι συνδέσεις feedback πρέπει να αποφεύγουν κοινές διαδρομές με μεγάλα ρεύματα όπου είναι δυνατό. Η κακή διάταξη μπορεί να μετατρέψει ένα θεωρητικά σωστό κύκλωμα σε σύστημα με σφάλμα ρύθμισης ή ακόμη και τάση για ταλάντωση.

Αν η τάση μετράται πάνω στην πλακέτα αλλά το DUT συνδέεται μέσω μακριών καλωδίων, η πραγματική τάση στους ακροδέκτες του DUT θα μειώνεται όσο αυξάνεται το ρεύμα. Η παρατήρηση αυτή είναι σημαντική κατά την πειραματική αξιολόγηση της κατασκευής. Η μέτρηση πρέπει να γίνεται τόσο στην έξοδο της πλακέτας όσο και, όταν χρειάζεται, στο άκρο του φορτίου ώστε να διαχωριστεί το σφάλμα του ηλεκτρονικού βρόχου από την πτώση τάσης της εξωτερικής καλωδίωσης.

2.15.7 Κριτήρια ασφαλούς εργαστηριακής λειτουργίας

Πριν από δοκιμές στο μέγιστο ρεύμα, η κατασκευή πρέπει να αξιολογείται σταδιακά. Αρχικά ελέγχεται η ρύθμιση τάσης χωρίς φορτίο και στη συνέχεια με αυξανόμενο ωμικό φορτίο. Παράλληλα παρακολουθούνται η θερμοκρασία της ψύκτρας, η τάση εξόδου, το ρεύμα και η ενεργοποίηση του current limit. Η λειτουργία κοντά στα θερμικά όρια δεν πρέπει να θεωρείται κανονική κατάσταση. Η θερμική προστασία του OPA549 προορίζεται για προστασία από αστοχίες ή υπερφόρτωση και όχι ως θερμοστάτης που ενεργοποιείται περιοδικά κατά τη συνήθη χρήση.

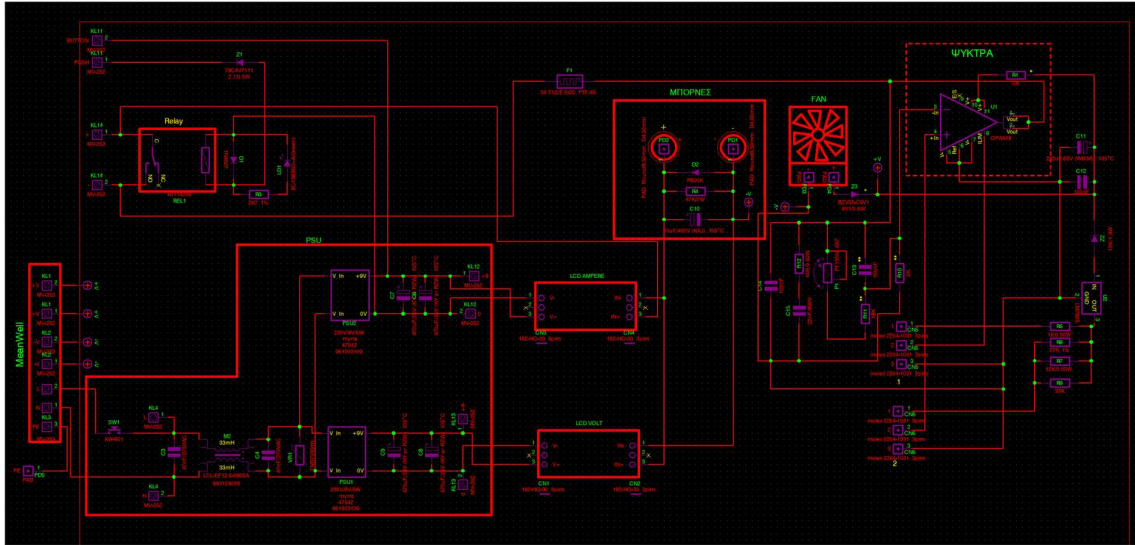
Για την τελική αξιολόγηση της διάταξης είναι χρήσιμο να καταγραφούν χαρακτηριστικές καμπύλες V_{out} ως προς το φορτίο, πραγματικό ILIM ως προς τη θέση του ποτενσιόμετρου, θερμοκρασία ψύκτρας ως προς τον χρόνο και πτώση τάσης πάνω στον OPA549 για διαφορετικά σημεία λειτουργίας. Με τον τρόπο αυτό το θεωρητικό μοντέλο συνδέεται άμεσα με πειραματικά δεδομένα και τεκμηριώνεται αν η επιλεγμένη ψύξη και το κύκλωμα περιορισμού ρεύματος επαρκούν για τις προδιαγραφές της κατασκευής.

2.16 Επίλογος

Ο OPA549 συνδυάζει υψηλή διαφορική ενίσχυση και αρνητική ανάδραση με στάδιο εξόδου ικανό να διαχειριστεί ρεύματα πολλών ampere. Η προγραμματιζόμενη λειτουργία current limit, ο ακροδέκτης Enable/Status, η δυνατότητα source και sink, η ευρεία περιοχή τροφοδοσίας και οι ενσωματωμένες θερμικές προστασίες τον καθιστούν κατάλληλο για προγραμματιζόμενες πηγές και εργαστηριακό εξοπλισμό. Ταυτόχρονα, η χρήση του σε υψηλή ισχύ απαιτεί αυστηρή εξέταση του output swing, της Safe Operating Area, της απώλειας ισχύος, της ψύκτρας και της ευστάθειας του βρόχου. Οι παράγοντες αυτοί αποτελούν τη θεωρητική βάση πάνω στην οποία θα αναλυθεί η συγκεκριμένη κατασκευή του προσομοιωτή μπαταρίας.

Κεφάλαιο 3ο: Ανάλυση και σχεδίαση ηλεκτρονικού κυκλώματος

3.1 Εισαγωγή



Σχήμα 3.1: Συνολικό ηλεκτρονικό σχηματικό του προσομοιωτή μπαταρίας.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η αναλυτική λειτουργία του ηλεκτρονικού κυκλώματος του προσομοιωτή μπαταρίας. Σε αντίθεση με το προηγούμενο κεφάλαιο, όπου εξετάστηκε ο OPA549 ως ανεξάρτητο ολοκληρωμένο κύκλωμα, εδώ το ενδιαφέρον μεταφέρεται στη συγκεκριμένη υλοποίηση και στον τρόπο με τον οποίο τα επιμέρους υποσυστήματα συνεργάζονται. Η διάταξη μπορεί να αντιμετωπιστεί ως σύνολο διακριτών λειτουργικών βαθμίδων: κύρια τροφοδοσία ισχύος, βαθμίδα OPA549, κύκλωμα αναφοράς και ρύθμισης τάσης, κύκλωμα προγραμματισμού του ορίου ρεύματος, κύκλωμα ψύξης, δίκτυο εξόδου, ρελέ ενεργοποίησης, ανεξάρτητη τροφοδοσία του οργάνου μέτρησης και κύκλωμα προστασίας της βοηθητικής τροφοδοσίας.

Η συγκεκριμένη διαίρεση είναι σημαντική επειδή επιτρέπει να εξηγηθεί ο ρόλος κάθε στοιχείου σε σχέση με τη συνολική λειτουργία. Οι αντιστάσεις και οι πυκνωτές της πλακέτας δεν αποτελούν ανεξάρτητα στοιχεία που τοποθετήθηκαν αποσπασματικά. Κάθε ομάδα εξαρτημάτων εξυπηρετεί μία συγκεκριμένη ανάγκη, όπως τον καθορισμό του κέρδους κλειστού βρόχου, τη δημιουργία σταθερής τάσης αναφοράς, την αποσύζευξη της τροφοδοσίας, τον περιορισμό ρεύματος, την απόσβεση μεταβατικών φαινομένων ή την προστασία από μη επιθυμητές καταστάσεις.

3.2 Γενική αρχιτεκτονική της διάταξης

Η κύρια ισχύς παρέχεται από εξωτερικό διακοπτικό τροφοδοτικό μάρκας Mean Well. Το συγκεκριμένο τροφοδοτικό είναι ρυθμιζόμενο και στην πραγματική κατασκευή μετρήθηκε μέγιστη τάση εξόδου περίπου 36V. Η ακριβής εμπορική έκδοση δεν αποτελεί κρίσιμο στοιχείο της αρχής λειτουργίας, ωστόσο η πραγματική μέγιστη τάση πρέπει να λαμβάνεται υπόψη επειδή καθορίζει τόσο το μέγιστο διαθέσιμο περιθώριο εξόδου όσο και τη θερμική καταπόνηση του OPA549. Η θετική γραμμή τροφοδοσίας διέρχεται από την ασφάλεια F1 των 3A πριν τροφοδοτήσει τη βαθμίδα ισχύος και τα σχετικά βοηθητικά κυκλώματα.

Η έξοδος προς το υπό δοκιμή κύκλωμα καταλήγει στις δύο μπόρνες PD2 και PD1. Η PD2 αποτελεί τον θετικό ακροδέκτη εξόδου και η PD1 τον αρνητικό. Η τάση που εμφανίζεται μεταξύ αυτών των δύο ακροδεκτών καθορίζεται από τον κλειστό βρόχο του OPA549, ενώ το μέγιστο ρεύμα καθορίζεται από το κύκλωμα ILIM. Στη συγκεκριμένη κατασκευή χρησιμοποιούνται δύο εξωτερικά ποτενσιόμετρα. Το πολύστροφο ποτενσιόμετρο των 20kΩ συνδέεται στην κλέμα CN5 και χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση του current limit, ενώ το αντίστοιχο πολύστροφο ποτενσιόμετρο των 10kΩ συνδέεται στην CN6 και χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της τάσης εξόδου.

Η λειτουργία της διάταξης είναι αμφίδρομη ως προς το ρεύμα. Όταν η ρυθμισμένη τάση του προσομοιωτή είναι μεγαλύτερη από την τάση ενός συνδεδεμένου στοιχείου, ο OPA549 παρέχει ρεύμα προς αυτό. Αυτό παρατηρήθηκε πειραματικά με μπαταρία 12V, η οποία φορτιζόταν όταν ο προσομοιωτής είχε ρυθμιστεί σε τάση μεγαλύτερη από 12V. Αντίστροφα, όταν η επιλεγμένη τάση του προσομοιωτή ρυθμιζόταν χαμηλότερα από την τάση της μπαταρίας, το ρεύμα αντιστρεφόταν και το όργανο εμφάνιζε αρνητική τιμή. Η μπαταρία τότε παρείχε ρεύμα προς τη διάταξη. Όσο μεγαλύτερη ήταν η διαφορά τάσης, τόσο μεγαλύτερο ρεύμα παρατηρούνταν, έως το όριο που είχε καθοριστεί από το current limit.

3.3 Κύρια τροφοδοσία ισχύος και ασφάλεια F1

Η εξωτερική κύρια τροφοδοσία αποτελεί την ενεργειακή πηγή του OPA549. Σε μία γραμμική διάταξη όπως η παρούσα, η τάση αυτή δεν μετατρέπεται με υψηλής συχνότητας διακοπτική βαθμίδα αλλά εφαρμόζεται απευθείας στο στάδιο ισχύος του power operational amplifier. Επομένως, όταν η επιλεγμένη τάση εξόδου είναι μικρότερη από την τάση τροφοδοσίας, η διαφορά τάσης εμφανίζεται πάνω στο αγωγίμο στάδιο εξόδου του OPA549. Η συνεπαγόμενη απώλεια ισχύος είναι ο βασικός λόγος για τον οποίο η θερμική διαχείριση έχει τόσο μεγάλη σημασία.

Η ασφάλεια F1 των 3A είναι τοποθετημένη σε σειρά με την κύρια γραμμή τροφοδοσίας και παρέχει ένα ανεξάρτητο επίπεδο προστασίας έναντι παρατεταμένου υπερρεύματος ή σοβαρής αστοχίας. Το current limit του OPA549 αποτελεί ενεργό ηλεκτρονικό μηχανισμό ελέγχου, ενώ η F1 αποτελεί παθητική προστασία τελευταίου επιπέδου. Οι δύο λειτουργίες δεν είναι ισοδύναμες: το current limit περιορίζει κανονικά το ρεύμα κατά τη λειτουργία, ενώ η ασφάλεια προορίζεται να διακόψει το κύκλωμα όταν η συνολική απαίτηση υπερβεί για επαρκή χρόνο την ονομαστική της ικανότητα.

$$P_D \approx (V_S - V_{OUT}) \times I_{OUT}$$

μεταφέρει ολόκληρο το ρεύμα φορτίου. Έτσι το εξωτερικό ποτενσιόμετρο μπορεί να είναι κοινό ποτενσιόμετρο χαμηλής ισχύος, παρότι η έξοδος διαχειρίζεται σημαντικά μεγαλύτερο ρεύμα.

3.5 Αποσύζευξη της κύριας τροφοδοσίας: C11 και C12

Οι C11 και C12 τοποθετούνται στην περιοχή της τροφοδοσίας του OPA549 και αποτελούν ζεύγος αποσύζευξης διαφορετικών χρονικών κλιμάκων. Ο C11 είναι ηλεκτρολυτικός πυκνωτής 220 $\mu\text{F}/50\text{ V}$ και λειτουργεί ως τοπική δεξαμενή ενέργειας. Όταν το ρεύμα του OPA549 μεταβάλλεται απότομα, ο C11 μπορεί να παρέχει ή να απορροφήσει στιγμιαία φορτίο χωρίς η αντίστοιχη μεταβολή να πρέπει να καλυφθεί εξ ολοκλήρου μέσω των αγωγών από το εξωτερικό τροφοδοτικό.

Ο C12 είναι πυκνωτής 100 nF και λειτουργεί κυρίως στην υψηλότερη περιοχή συχνοτήτων. Η μικρότερη χωρητικότητα συνοδεύεται συνήθως από χαμηλότερη παρασιτική επαγωγή, επομένως ο πυκνωτής είναι αποτελεσματικότερος στην απόσβεση γρήγορων παλμών και υψηλής συχνότητας θορύβου. Η παράλληλη χρήση μεγάλου ηλεκτρολυτικού και μικρού πυκνωτή αποτελεί κλασική πρακτική αποσύζευξης σε power op-amps και είναι σύμφωνη με τις οδηγίες του datasheet του OPA549 [1].

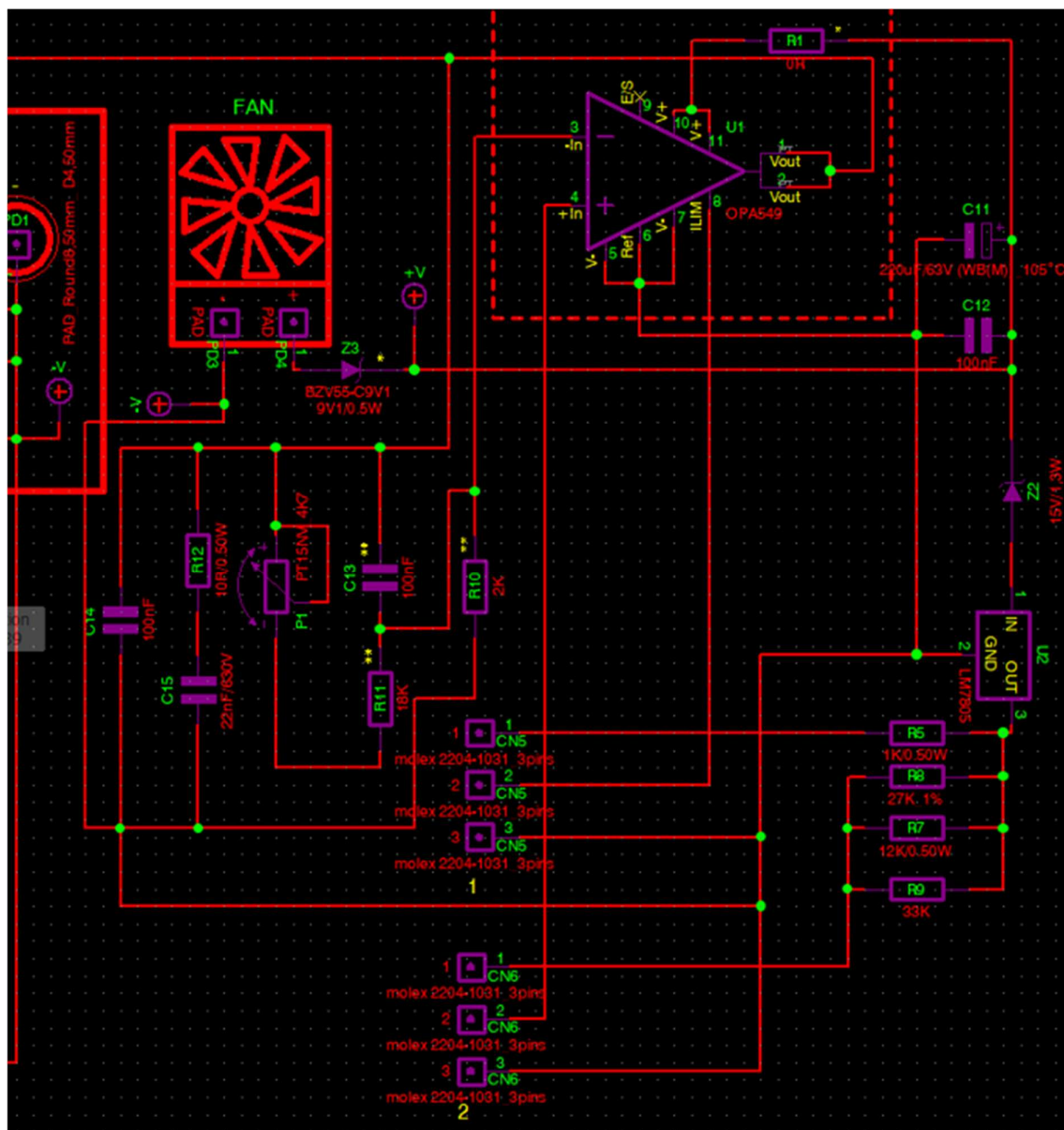
3.6 Δημιουργία τάσης αναφοράς 5V: U2 και βοηθητικό δίκτυο

Για τη ρύθμιση της τάσης και του ορίου ρεύματος απαιτείται σταθερή τάση αναφοράς, ανεξάρτητη όσο είναι δυνατόν από τις μεταβολές της κύριας τροφοδοσίας. Η λειτουργία αυτή υλοποιείται με τον U2 LM7805, ο οποίος παρέχει σταθεροποιημένη έξοδο +5V [8]. Η αναφορά των 5V δεν προορίζεται να τροφοδοτήσει το φορτίο ισχύος. Χρησιμοποιείται από τα κυκλώματα ελέγχου και τα εξωτερικά ποτενσιόμετρα, όπου τα ρεύματα είναι μικρά.

Στην είσοδο της βαθμίδας υπάρχει η Z2 των 15V/1,3W, η οποία συμμετέχει στην προσαρμογή και προστασία της τροφοδοσίας του LM7805. Η ακριβής πτώση και η κατανομή ισχύος εξαρτώνται από το ρεύμα του κλάδου, επομένως στην τελική αξιολόγηση είναι σκόπιμο να μετρηθούν οι τάσεις πριν και μετά τη Z2 καθώς και η τάση εισόδου του U2.

Οι $R5 = 1\text{k}\Omega/0,5\text{W}$ και $R7 = 10\text{k}\Omega$ συνδέονται στις γραμμές που διανέμουν την αναφορά προς τα εξωτερικά κυκλώματα ρύθμισης. Σε συνδυασμό με τα ποτενσιόμετρα και τις υπόλοιπες αντιστάσεις δημιουργούν τα απαιτούμενα επίπεδα τάσης και περιορίζουν ρεύματα μεταξύ των επιμέρους κόμβων.

3.7 Ρύθμιση του ορίου ρεύματος μέσω CN5



Σχήμα 3.3: Κύκλωμα αναφοράς, εξωτερικών ποτενσιόμετρων και βοηθητικών παθητικών στοιχείων.

Η κλέμα CN5 συνδέεται με εξωτερικό ποτενσιόμετρο 20kΩ και αποτελεί το χειριστήριο του current limit. Ένας από τους ακροδέκτες της CN5 οδηγείται στον ILIM του OPA549. Η λειτουργία εκμεταλλεύεται τον εσωτερικό μηχανισμό περιορισμού ρεύματος του ολοκληρωμένου. Σύμφωνα με το datasheet, το όριο μπορεί να μεταβάλλεται από πρακτικά μηδενικό ρεύμα έως τη μέγιστη περιοχή, με την κατάλληλη ισοδύναμη αντίσταση ή τάση μεταξύ ILIM και Ref [1].

Η χρήση ποτενσιόμετρου 20 kΩ επιτρέπει στον χειριστή να μεταβάλλει συνεχώς το setpoint. Η επιλογή μεγαλύτερης αντίστασης από εκείνη του ποτενσιόμετρου τάσης είναι συμβατή με τη χαμηλού ρεύματος φύση του ακροδέκτη ILIM. Η ίδια η Texas Instruments επισημαίνει ότι ο έλεγχος του ILIM απαιτεί σήμα της τάξης εκατοντάδων μA και επομένως η λειτουργία είναι κατάλληλη και για μελλοντική ψηφιακή ρύθμιση μέσω DAC [1].

Πρακτικά, όταν το φορτίο προσπαθεί να προκαλέσει ρεύμα μεγαλύτερο από την επιλεγμένη τιμή, ο OPA549 περιορίζει την έξοδο. Η ίδια λειτουργία παρατηρήθηκε και κατά τη δοκιμή με τη μπαταρία 12V: όταν ο προσομοιωτής λειτουργούσε ως sink, η μεταβολή του current limit επηρέαζε το μέγιστο ρεύμα που μπορούσε να απορροφηθεί.

3.8 Ρύθμιση της τάσης μέσω CN6 και δικτύου ανάδρασης

Η CN6 συνδέεται σε εξωτερικό ποτενσιόμετρο 10kΩ και χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της επιθυμητής τάσης εξόδου. Το ποτενσιόμετρο τροφοδοτείται από τη σταθεροποιημένη τάση αναφοράς και παράγει μεταβλητό σήμα χαμηλής ισχύος. Η τιμή αυτή εφαρμόζεται στο δίκτυο ελέγχου του OPA549 και μετατρέπεται, μέσω του κέρδους κλειστού βρόχου, στην αντίστοιχη τάση στις μπόρνες εξόδου.

Οι $R10 = 2k\Omega$ και $R11 = 18k\Omega$ είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τη λειτουργία αυτή. Ο λόγος των δύο τιμών αντιστοιχεί σε ονομαστικό μη αναστρέφον κέρδος περίπου 10, εφόσον αποτελούν το βασικό ζεύγος του δικτύου ανάδρασης. Η τιμή αυτή συμφωνεί με την τυπική programmable power-supply εφαρμογή του OPA549, όπου μικρή τάση αναφοράς πολλαπλασιάζεται ώστε να παραχθεί μεγαλύτερη τάση εξόδου [1].

$$G \approx 1 + R11/R10 = 1 + 18k\Omega / 2k\Omega = 10$$

3.9 Ο ρόλος του P1, των R10-R12 και των C13-C15

Στην ίδια περιοχή βρίσκεται ο trimmer P1 των 4,7kΩ μαζί με τις $R10 = 2k\Omega$, $R11 = 18k\Omega$, $R12 = 10\Omega$ και τους $C13 = 100nF$, $C14 = 100nF$ και $C15 = 22nF$. Η ακριβής λειτουργία του P1 δεν περιγράφεται στην πηγή Electronics-Lab που αποτέλεσε αφετηρία για τη σχεδίαση. Η διαθέσιμη σελίδα αναφέρει μόνο τα ποτενσιόμετρα ρύθμισης τάσης και ρεύματος και δεν τεκμηριώνει ξεχωριστή διαδικασία offset trim [2].

Με βάση όμως τη θέση του P1 στο συγκεκριμένο σχηματικό και τη σύνδεσή του με το δίκτυο R10-R11, η πιο συνεπής ερμηνεία είναι ότι λειτουργεί ως λεπτή ρύθμιση βαθμονόμησης της κλίμακας ή του κέρδους της τάσης και όχι ως εσωτερικό offset trim του ίδιου του OPA549. Ο OPA549 δεν διαθέτει ειδικούς ακροδέκτες offset-null. Επομένως, στην παρούσα εργασία ο P1 είναι ασφαλέστερο να περιγραφεί ως trimmer βαθμονόμησης του βρόχου τάσης, με την ακριβή επίδρασή του να επιβεβαιώνεται πειραματικά.

Ο C13 των 100nF βρίσκεται στην περιοχή του feedback/control network και λειτουργεί ως στοιχείο φιλτραρίσματος και περιορισμού της υψηλής συχνότητας απόκρισης του βρόχου. Ο C14 των 100nF προσφέρει επιπλέον τοπική αποσύζευξη στον αντίστοιχο κόμβο αναφοράς. Το ζεύγος $R12 = 10\Omega$ και $C15 = 22nF$ σχηματίζει δίκτυο R-C που επηρεάζει τις γρήγορες μεταβολές του βρόχου και συνεισφέρει στην απόσβεση/ευστάθεια. Η Texas Instruments αναφέρει ότι R-C compensation μπορεί να απαιτείται σε δύσκολα φορτία ή κατά τη λειτουργία σε current limit [1].

3.10 Δίκτυο εξόδου: D2, R4 και C10

Στις μπόρνες PD2 και PD1 βρίσκεται παράλληλο δίκτυο που αποτελείται από τη δίοδο D2 τύπου P600K, την αντίσταση $R4 = 47k\Omega/2W$ και τον ηλεκτρολυτικό $C10 = 10\mu F/63V$. Ο C10 προσθέτει τοπική χωρητικότητα στην έξοδο, περιορίζει πολύ γρήγορες μεταβολές της τάσης και λειτουργεί ως μικρό ενεργειακό απόθεμα.

Η R4 των 47kΩ λειτουργεί ως αντίσταση εκφόρτισης του C10 και ως ασθενές μόνιμο φορτίο εξόδου. Όταν η έξοδος αποσυνδεθεί ή απενεργοποιηθεί, ο C10 διαφορετικά θα μπορούσε να διατηρήσει φορτίο. Μέσω της R4 αποκτά συγκεκριμένη διαδρομή εκφόρτισης. Στα 30V, το ρεύμα της είναι περίπου 0,64mA και η ισχύς περίπου 19mW.

Η D2 λειτουργεί ως στοιχείο προστασίας έναντι ανεπιθύμητης αντίστροφης πολικότητας ή μεταβατικών φαινομένων στην έξοδο. Η ανάγκη για τέτοια προστασία είναι ιδιαίτερα σημαντική επειδή η έξοδος μπορεί να συνδεθεί με ενεργές πηγές όπως μπαταρίες. Η Texas Instruments επισημαίνει ότι αντιδραστικά ή ενεργά φορτία μπορούν να επιστρέψουν ενέργεια στον OPA549 και συστήνει κατάλληλες διαδρομές clamp όταν υπάρχει κίνδυνος υπέρβασης των γραμμών τροφοδοσίας [1].

$$I_{R4} = V_{OUT} / 47k\Omega$$

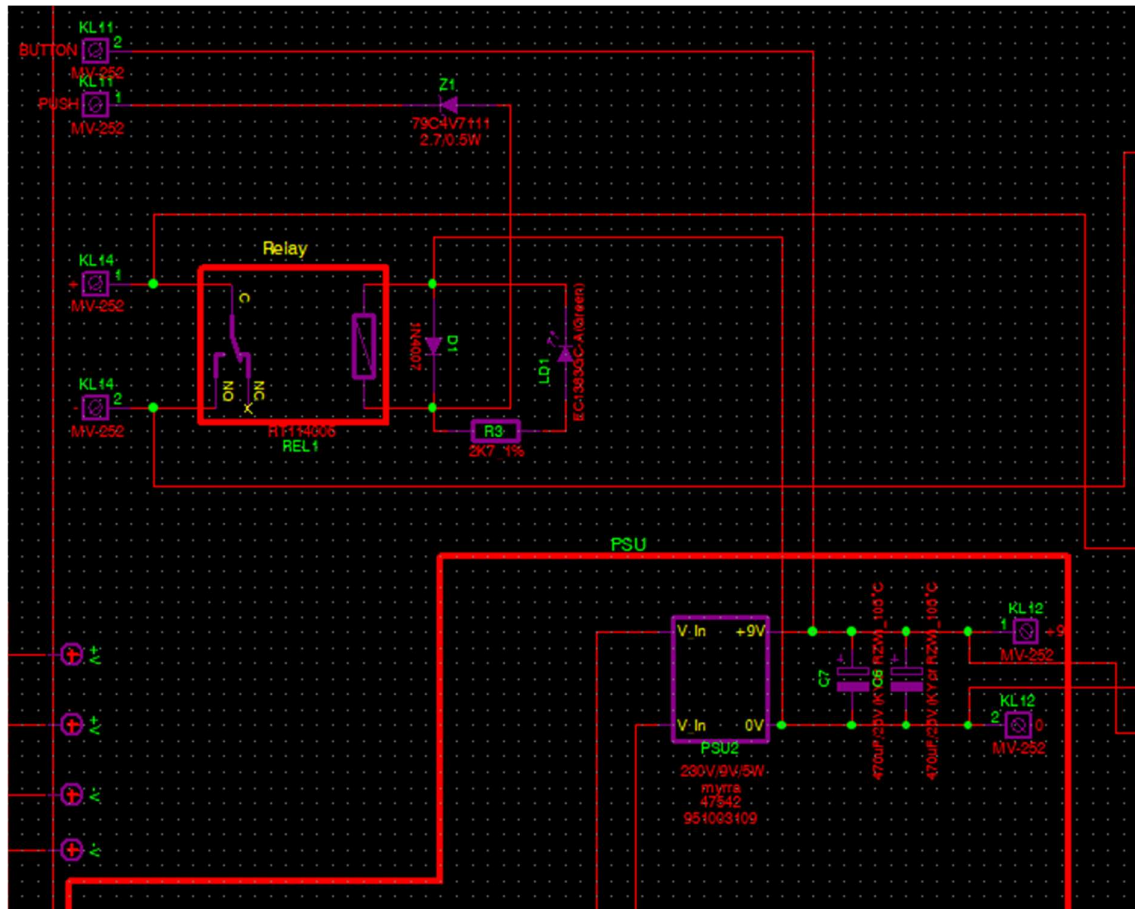
3.11 Ψύξη και τροφοδοσία ανεμιστήρα: Z3

Η ψύξη του OPA549 πραγματοποιείται με ψύκτρα και ανεμιστήρα. Η παρουσία ανεμιστήρα είναι δικαιολογημένη από τη γραμμική λειτουργία του power op-amp, επειδή η απώλεια ισχύος μπορεί να γίνει υψηλή ακόμη και σε σχετικά μικρό ρεύμα όταν η πτώση τάσης πάνω στο ολοκληρωμένο είναι μεγάλη. Η εξαναγκασμένη ροή αέρα μειώνει την αποτελεσματική θερμική αντίσταση της ψύκτρας προς το περιβάλλον.

Η Z3 είναι BZV55-C9V1, ονομαστικής τάσης Zener 9,1V. Στην πραγματική κατασκευή ο ανεμιστήρας ξεκινά να περιστρέφεται κοντά στα 8V και λειτουργεί ικανοποιητικά περίπου στα 9V, ενώ μπορεί να λειτουργήσει και έως περίπου 12V. Ο σχεδιαστικός στόχος ήταν να παραμένει η τάση λειτουργίας του στην περιοχή γύρω από τα 8-9V ώστε να υπάρχει επαρκής ψύξη χωρίς περιττή αύξηση θορύβου και καταπόνησης.

Σημειώνεται ότι μία Zener σε σειρά με μία γραμμή δεν λειτουργεί από μόνη της ως ιδανικός παράλληλος σταθεροποιητής 9V. Για τον λόγο αυτό, στην τελική πειραματική τεκμηρίωση πρέπει να μετρηθεί η πραγματική τάση στα άκρα του ανεμιστήρα για το πλήρες εύρος της κύριας τροφοδοσίας.

3.12 Κύκλωμα ενεργοποίησης εξόδου με relay



Σχήμα 3.4: Βοηθητική τροφοδοσία οργάνου και κύκλωμα relay/push button.

Η σύνδεση της εξόδου ελέγχεται μέσω του REL1 RT114006. Το relay επιτρέπει στον χρήστη να συνδέει ή να αποσυνδέει ηλεκτρικά την έξοδο χωρίς να απαιτείται η απενεργοποίηση ολόκληρης της διάταξης. Η εντολή δίνεται από εξωτερικό push button τύπου toggle. Με το πρώτο πάτημα το πλήκτρο παραμένει μηχανικά στην επιλεγμένη κατάσταση και με το επόμενο πάτημα αλλάζει στην αντίθετη κατάσταση.

Η D1 τύπου 1N4007 είναι συνδεδεμένη στην περιοχή του πηνίου του relay και λειτουργεί ως flyback diode. Όταν το ρεύμα του πηνίου διακοπεί, η αποθηκευμένη μαγνητική ενέργεια τείνει να δημιουργήσει υψηλή αντίστροφη τάση. Η D1 παρέχει διαδρομή στο ρεύμα του πηνίου ώστε η ενέργεια να εκτονωθεί με ελεγχόμενο τρόπο.

Η LD1 είναι πράσινη LED ένδειξης και η $R3 = 2,7k\Omega/1\%$ περιορίζει το ρεύμα της. Η Z1 των 2,7V βρίσκεται στη γραμμή του εξωτερικού toggle button. Η κύρια λειτουργία της είναι να η πτώση τάσης της τάξεως των 2,7V που προκαλεί, πρωτού φτάσουν στο relay ολόκληρα τα 9V από την έξοδο του βοηθητικού τροφοδοτικού myrra. Ο λόγος ύπαρξης αυτής της πτώσης τάσεως προκύπτει καθώς η ονομαστική μέγιστη τάση του relay είναι κοντά στα 6V.

3.13 Ανεξάρτητη τροφοδοσία 230V/9V των οργάνων μέτρησης

Για την απεικόνιση των ηλεκτρικών μεγεθών της εξόδου χρησιμοποιούνται δύο όμοια ψηφιακά panel meters, τα οποία βασίζονται στο ολοκληρωμένο ICL7107 [5]. Παρότι τα δύο όργανα είναι

κατασκευαστικά ίδια, στην τελική διάταξη έχουν διαφορετική παραμετροποίηση: το ένα χρησιμοποιείται ως βολτόμετρο για την ένδειξη της τάσης εξόδου, ενώ το δεύτερο χρησιμοποιείται ως αμπερόμετρο για την ένδειξη του ρεύματος. Τα δύο panel meters τροφοδοτούνται από ανεξάρτητη βοηθητική τροφοδοσία, ώστε η λειτουργία της ένδειξης να διαχωρίζεται από την κύρια βαθμίδα ισχύος του battery simulator.

Η βοηθητική τροφοδοσία βασίζεται σε encapsulated τροφοδοτικό Mytra 230V/9V. Πριν από το module έχει σχεδιαστεί ξεχωριστή βαθμίδα εισόδου δικτύου. Η KL5 δέχεται L, N και PE και ο SW1 λειτουργεί ως κύριος διακόπτης. Οι C3 και C4 είναι πυκνωτές 47nF/275VAC και χρησιμοποιούνται στην είσοδο δικτύου για καταστολή θορύβου υψηλής συχνότητας.

Το M2 αποτελεί common-mode choke με δύο τυλίγματα 33mH. Η διάταξη αυτή παρουσιάζει υψηλή εμπέδηση σε κοινότροπο θόρυβο υψηλής συχνότητας, ενώ επιτρέπει τη διέλευση του κανονικού ρεύματος των 50Hz. Σε συνδυασμό με τους C3 και C4 δημιουργεί φίλτρο ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών στην είσοδο της βοηθητικής τροφοδοσίας.

Ο VR1 TNR7V431K είναι varistor και χρησιμοποιείται ως στοιχείο προστασίας έναντι παροδικών υπερτάσεων του δικτύου. Σε κανονική λειτουργία παρουσιάζει πολύ υψηλή αντίσταση, ενώ σε ισχυρή αιχμή η αντίστασή του μειώνεται και περιορίζει το transient. Στη δευτερεύουσα πλευρά, οι C8 και C9 είναι ηλεκτρολυτικοί 470μF/25V και λειτουργούν ως πυκνωτές εξομάλυνσης και τοπικού ενεργειακού αποθέματος στη γραμμή των 9V που τροφοδοτεί τα όργανα μέτρησης.

3.14 Σύνδεση panel meter για τάση και ρεύμα

Τα δύο όργανα που τοποθετούνται στην πρόσοψη είναι το ίδιο ICL7107 Digital Ammeter/Voltmeter Kit. Το συγκεκριμένο kit μπορεί να παραμετροποιηθεί για διαφορετικές περιοχές μέτρησης τάσης και προβλέπει επίσης τη δυνατότητα μετατροπής του σε αμπερόμετρο με χρήση κατάλληλης αντίστασης υψηλής ακρίβειας. Με αυτόν τον τρόπο δεν απαιτούνται δύο διαφορετικές πλακέτες οργάνων: η ίδια βασική αρχιτεκτονική αξιοποιείται μία φορά ως βολτόμετρο και μία φορά ως αμπερόμετρο [4].

Στο πρώτο panel meter η είσοδος παραμετροποιείται ως βολτόμετρο και συνδέεται έτσι ώστε να παρακολουθεί την τάση μεταξύ των ακροδεκτών εξόδου PD2 και PD1. Ο ICL7107 δεν οδηγεί το κύκλωμα ισχύος και δεν συμμετέχει στον βρόχο ελέγχου του OPA549. Ο ρόλος του είναι αποκλειστικά η μετατροπή της αναλογικής τάσης μέτρησης σε ψηφιακή ένδειξη, παρέχοντας στον χρήστη άμεση πληροφορία για την πραγματική τάση που εμφανίζεται στην έξοδο.

Το δεύτερο ίδιο panel meter παραμετροποιείται ως αμπερόμετρο μέσω αντίστασης shunt [5]. Το ρεύμα της κύριας διαδρομής διέρχεται από μία αντίσταση πολύ μικρής και γνωστής τιμής και δημιουργεί στα άκρα της μία μικρή διαφορά δυναμικού. Το panel δεν μετρά επομένως άμεσα τα ampere. Μετρά την πτώση τάσης πάνω στο shunt και, μετά την κατάλληλη επιλογή κλίμακας και βαθμονόμηση, η ένδειξη αντιστοιχεί στο ρεύμα που διαρρέει τη διάταξη. Η αρχή περιγράφεται από τον νόμο του Ohm:

$$V_SHUNT = I_OUT \cdot R_SHUNT [7]$$

Η τιμή του shunt πρέπει να είναι αρκετά μικρή ώστε να μην προκαλεί σημαντική ανεπιθύμητη πτώση τάσης ή απώλεια ισχύος στη διαδρομή εξόδου, αλλά ταυτόχρονα αρκετή ώστε η παραγόμενη διαφορά δυναμικού να μπορεί να μετρηθεί αξιόπιστα. Η ισχύς που αναπτύσσεται πάνω στην αντίσταση δίνεται από $P_SHUNT = I_OUT^2 \cdot R_SHUNT$ και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την επιλογή της ονομαστικής ισχύος της. Στην παρούσα περιγραφή δεν αναφέρεται αριθμητική τιμή για το shunt, καθώς η ακριβής τιμή της χρησιμοποιούμενης αντίστασης πρέπει να επιβεβαιωθεί από την τελική συναρμολόγηση πριν καταγραφεί ως προδιαγραφή της κατασκευής.

Ιδιαίτερη σημασία για τον συγκεκριμένο battery simulator έχει το γεγονός ότι η μέτρηση ρεύματος είναι αμφίδρομη. Όταν αντιστρέφεται η φορά του ρεύματος, αντιστρέφεται και η πολικότητα της τάσης στα άκρα του shunt. Ο ICL7107 μπορεί να απεικονίσει αρνητικό πρόσημο για αντίθετη πολικότητα εισόδου, επιτρέποντας έτσι στο ίδιο όργανο να δείχνει όχι μόνο το μέτρο αλλά και τη φορά του ρεύματος. Αυτό είναι απαραίτητο στη συγκεκριμένη κατασκευή, επειδή ο OPA549 μπορεί να λειτουργεί τόσο ως source όσο και ως sink.

Η αμφίδρομη ένδειξη επιβεβαιώθηκε πρακτικά κατά τη δοκιμή με μπαταρία 12 V. Όταν το setpoint του battery simulator ρυθμίστηκε πάνω από την τάση της μπαταρίας, η διάταξη παρείχε ρεύμα προς αυτή. Όταν το setpoint μειώθηκε κάτω από την τάση της μπαταρίας, η φορά του ρεύματος αντιστράφηκε και το αμπερόμετρο εμφάνισε αρνητική τιμή. Επομένως, η ένδειξη του δεύτερου ICL7107 παρέχει άμεσα στον χρήστη πληροφορία για το αν ο προσομοιωτής τη δεδομένη στιγμή παρέχει ή απορροφά ρεύμα.

3.15 Συνολική λειτουργία ως πηγή και ως φορτίο

Η συνολική λειτουργία μπορεί να ερμηνευθεί συγκρίνοντας το setpoint του προσομοιωτή VSET με την τάση που επιβάλλει το συνδεδεμένο εξωτερικό κύκλωμα. Αν VSET είναι μεγαλύτερο, ο κλειστός βρόχος του OPA549 αυξάνει την έξοδο και παρέχει ρεύμα μέχρι να επιτευχθεί η επιλεγμένη τάση ή μέχρι να ενεργοποιηθεί το current limit. Στη δοκιμή με μπαταρία 12V, ρύθμιση του simulator πάνω από 12V οδήγησε σε θετικό ρεύμα προς την μπαταρία, δηλαδή σε φόρτιση.

Αν VSET είναι μικρότερο από την τάση της μπαταρίας, η φορά αντιστρέφεται. Ο OPA549 επιχειρεί να συγκρατήσει τον κόμβο εξόδου στη χαμηλότερη επιλεγμένη τάση και απορροφά ρεύμα από την μπαταρία. Το panel meter εμφανίζει τότε αρνητικό ρεύμα. Με μεγαλύτερη διαφορά τάσης αυξάνεται το ρεύμα μέχρι να περιοριστεί από το ILIM ή από τα υπόλοιπα ηλεκτρικά και θερμικά όρια.

Η συμπεριφορά αυτή είναι ο λόγος για τον οποίο η κατασκευή είναι περισσότερο από ένα απλό ρυθμιζόμενο τροφοδοτικό. Η ίδια έξοδος μπορεί να λειτουργεί και ως ενεργό φορτίο, υπό την προϋπόθεση ότι το απορροφούμενο ρεύμα και η αντίστοιχη θερμική ισχύς παραμένουν εντός ασφαλών ορίων.

3.16 Επίλογος

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύθηκε η πραγματική ηλεκτρονική υλοποίηση του προσομοιωτή μπαταρίας. Η κύρια τροφοδοσία παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια στον OPA549, ενώ η σταθεροποιημένη αναφορά των 5 V και τα εξωτερικά ποτενσιόμετρα επιτρέπουν ανεξάρτητη ρύθμιση τάσης και ορίου ρεύματος. Το δίκτυο feedback καθορίζει την κλειστή λειτουργία της τάσης, τα παθητικά R-C στοιχεία υποστηρίζουν τη σταθερότητα και το φίλτράρισμα, ενώ το δίκτυο εξόδου προστατεύει και αποφορτίζει τον τελικό κόμβο. Παράλληλα, το relay παρέχει ελεγχόμενη σύνδεση της εξόδου, η βοηθητική τροφοδοσία των 9V τροφοδοτεί τα panel meter και ο ανεμιστήρας υποστηρίζει τη θερμική διαχείριση του power stage.

Η δοκιμή με πραγματική μπαταρία έδειξε ότι η διάταξη μπορεί να μεταβάλει φυσικά τη φορά ροής του ρεύματος ανάλογα με τη σχέση μεταξύ της επιλεγμένης τάσης του simulator και της τάσης της εξωτερικής μπαταρίας. Το αποτέλεσμα αυτό συνδέει άμεσα τη θεωρητική source/sink λειτουργία του OPA549 με την πραγματική συμπεριφορά της κατασκευής.

3.17 Συνοπτικός πίνακας βασικών εξαρτημάτων και ρόλων

Πίνακας 3.1: Συνοπτική αντιστοίχιση των βασικών εξαρτημάτων με τη λειτουργία τους.

Εξάρτημα	Τιμή/Τύπος	Κύρια λειτουργία
U1	OPA549	Κεντρικός power op-amp, ρύθμιση τάσης, source/sink και current limit.
U2	LM7805	Δημιουργία σταθερής αναφοράς +5 V.
CN5	Pot 20 kΩ	Ρύθμιση ορίου ρεύματος μέσω ILIM.
CN6	Pot 10 kΩ	Ρύθμιση τάσης εξόδου.
R10/R11	2 kΩ / 18 kΩ	Βασικό δίκτυο ανάδρασης, ονομαστικό κέρδος περίπου 10.
P1	4,7 kΩ trimmer	Πιθανή λεπτή βαθμονόμηση κέρδους/κλίμακας τάσης, προς επιβεβαίωση.
C11/C12	220 μF / 100 nF	Αποσύζευξη κύριας τροφοδοσίας.
D2	P600K	Προστασία εξόδου έναντι αντίστροφων/μεταβατικών καταστάσεων.
R4	47 kΩ/2 W	Bleeder του C10 και ασθενές μόνιμο φορτίο.
C10	10 μF/63 V	Τοπική χωρητικότητα εξόδου.
REL1	RT114006	Σύνδεση/αποσύνδεση της εξόδου.
D1	1N4007	Flyback προστασία πηνίου relay.
LD1/R3	LED / 2,7 kΩ	Ένδειξη κατάστασης με περιορισμό ρεύματος LED.
Z3	9,1 V Zener	Προσαρμογή τάσης στην τροφοδοσία fan, προς επιβεβαίωση με μέτρηση.
M2	2×33 mH	Common-mode choke της βοηθητικής τροφοδοσίας.
C3/C4	47 nF/275 VAC	Καταστολή υψηλής συχνότητας στην είσοδο 230 V.
VR1	TNR7V431K	Προστασία από παροδικές υπερτάσεις δικτύου.
PSU1	Myrra 230 V/9 V/5 W	Απομονωμένη βοηθητική τροφοδοσία panel meter.
C8/C9	470 μF/25 V	Εξομάλυνση στη γραμμή 9 V.
F1	3 A	Παθητική προστασία κύριας γραμμής ισχύος.

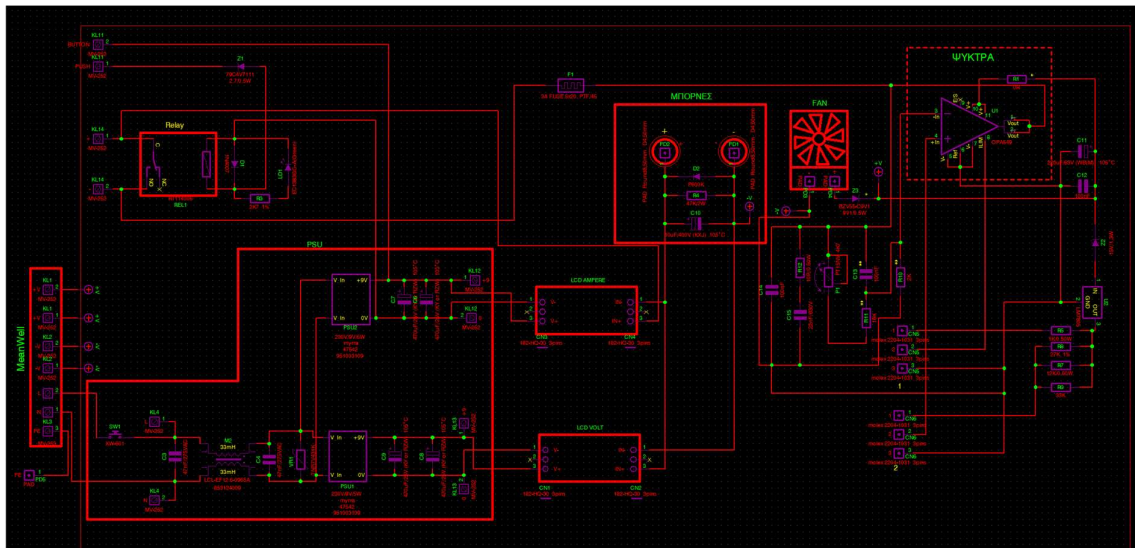
Κεφάλαιο 4ο: PCB, LPKF, Solid Works και 3D κατασκευή

4.1 Εισαγωγή

Μετά την ηλεκτρονική ανάλυση και τη σχεδίαση του κυκλώματος, το επόμενο στάδιο της εργασίας ήταν η μετατροπή του θεωρητικού σχεδίου σε πραγματική, λειτουργική κατασκευή. Η διαδικασία αυτή περιέλαβε την οριστικοποίηση του ηλεκτρονικού σχηματικού, τη σχεδίαση της πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος (PCB), την προετοιμασία των αρχείων κατεργασίας, την κατασκευή δοκιμαστικής πλακέτας σε επιτραπέζιο CNC LPKF και, παράλληλα, τη σχεδίαση του μηχανικού περιβλήματος και της πρόσοψης στο SolidWorks. Με τον τρόπο αυτό ελέγχθηκαν πριν από την τελική συναρμολόγηση τόσο η ηλεκτρική υλοποίηση όσο και η μηχανική συμβατότητα των επιμέρους τμημάτων.

Το κεφάλαιο επικεντρώνεται στη διαδικασία υλοποίησης και όχι στην επανάληψη της λειτουργίας των ηλεκτρονικών βαθμίδων, η οποία αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μετάβαση από το schematic στο PCB, στις απαιτήσεις που δημιουργεί ένα κύκλωμα ισχύος γύρω από τον OPA549, στη διαδικασία απομόνωσης των αγωγίων διαδρομών με CNC, στον έλεγχο της δοκιμαστικής πλακέτας και στη σχεδίαση ενός περιβλήματος κατάλληλου για εργαστηριακή χρήση.

4.2 Οριστικοποίηση ηλεκτρονικού σχηματικού στο Pulsonix



Σχήμα 4.1: Τελικό ηλεκτρονικό σχηματικό του battery simulator στο Pulsonix.

Η τελική ηλεκτρονική σχεδίαση πραγματοποιήθηκε στο Pulsonix. Στο schematic συγκεντρώθηκαν όλες οι λειτουργικές βαθμίδες της κατασκευής: η κύρια βαθμίδα ισχύος με τον OPA549, το κύκλωμα ρύθμισης τάσης και περιορισμού ρεύματος, το κύκλωμα του LM7805 για την τάση αναφοράς, η έξοδος προς τις μπόρνες, το relay ενεργοποίησης της εξόδου, η τροφοδοσία και προστασία του ανεμιστήρα, καθώς και η ανεξάρτητη βοηθητική τροφοδοσία των δύο οργάνων ICL7107.

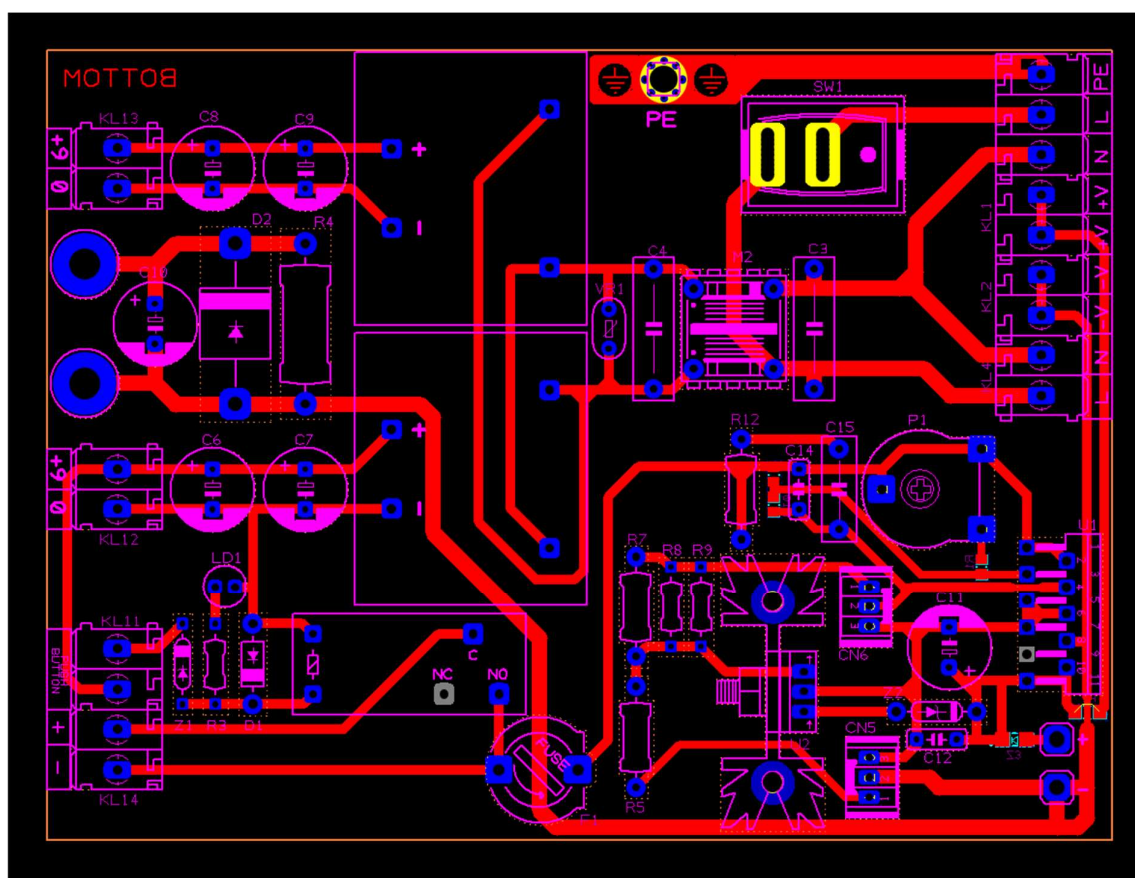
Η χρήση ενιαίου schematic έχει ιδιαίτερη σημασία επειδή το PCB δεν αποτελεί ανεξάρτητο σχέδιο. Οι ηλεκτρικές συνδέσεις του προκύπτουν από το netlist του κυκλώματος. Επομένως, πριν από τη δρομολόγηση των αγωγίων διαδρομών απαιτείται έλεγχος ότι κάθε ακροδέκτης εξαρτήματος, κλέμα και connector έχει αντιστοιχιστεί σωστά στο κατάλληλο footprint [15]. Στην παρούσα κατασκευή αυτό

είναι κρίσιμο για τους CN5 και CN6 των ποτενσιομέτρων, τις συνδέσεις του OPA549, τις γραμμές εξόδου υψηλού ρεύματος και τις συνδέσεις των βοηθητικών υποσυστημάτων.

4.3 Από το schematic στη σχεδίαση του PCB

Μετά την οριστικοποίηση του schematic ακολούθησε η τοποθέτηση των footprints και η δρομολόγηση της πλακέτας. Η διάταξη των εξαρτημάτων δεν επιλέχθηκε μόνο με κριτήριο τη γεωμετρική αξιοποίηση του διαθέσιμου χώρου. Σε κύκλωμα που διαχειρίζεται σημαντικά ρεύματα, η φυσική διαδρομή του ρεύματος πάνω στον χαλκό επηρεάζει την πτώση τάσης, τις απώλειες και τη θερμική συμπεριφορά. Για τον λόγο αυτό οι κύριες διαδρομές ισχύος σχεδιάζονται εμφανώς πλατύτερες από τις γραμμές σημάτων και ελέγχου.

Παράλληλα, απαιτείται λογικός διαχωρισμός των περιοχών ισχύος από των χαμηλότερης στάθμης γραμμών ελέγχου. Οι συνδέσεις γύρω από τον OPA549, το ILIM και το δίκτυο ανάδρασης πρέπει να διατηρούνται όσο γίνεται σαφείς και σύντομες, ενώ οι πυκνωτές αποσύζευξης πρέπει να βρίσκονται ηλεκτρικά κοντά στα σημεία που εξυπηρετούν. Η τελική εικόνα του PCB δείχνει μεγάλες αγωγίμες διαδρομές για τροφοδοσία και εξόδο και λεπτότερες διαδρομές στις περιοχές ελέγχου [15].



Σχήμα 4.2: Τελικό PCB layout στο Pulsonix, με τις κύριες διαδρομές ισχύος και τις περιοχές ελέγχου.

4.4 Σχεδιαστικές απαιτήσεις της πλακέτας ισχύος

Η πλακέτα δεν αντιμετωπίστηκε ως απλή πλακέτα χαμηλής ισχύος. Ο OPA549 μπορεί να οδηγήσει σημαντικό ρεύμα και, συνεπώς, οι διαδρομές μεταξύ τροφοδοσίας, ολοκληρωμένου, εξόδου και σημείων επιστροφής πρέπει να έχουν μικρή ωμική αντίσταση. Η αύξηση του πλάτους των διαδρομών

μειώνει την αντίσταση του χαλκού και κατά συνέπεια την πτώση τάσης $I \cdot R$ και τις απώλειες $I^2 \cdot R$. Η πρακτική αυτή είναι εμφανής στο layout, όπου οι γραμμές υψηλού ρεύματος έχουν σαφώς μεγαλύτερη διατομή από τις γραμμές ελέγχου.

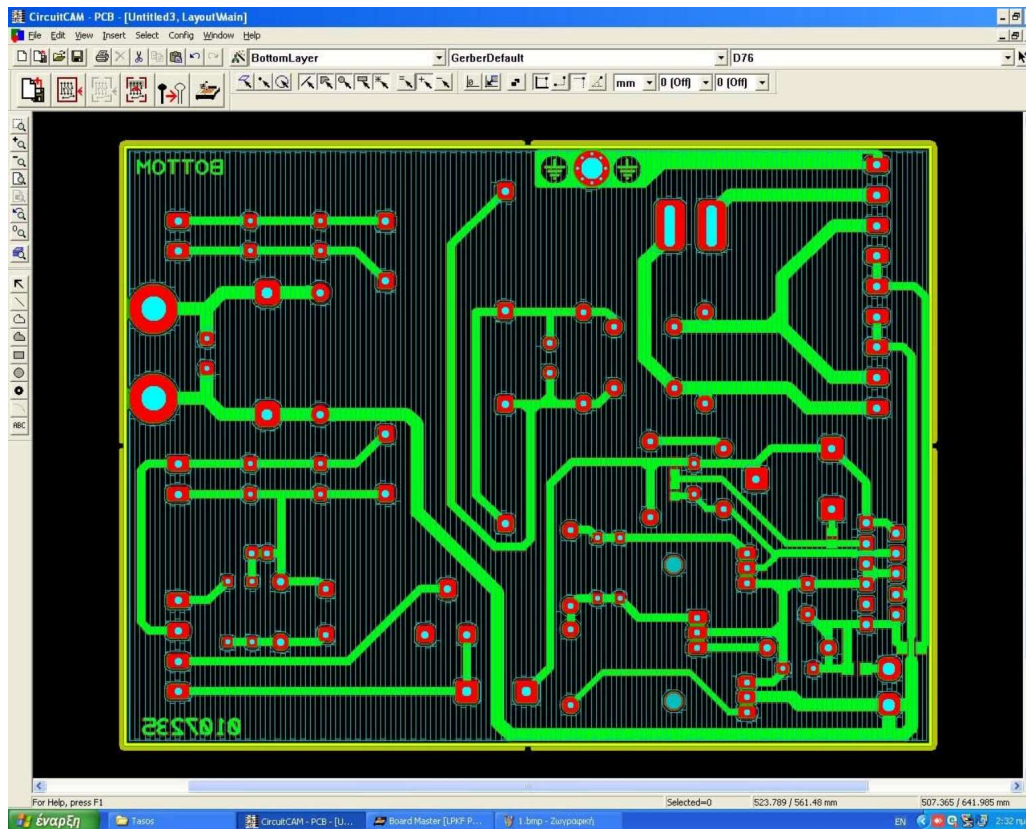
Εξίσου σημαντική είναι η γεωμετρία των επιστροφών. Ένα κύκλωμα ισχύος μπορεί να παρουσιάσει ανεπιθύμητες μεταβολές στη μετρούμενη τάση όταν ρεύματα μεγάλης έντασης μοιράζονται λεπτές επιστροφές με ευαίσθητα σημεία αναφοράς. Για τον λόγο αυτό, κατά τη σχεδίαση επιδιώχθηκε οι κύριες διαδρομές να είναι ευθείες και ευρείες όπου ήταν εφικτό, να αποφεύγονται περιττές στενώσεις και να υπάρχει σαφής σύνδεση των λειτουργικών περιοχών.

Η τελική αξιολόγηση μιας τέτοιας πλακέτας δεν εξαντλείται στο αν όλες οι συνδέσεις είναι ηλεκτρικά σωστές. Απαιτείται επίσης έλεγχος αποστάσεων, διαμέτρων οπών, θέσεων μηχανικής στήριξης, προσανατολισμού εξαρτημάτων και δυνατότητας πραγματικής συναρμολόγησης. Η δοκιμαστική κατασκευή με LPKF αποτέλεσε ακριβώς ένα ενδιάμεσο πρωτότυπο για την φανέρωση τέτοιων προβλημάτων πριν από την παραγγελία της τελικής πλακέτας.

4.5 Εξαγωγή κατασκευαστικών δεδομένων και προετοιμασία στο CircuitCAM

Μετά την ολοκλήρωση του PCB στο Pulsonix εξήχθησαν τα απαραίτητα κατασκευαστικά δεδομένα μέσω του output της εφαρμογής. Τα δεδομένα αυτά περιγράφουν τη γεωμετρία των αγωγίμων περιοχών, τις οπές και το περίγραμμα της πλακέτας. Για την κατασκευή σε LPKF δεν αρκεί η απλή εικόνα του PCB. Απαιτείται μετατροπή της σχεδίασης σε διαδρομές κατεργασίας, δηλαδή σε συγκεκριμένες κινήσεις που θα εκτελέσει το εργαλείο πάνω στο χαλκό και στο υπόστρωμα.

Η προετοιμασία πραγματοποιήθηκε στο CircuitCAM. Στο περιβάλλον αυτό εισάγονται τα δεδομένα της πλακέτας, αναγνωρίζονται τα διαφορετικά layers και παράγονται οι διαδρομές απομόνωσης γύρω από τους αγωγούς. Η βασική ιδέα της μηχανικής κατασκευής είναι διαφορετική από τη χημική αποχάλκωση, το μεγαλύτερο μέρος του χαλκού μπορεί να παραμένει πάνω στο laminate, ενώ το κοπτικό αφαιρεί επιλεκτικά λεπτές ζώνες χαλκού ώστε οι επιθυμητές νησίδες και διαδρομές να απομονωθούν ηλεκτρικά μεταξύ τους.

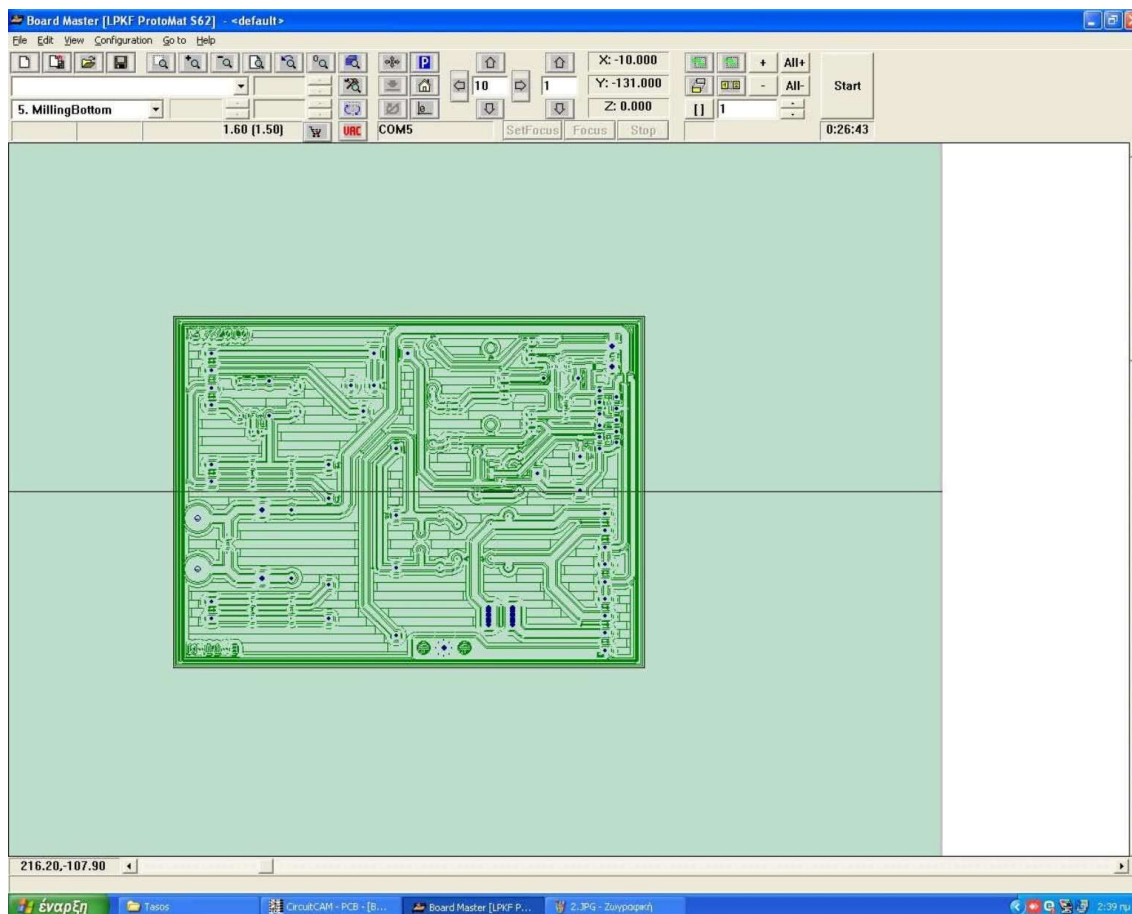


Σχήμα 4.3: Εισαγωγή και προετοιμασία του PCB στο CircuitCAM.

4.6 Μεταφορά του έργου και ρύθμιση του LPKF

Μετά την προετοιμασία των δεδομένων, το έργο μεταφέρθηκε στον υπολογιστή του συστήματος LPKF και φορτώθηκε στο λογισμικό BoardMaster. Πριν ξεκινήσει η κατεργασία απαιτείται σωστή τοποθέτηση και στερέωση του copper-clad laminate στην επιφάνεια εργασίας, ορισμός της περιοχής κατεργασίας και έλεγχος ότι το σχέδιο βρίσκεται εντός των πραγματικών ορίων του υλικού.

Η διαδικασία απαιτεί επίσης επιλογή του κατάλληλου εργαλείου/τρυπανιού για κάθε operation. Διαφορετική τιμή τρυπανιού μπορεί να χρησιμοποιείται για isolation milling, για διάτρηση και για τελική κοπή του περιγράμματος [16]. Η ακρίβεια στο ύψος του τρυπανιού είναι κρίσιμη, επειδή στην απομόνωση πρέπει να αφαιρεθεί ο χαλκός χωρίς υπερβολική αφαίρεση του μονωτικού υποστρώματος. Πολύ μικρό βάθος μπορεί να αφήσει ηλεκτρικές γέφυρες, ενώ υπερβολικό βάθος διευρύνει τις αυλακώσεις και καταπονεί το τρυπάνι.



Σχήμα 4.4: Υπολογισμένες περιοχές και διαδρομές απομόνωσης για την κατεργασία του χαλκού.

4.7 Διαδικασία χάραξης και απομόνωσης των αγωγίμων διαδρομών

Κατά το isolation milling, η κεφαλή του CNC ακολουθεί τις υπολογισμένες διαδρομές γύρω από τις περιοχές χαλκού που πρέπει να παραμείνουν ηλεκτρικά ενεργές. Το εργαλείο δεν «ζωγραφίζει» τις αγωγίμες γραμμές. Αντίθετα, αφαιρεί τον χαλκό γύρω από αυτές και δημιουργεί ένα μονωτικό κενό. Με αυτόν τον τρόπο σχηματίζονται οι διαδρομές, τα pads και οι μεγαλύτερες επιφάνειες χαλκού της πλακέτας [16].

Η κατεργασία οργανώνεται σε operations. Η ακριβής σειρά εξαρτάται από τη ρύθμιση του έργου και το συγκεκριμένο LPKF. Συνήθως προηγούνται οι εργασίες που πρέπει να γίνουν όσο η πλακέτα παραμένει πλήρως στερεωμένη στο αρχικό φύλλο, όπως isolation milling και drilling, ενώ η τελική αποκοπή του εξωτερικού περιγράμματος εκτελείται προς το τέλος ώστε το τεμάχιο να μη χάσει πρόωρα τη μηχανική του στήριξη. Επομένως, το κρίσιμο στοιχείο δεν είναι μία αυθαίρετη καθολική σειρά αλλά η σωστή εκτέλεση των operations που έχουν παραχθεί για το συγκεκριμένο PCB.

Στις φωτογραφίες της πραγματικής κατεργασίας διακρίνεται η κεφαλή του LPKF να κινείται πάνω από την πλακέτα και οι μονωτικές αυλακώσεις να εμφανίζονται σταδιακά γύρω από τις αγωγίμες περιοχές. Η διαδικασία αυτή επέτρεψε να παραχθεί σε σύντομο χρόνο ένα φυσικό prototype του PCB χωρίς να απαιτηθεί εξωτερική παραγγελία.

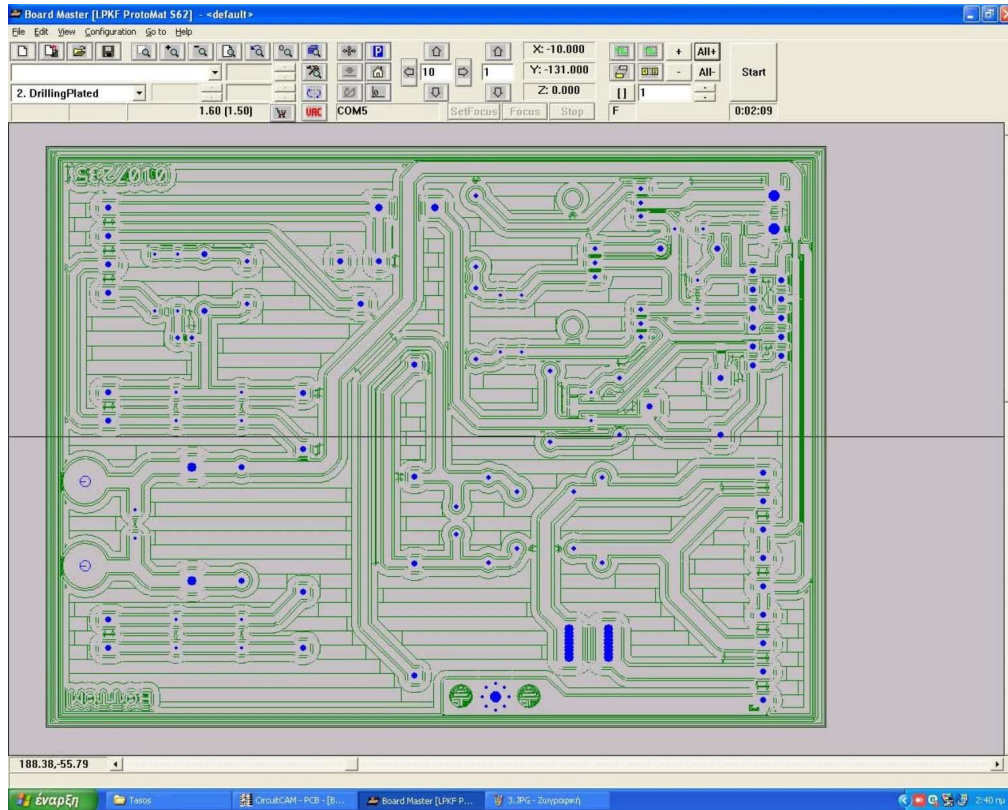


Σχήμα 4.5: Πραγματική διαδικασία *isolation milling* της πλακέτας στο LPKF.

4.8 Διάτρηση οπών και διαμόρφωση περιγράμματος

Μετά την απομόνωση, εκτελείται η διάτρηση των οπών που έχουν οριστεί από το PCB design. Οι οπές εξυπηρετούν ακροδέκτες *through-hole* εξαρτημάτων, *connectors*, κλέμες και σημεία μηχανικής

στήριξης. Στο BoardMaster οι θέσεις διάτρησης εμφανίζονται ως ξεχωριστό operation, γεγονός που επιτρέπει τη χρήση κατάλληλης διαμέτρου τρυπανιού και την αυτοματοποιημένη μετάβαση από οπή σε οπή.



Σχήμα 4.6: Operation διάτρησης των οπών της πλακέτας στο BoardMaster.

Η διαμόρφωση του εξωτερικού περιγράμματος αποτελεί το στάδιο στο οποίο η πλακέτα αποκτά τις τελικές μηχανικές διαστάσεις της. Πρακτικά είναι προτιμότερο η πλήρης αποκοπή να γίνεται αφού έχουν ολοκληρωθεί οι κύριες κατεργασίες της επιφάνειας, ώστε το τεμάχιο να παραμένει σταθερό. Μετά την κατεργασία απαιτείται καθαρισμός των υπολειμμάτων, απομάκρυνση γρεζιών και οπτικός έλεγχος για ανεπιθύμητες γέφυρες χαλκού ή περιοχές όπου η απομόνωση δεν είναι συνεχής.



Σχήμα 4.7: Το εργαστηριακό set up για την λειτουργία του μηχανήματος LPKF.

4.9 Ρόλος δοκιμαστικής πλακέτας πριν από την τελική παραγγελία

Η κατασκευή της πλακέτας στο LPKF δεν έγινε απλώς ως εναλλακτικός τρόπος παραγωγής. Χρησιμοποιήθηκε ως στάδιο επαλήθευσης πριν από την τελική παραγγελία PCB. Το φυσικό prototype επιτρέπει να ελεγχθούν στην πράξη οι διαστάσεις των footprints, οι αποστάσεις μεταξύ εξαρτημάτων, η θέση των connectors, η προσβασιμότητα των βιδωτών κλεμών, οι μηχανικές οπές και η δυνατότητα συναρμολόγησης των μεγαλύτερων εξαρτημάτων.

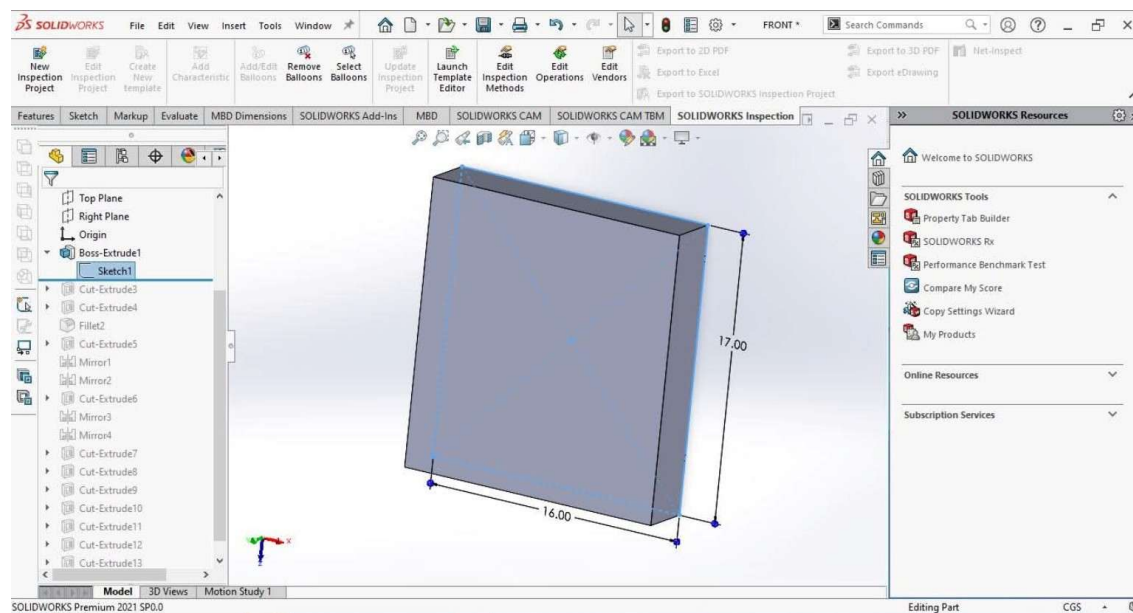
Επιπλέον, μπορεί να πραγματοποιηθεί continuity test με πολύμετρο μεταξύ σημείων που πρέπει να συνδέονται και έλεγχος μόνωσης μεταξύ γειτονικών nets. Για πλακέτα ισχύος είναι σκόπιμο να εξετάζονται ιδιαίτερα οι πλατιές διαδρομές, οι μεταβάσεις σε pads και τα σημεία στα οποία η γεωμετρία

στενεύει. Έτσι, τυχόν σχεδιαστική αστοχία μπορεί να διορθωθεί στο Pulsonix πριν μεταφερθεί στην τελική παραγωγή.

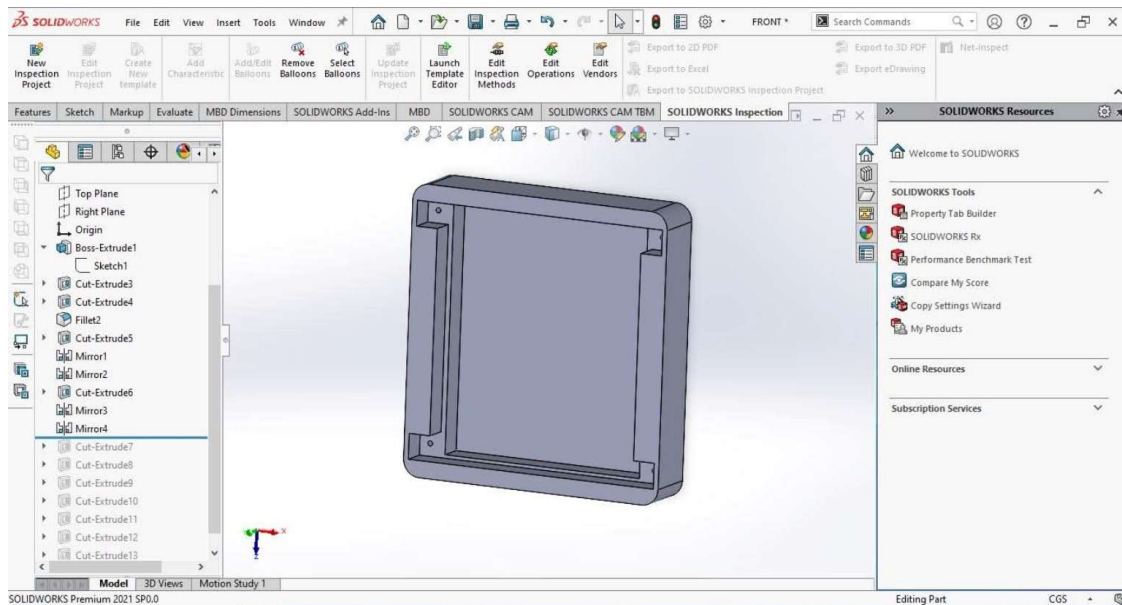
4.10 Σχεδίαση μηχανικού περιβλήματος στο SolidWorks

Παράλληλα με την ηλεκτρονική υλοποίηση σχεδιάστηκε στο SolidWorks το μηχανικό περίβλημα του battery simulator. Η σχεδίαση του enclosure αντιμετωπίστηκε ως μέρος της λειτουργικότητας και όχι ως διακοσμητικό στοιχείο. Έπρεπε να προβλεφθεί χώρος για την κύρια πλακέτα, την τροφοδοσία, τα δύο όργανα ένδειξης, τα ποτενσιόμετρα ρύθμισης, το push button ενεργοποίησης της εξόδου, τις μπόρνες, τον ανεμιστήρα και τα υπόλοιπα στοιχεία συναρμολόγησης.

Αρχικά δημιουργήθηκε η βασική γεωμετρία του εμπρόσθιου τμήματος και καθορίστηκαν οι εξωτερικές διαστάσεις. Στη συνέχεια προστέθηκαν εσωτερικά χαρακτηριστικά στήριξης και διαμορφώθηκαν τα ανοίγματα της πρόσοψης. Η παραμετρική λογική του SolidWorks διευκολύνει τέτοιες αλλαγές, επειδή οι διαστάσεις των cut-outs μπορούν να προσαρμοστούν όταν προκύψει αλλαγή σε κάποιο πραγματικό εξάρτημα.



Σχήμα 4.8: Αρχική γεωμετρία της πρόσοψης στο SolidWorks.

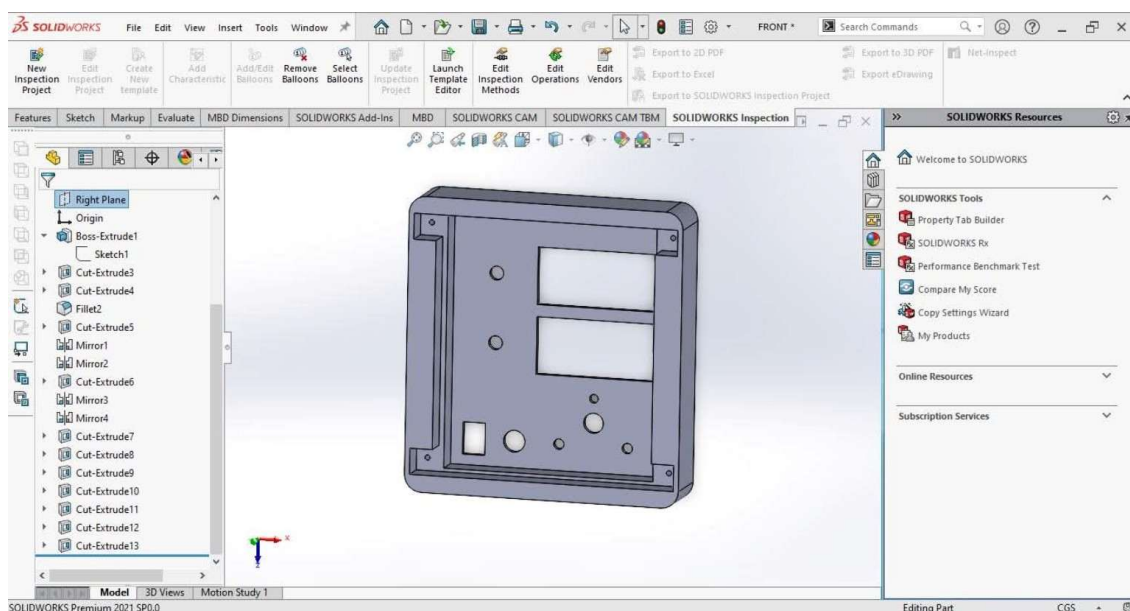


Σχήμα 4.9: Εσωτερική διαμόρφωση και στοιχεία μηχανικής στήριξης.

4.11 Σχεδίαση της πρόσοψης και εργονομία χειρισμού

Η πρόσοψη αποτελεί το κύριο σημείο αλληλεπίδρασης του χρήστη με τη συσκευή. Για τον λόγο αυτό σχεδιάστηκαν ξεχωριστά ανοίγματα για τα δύο panel meters, τα χειριστήρια ρύθμισης τάσης και ρεύματος, το push button και τις ηλεκτρικές συνδέσεις. Η θέση κάθε στοιχείου πρέπει να εξυπηρετεί τόσο τη μηχανική τοποθέτηση όσο και την εύκολη αναγνώρισή του κατά τη χρήση.

Τα δύο ορθογώνια ανοίγματα αντιστοιχούν στα όργανα ένδειξης τάσης και ρεύματος. Οι κυκλικές οπές χρησιμοποιούνται για τα ποτενσιόμετρα και τις μπόρνες, ενώ προβλέπονται επίσης οπές στερέωσης. Η σχεδίαση της πρόσοψης στο SolidWorks πριν από την κατασκευή μειώνει τον κίνδυνο ασυμβατότητας μεταξύ των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και του κελύφους και επιτρέπει να αξιολογηθεί ο διαθέσιμος χώρος πριν γίνει η τρισδιάστατη εκτύπωση.

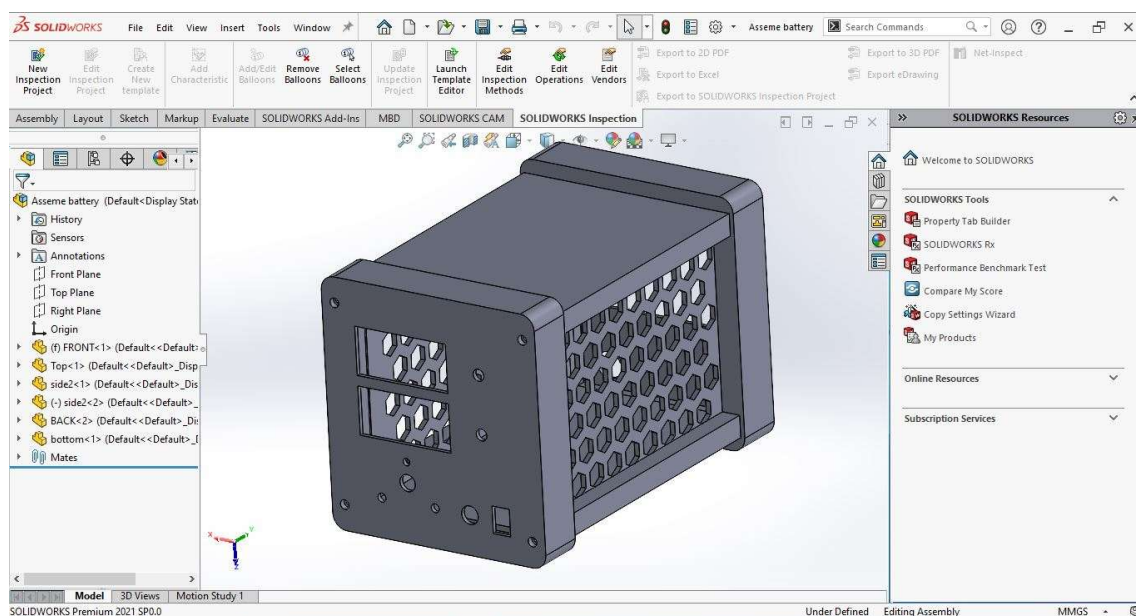


Σχήμα 4.10: Διαμόρφωση της πρόσοψης με ανοίγματα για όργανα, χειριστήρια και συνδέσεις.

4.12 Τελικό assembly και αερισμός της κατασκευής

Μετά τη σχεδίαση των επιμέρους τμημάτων δημιουργήθηκε assembly στο SolidWorks, ώστε να ελεγχθεί η συνολική γεωμετρία του περιβλήματος. Το τελικό μοντέλο δείχνει την πρόσοψη, τα πλευρικά τμήματα και τις επιφάνειες με ανοίγματα αερισμού. Ο αερισμός είναι ουσιαστικός επειδή η κεντρική βαθμίδα με τον OPA549 μπορεί να αναπτύξει σημαντική θερμική ισχύ, ιδιαίτερα όταν υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ της τάσης τροφοδοσίας και της τάσης εξόδου ή όταν η συσκευή απορροφά ρεύμα.

Τα πλευρικά ανοίγματα αυξάνουν τη διαθέσιμη επιφάνεια διέλευσης αέρα και συνεργάζονται με τον ανεμιστήρα της κατασκευής. Η ύπαρξη ελεγχόμενης ροής αέρα δεν αντικαθιστά την ψύκτρα του OPA549, αλλά συμβάλλει στην απομάκρυνση θερμού αέρα από το εσωτερικό του enclosure και στη μείωση της θερμοκρασίας των γειτονικών εξαρτημάτων. Το τελικό assembly αποτέλεσε επομένως έλεγχο τόσο αισθητικής και εργονομίας όσο και βασικής θερμικής και μηχανικής οργάνωσης.



Σχήμα 4.11: Τελικό assembly του περιβλήματος στο SolidWorks με πλευρικά ανοίγματα αερισμού.

4.13 Τρισδιάστατη εκτύπωση και προετοιμασία για συναρμολόγηση

Μετά την ολοκλήρωση του CAD μοντέλου, τα κατάλληλα τμήματα του περιβλήματος προετοιμάστηκαν για τρισδιάστατη εκτύπωση. Η 3D εκτύπωση επιλέχθηκε επειδή επιτρέπει την παραγωγή εξατομικευμένων μηχανικών τμημάτων χωρίς ειδικά καλούπια και διευκολύνει τις επαναλήψεις της σχεδίασης. Σε πρωτότυπη εργαστηριακή συσκευή αυτό αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα καθώς εάν ένα άνοιγμα, μία θέση βίδας ή μία εσωτερική βάση χρειάζεται μεταβολή, το CAD μοντέλο μπορεί να διορθωθεί και να παραχθεί νέα έκδοση.

Πριν από την τελική συναρμολόγηση πρέπει να ελέγχονται η εφαρμογή των panel meters, των ποτενσιομέτρων και των μπόρνων, η πρόσβαση στα σημεία σύνδεσης, η δυνατότητα διέλευσης καλωδίων και η απόσταση από θερμά ή υψηλής τάσης τμήματα. Επειδή στο ίδιο enclosure συνυπάρχουν τροφοδοσία δικτύου, βοηθητική τροφοδοσία, κύκλωμα ισχύος και στοιχεία χειρισμού, η μηχανική διάταξη οφείλει να διατηρεί σαφή και ασφαλή οργάνωση των επιμέρους περιοχών.

4.14 Συνολική ροή υλοποίησης

Η συνολική διαδικασία κατασκευής μπορεί να συνοψιστεί ως μία αλληλουχία επαναληπτικών βημάτων: οριστικοποίηση schematic στο Pulsonix, αντιστοίχιση footprints, τοποθέτηση εξαρτημάτων και routing, εξαγωγή κατασκευαστικών δεδομένων, προετοιμασία των operations στο CircuitCAM, μεταφορά στο LPKF/BoardMaster, isolation milling, drilling και τελική μηχανική διαμόρφωση, οπτικός και ηλεκτρικός έλεγχος της δοκιμαστικής πλακέτας και, παράλληλα, σχεδίαση και έλεγχος του enclosure στο SolidWorks. Η διαδικασία δεν είναι απολύτως γραμμική. Τα αποτελέσματα της φυσικής κατασκευής μπορούν να οδηγήσουν σε επιστροφή στο CAD ή στο PCB design για διορθώσεις.

Αυτή η επαναληπτική προσέγγιση αποτελεί σημαντικό μέρος της ανάπτυξης ηλεκτρονικού πρωτοτύπου. Το schematic αποδεικνύει τη λογική σύνδεση, το PCB μετατρέπει τη λογική σε φυσική γεωμετρία, το LPKF αποκαλύπτει πραγματικά κατασκευαστικά ζητήματα και το SolidWorks επιβεβαιώνει ότι η ηλεκτρονική διάταξη μπορεί να ενσωματωθεί σε λειτουργικό μηχανικό σύνολο. Η συνδυασμένη χρήση των εργαλείων αυτών μείωσε τον κίνδυνο να μεταφερθεί ένα μη εντοπισμένο σχεδιαστικό πρόβλημα στην τελική κατασκευή.

4.15 Συμπεράσματα κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε η μετάβαση από το ηλεκτρονικό σχέδιο στη φυσική υλοποίηση του battery simulator. Η σχεδίαση του PCB στο Pulsonix, η προετοιμασία των κατασκευαστικών δεδομένων στο CircuitCAM και η κατεργασία σε LPKF επέτρεψαν την παραγωγή δοκιμαστικής πλακέτας και τον έλεγχο του layout πριν από την τελική παραγγελία. Παράλληλα, η σχεδίαση του enclosure στο SolidWorks και η τρισδιάστατη εκτύπωση έδωσαν τη δυνατότητα να εξεταστούν έγκαιρα η τοποθέτηση των οργάνων, η εργονομία της πρόσοψης, ο αερισμός και η συνολική συναρμογή της συσκευής.

Το αποτέλεσμα του σταδίου αυτού είναι ένα ολοκληρωμένο κατασκευαστικό υπόβαθρο για την τελική συναρμολόγηση και τις πειραματικές δοκιμές. Οι δοκιμές λειτουργίας, οι μετρήσεις και η αξιολόγηση της συμπεριφοράς της συσκευής αποτελούν διακριτό επόμενο στάδιο και μπορούν να παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο, χωρίς να επαναλαμβάνεται η σχεδιαστική ανάλυση των προηγούμενων ενότητων.

Κεφάλαιο 5ο: Πειραματικές δοκιμές και αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στον κατασκευασμένο προσομοιωτή μπαταρίας, με σκοπό την αρχική αξιολόγηση της συμπεριφοράς της εξόδου του τόσο σε λειτουργία χωρίς φορτίο όσο και υπό ωμικό φορτίο. Επιπλέον, εξετάζεται η αμφίδρομη ανταλλαγή ισχύος μεταξύ του προσομοιωτή και πραγματικής μπαταρίας, χαρακτηριστικό ιδιαίτερα σημαντικό για τη λειτουργία της διάταξης ως προσομοιωτή πηγής και φορτίου.

Για την παρατήρηση της τάσης εξόδου χρησιμοποιήθηκε παλμογράφος, ο οποίος συνδέθηκε απευθείας στις εξωτερικές μπάρες/μπόρνες εξόδου του προσομοιωτή μπαταρίας. Με τον τρόπο αυτό ήταν δυνατή τόσο η παρατήρηση του θορύβου και των μικρών διακυμάνσεων της συνεχούς τάσης σε μόνιμη κατάσταση όσο και η καταγραφή της μεταβατικής συμπεριφοράς κατά τη σύνδεση φορτίου.

Ως ωμικό φορτίο χρησιμοποιήθηκε αντίσταση $10\Omega / 10W$. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν αρχικά για ονομαστική ρύθμιση εξόδου 10V και στη συνέχεια επαναλήφθηκαν για 20V. Για κάθε επίπεδο τάσης καταγράφηκε η συμπεριφορά χωρίς φορτίο, η συμπεριφορά με συνδεδεμένη αντίσταση και η στιγμιαία μεταβολή κατά τη στιγμή σύνδεσης του φορτίου.



Σχήμα 5.1: Πειραματική συνδεσμολογία παλμογράφου, ωμικού φορτίου και μπαταρίας στην έξοδο του προσομοιωτή.

5.1 Δοκιμή εξόδου με ρύθμιση στα 10V

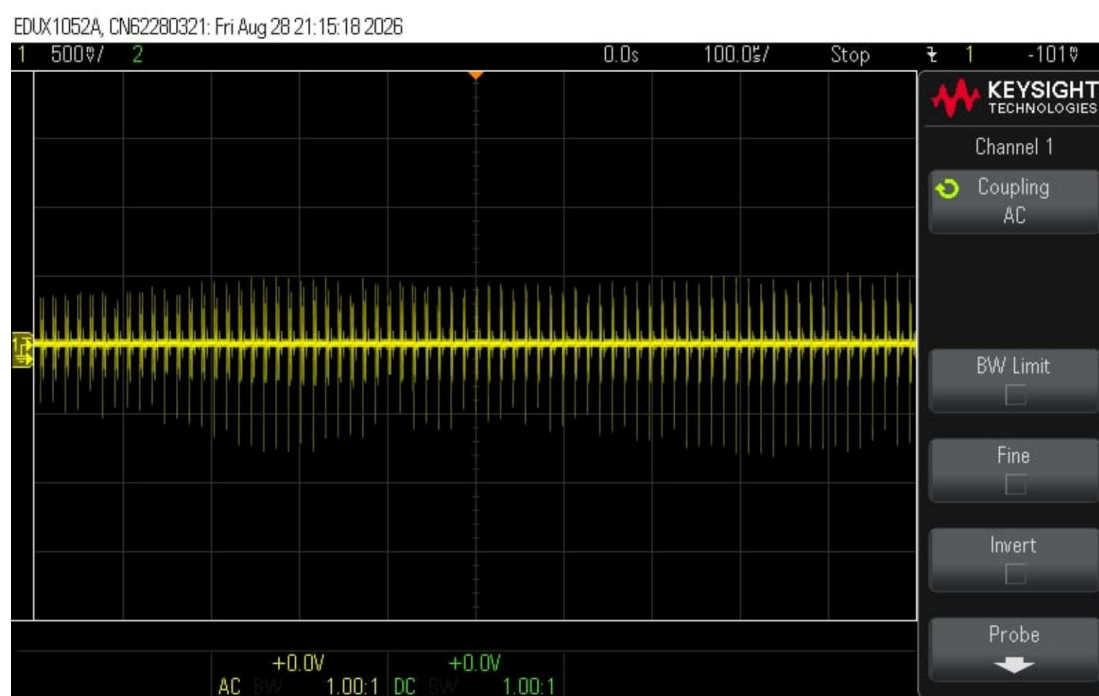
Για την παρατήρηση της τάσης εξόδου χρησιμοποιήθηκε παλμογράφος, ο οποίος συνδέθηκε απευθείας στις εξωτερικές μπάρες/μπόρνες εξόδου του προσομοιωτή μπαταρίας. Με τον τρόπο αυτό ήταν δυνατή

τόσο η παρατήρηση του θορύβου και των μικρών διακυμάνσεων της συνεχούς τάσης σε μόνιμη κατάσταση όσο και η καταγραφή της μεταβατικής συμπεριφοράς κατά τη σύνδεση φορτίου.

Ως ωμικό φορτίο χρησιμοποιήθηκε αντίσταση $10\Omega / 10W$. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν αρχικά για ονομαστική ρύθμιση εξόδου 10V και στη συνέχεια επαναλήφθηκαν για 20V. Για κάθε επίπεδο τάσης καταγράφηκε η συμπεριφορά χωρίς φορτίο, η συμπεριφορά με συνδεδεμένη αντίσταση και η στιγμιαία μεταβολή κατά τη στιγμή σύνδεσης του φορτίου.

5.1.1 Λειτουργία χωρίς φορτίο

Αρχικά η έξοδος του προσομοιωτή ρυθμίστηκε στα 10V χωρίς να είναι συνδεδεμένο εξωτερικό φορτίο. Στην κατάσταση αυτή καταγράφηκε με τον παλμογράφο η κυματομορφή της εξόδου, ώστε να παρατηρηθεί ο θόρυβος που υπερτίθεται στη συνεχή τάση. Η συγκεκριμένη μέτρηση αποτελεί τη βασική κατάσταση αναφοράς, καθώς επιτρέπει τη σύγκριση με τη λειτουργία υπό φορτίο.

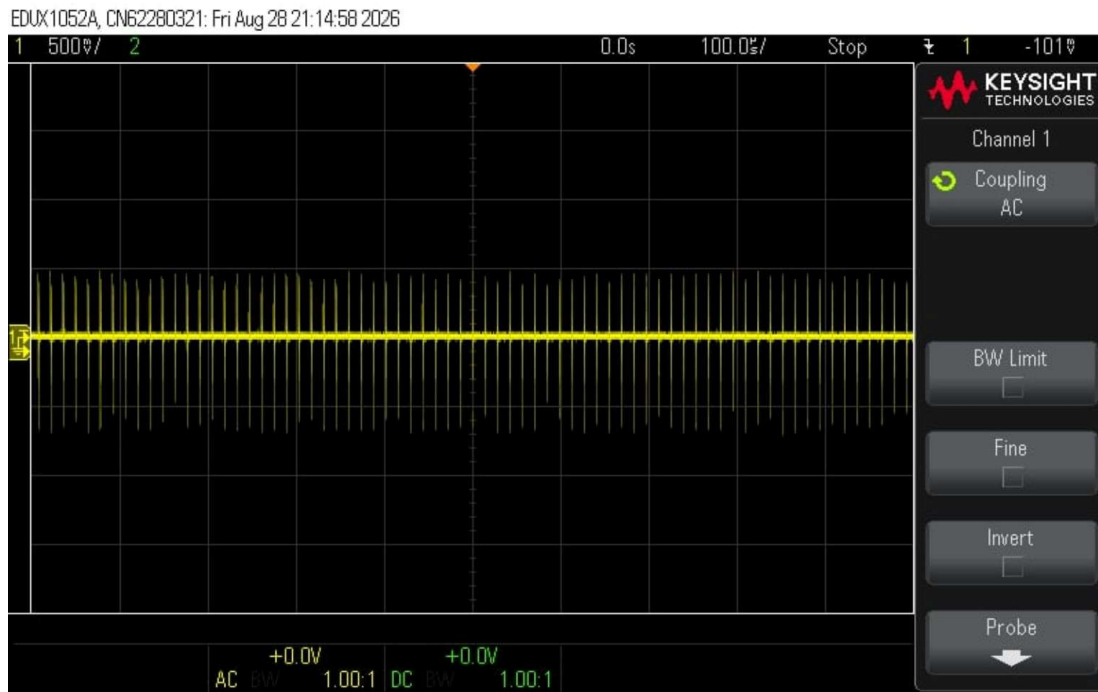


Σχήμα 5.2: Θόρυβος εξόδου του προσομοιωτή στα 10V χωρίς φορτίο.

5.1.2 Λειτουργία με ωμικό φορτίο $10\Omega / 10W$

Στη συνέχεια συνδέθηκε στην έξοδο αντίσταση $10\Omega / 10W$. Μετά τη σύνδεση του φορτίου η μετρούμενη τάση εξόδου μειώθηκε από 10,00 V σε περίπου 9,62V. Η μεταβολή αντιστοιχεί σε πτώση 0,38V, δηλαδή περίπου 3,8% ως προς την αρχική ρύθμιση χωρίς φορτίο.

Η κυματομορφή της εξόδου υπό αυτή τη συνθήκη καταγράφηκε στο σχήμα 5.3. Η μέτρηση επιτρέπει να συγκριθεί ο θόρυβος της εξόδου πριν και μετά την εφαρμογή φορτίου και ταυτόχρονα να αξιολογηθεί η ικανότητα της βαθμίδας ισχύος να διατηρεί την επιλεγμένη τάση όταν απαιτείται παροχή ρεύματος.

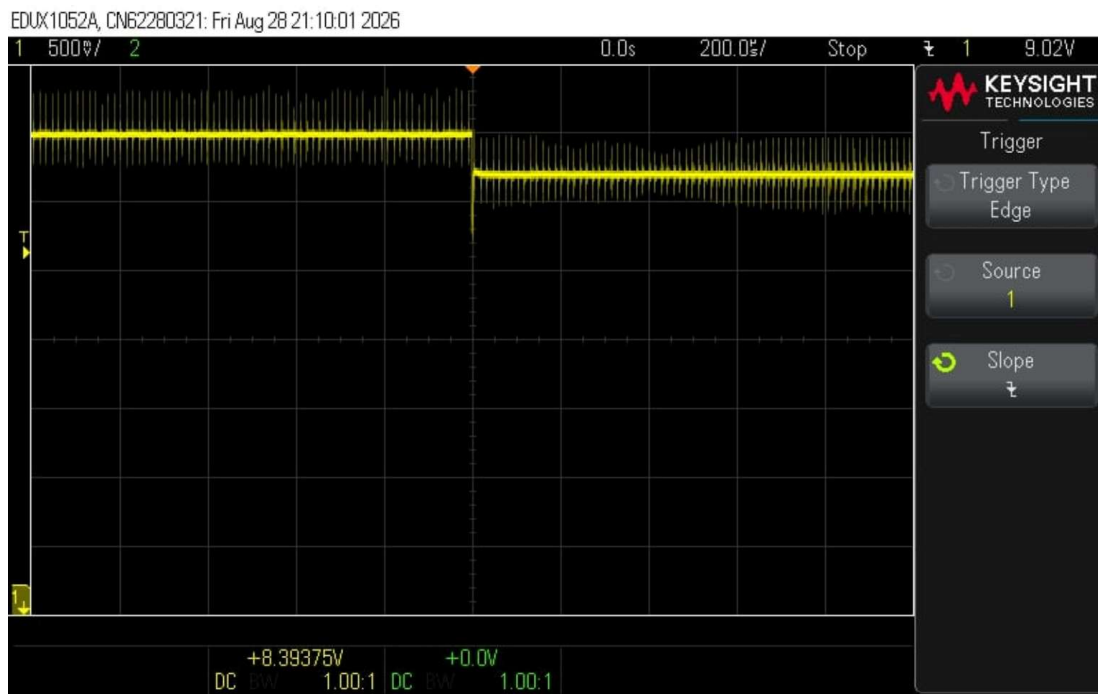


Σχήμα 5.3: Κυματομορφή εξόδου στα 10V με συνδεδεμένο φορτίο 10Ω / 10W.

5.1.3 Μεταβατική απόκριση κατά την σύνδεση φορτίου

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η στιγμή κατά την οποία η αντίσταση συνδέεται στην έξοδο. Στο σχήμα 5.4 αποτυπώνεται η απότομη βύθιση της τάσης που προκαλείται από τη στιγμιαία μεταβολή του φορτίου. Μετά το μεταβατικό φαινόμενο, η έξοδος ανακάμπτει και σταθεροποιείται εκ νέου κοντά στα 9,62V.

Η συμπεριφορά αυτή είναι αναμενόμενη σε μία πραγματική βαθμίδα τροφοδοσίας, καθώς η απότομη αύξηση του απαιτούμενου ρεύματος δεν μπορεί να αντισταθμιστεί ακαριαία από τον βρόχο ελέγχου. Η καταγραφή είναι χρήσιμη επειδή δείχνει όχι μόνο τη στατική πτώση τάσης υπό φορτίο αλλά και τη δυναμική απόκριση της κατασκευής σε μία απότομη μεταβολή των συνθηκών λειτουργίας.

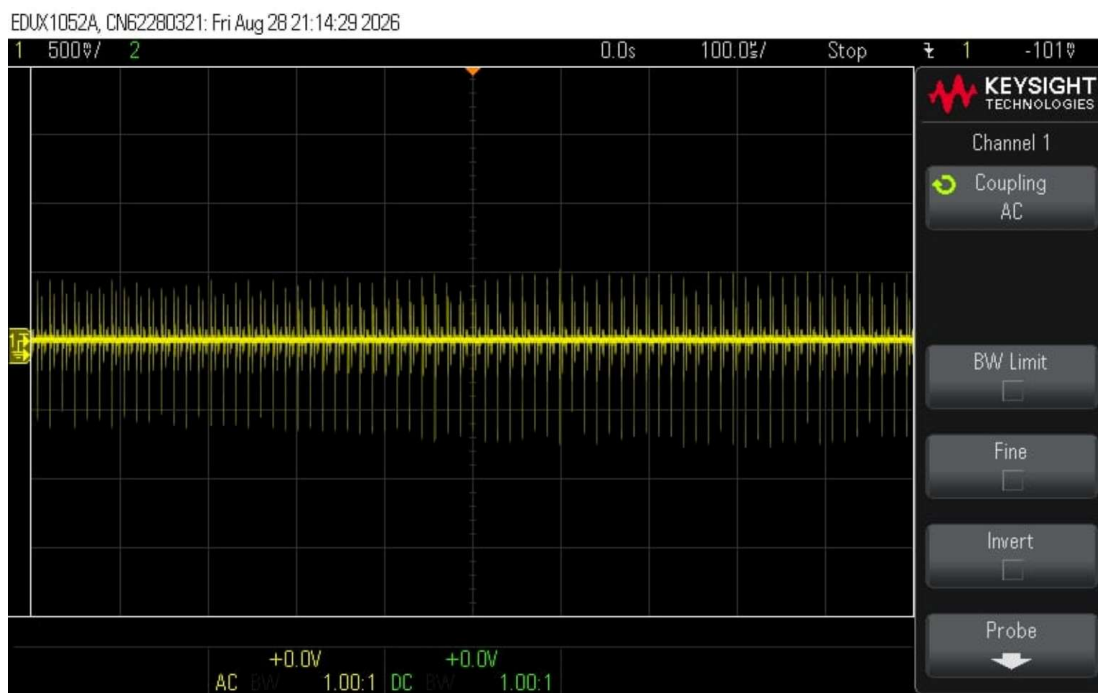


Σχήμα 5.4: Μεταβατική βύθιση της τάσης κατά τη σύνδεση του φορτίου στα 10V.

5.2 Δοκιμή εξόδου με ρύθμιση στα 20V

Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε με την έξοδο του προσομοιωτή ρυθμισμένη στα 20V. Αρχικά πραγματοποιήθηκε καταγραφή χωρίς συνδεδεμένο φορτίο. Στο σχήμα 5.5 αποτυπώνεται ο θόρυβος της εξόδου στη συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας.

5.2.1 Λειτουργία χωρίς φορτίο

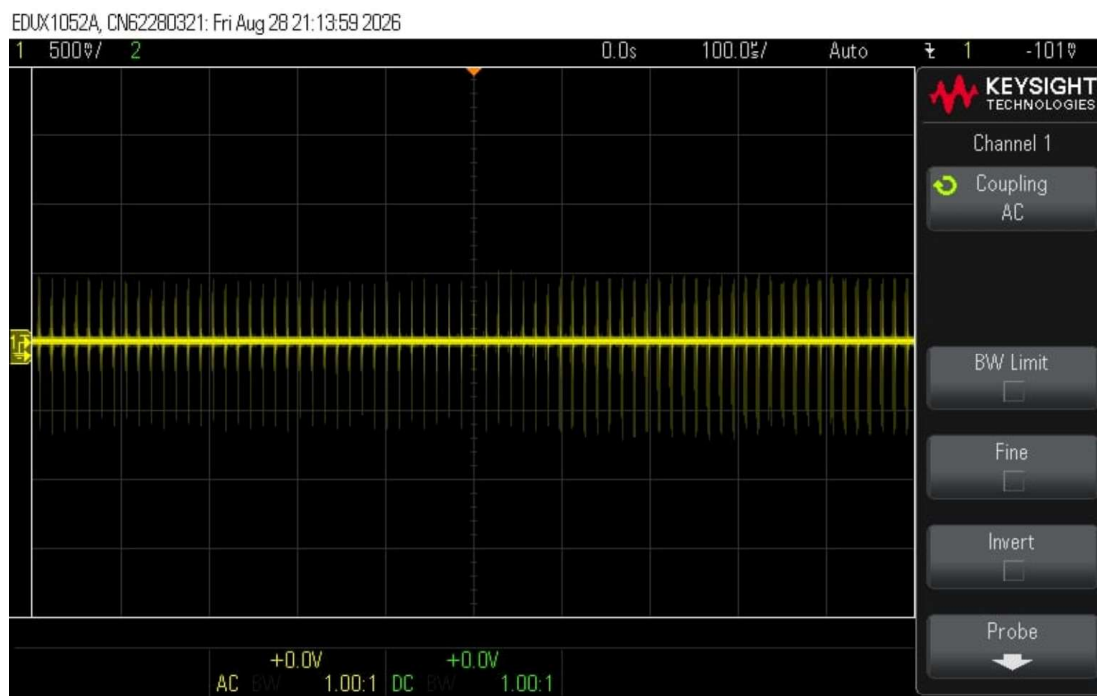


Σχήμα 5.5: Θόρυβος εξόδου του προσομοιωτή στα 20V χωρίς φορτίο.

5.2.2 Λειτουργία με ωμικό φορτίο

Με την προσθήκη του ίδιου ωμικού φορτίου στην έξοδο, η τάση μειώθηκε από 20,00V σε περίπου 19,32V. Η πτώση ήταν επομένως 0,68V, δηλαδή περίπου 3,4% της αρχικής τιμής. Η κυματομορφή υπό φορτίο καταγράφηκε στο σχήμα 5.6.

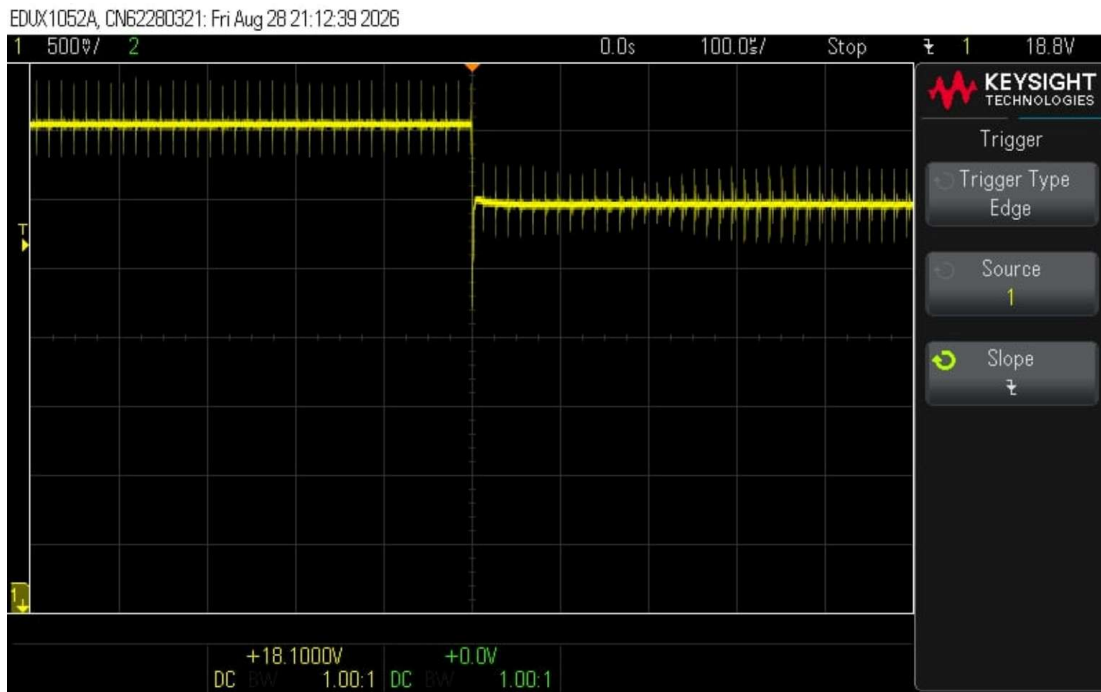
Παρατηρείται ότι και στη δεύτερη περιοχή λειτουργίας η έξοδος παρουσιάζει περιορισμένη πτώση τάσης μετά την εφαρμογή του φορτίου. Η σύγκριση των δύο δοκιμών δείχνει παρόμοια σχετική μεταβολή: περίπου 3,8% στα 10V και 3,4% στα 20V. Τα αποτελέσματα αυτά περιγράφουν τη συμπεριφορά της συγκεκριμένης κατασκευής στις συγκεκριμένες πειραματικές συνθήκες και δεν αποτελούν γενική προδιαγραφή του OPA549.



Σχήμα 5.6: Κυματομορφή εξόδου στα 20V με συνδεδεμένο φορτίο.

5.2.3 Μεταβατική απόκριση στα 20V

Στο σχήμα 5.7 μέσω του παλμογράφου καταγράφηκε η στιγμή σύνδεσης της αντίστασης όταν η έξοδος ήταν ρυθμισμένη στα 20V. Όπως και στην προηγούμενη δοκιμή, εμφανίζεται στιγμιαία βύθιση της τάσης και στη συνέχεια ανάκαμψη προς τη νέα τιμή μόνιμης κατάστασης, περίπου 19,32V. Η επανάληψη του ίδιου φαινομένου σε διαφορετικό επίπεδο τάσης επιβεβαιώνει ότι η απότομη εφαρμογή του φορτίου προκαλεί μία σύντομη μεταβατική απόκριση πριν από την αποκατάσταση της εξόδου.



Σχήμα 5.7: Μεταβατική βύθιση της τάσης κατά τη σύνδεση του φορτίου στα 20V.

5.3 Συγκριτική αξιολόγηση των δοκιμών 10V και 20V

Πίνακας 5.1 – Σύγκριση της τάσης εξόδου πριν και μετά τη σύνδεση του ωμικού φορτίου.

Ρύθμιση χωρίς φορτίο	Τάση με φορτίο	Πτώση τάσης	Σχετική πτώση	Φορτίο
10,00V	9,62V	0,38V	3,8%	10Ω / 10W
20,00V	19,32V	0,68V	3,4%	10Ω / 10W

Από τις δύο μετρήσεις προκύπτει ότι η σύνδεση του φορτίου προκαλεί μετρήσιμη αλλά σχετικά μικρή πτώση της τάσης εξόδου. Παράλληλα, οι καταγραφές του παλμογράφου παρέχουν πληροφορία που δεν μπορεί να προκύψει από μία απλή μέτρηση συνεχούς τάσης, καθώς αποτυπώνουν τόσο τον θόρυβο της εξόδου όσο και το σύντομο μεταβατικό φαινόμενο κατά τη σύνδεση του φορτίου.

5.4 Δοκιμή αμφίδρομης λειτουργίας με πραγματική μπαταρία

Για την περαιτέρω διερεύνηση της λειτουργίας του προσομοιωτή πραγματοποιήθηκε δεύτερο πείραμα, στο οποίο στην έξοδο συνδέθηκαν η αντίσταση και μία μπαταρία ονομαστικής τάσης περίπου 6,4V. Σκοπός ήταν να παρατηρηθεί η κατεύθυνση του ρεύματος καθώς η ρυθμιζόμενη τάση του προσομοιωτή μεταβαλλόταν από τιμές υψηλότερες από την τάση της μπαταρίας προς χαμηλότερες.

Όταν η τάση του προσομοιωτή ήταν υψηλότερη από την τάση της μπαταρίας, το μετρούμενο ρεύμα είχε θετικό πρόσημο. Στη συγκεκριμένη συνδεσμολογία αυτό αντιστοιχεί σε παροχή ρεύματος από τον προσομοιωτή προς την πλευρά της μπαταρίας, δηλαδή σε κατάσταση φόρτισης. Καθώς η ρυθμιζόμενη τάση μειωνόταν, μειωνόταν αντίστοιχα και το ρεύμα.

Όταν η τάση ρύθμισης μειώθηκε κάτω από την τάση της μπαταρίας, το πρόσημο του ρεύματος αντιστράφηκε. Η αρνητική ένδειξη δηλώνει αντιστροφή της φοράς του ρεύματος: πλέον η πραγματική μπαταρία παρέχει ενέργεια προς τη διάταξη και ο προσομοιωτής λειτουργεί από την πλευρά της εξόδου

ως αποδέκτης ρεύματος. Η μετάβαση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον χαρακτήρα της κατασκευής ως battery simulator, καθώς καταδεικνύει πειραματικά ότι η έξοδος μπορεί να συμμετέχει σε δύο διαφορετικές καταστάσεις ανταλλαγής ισχύος.

5.4.1 Πειραματικά δεδομένα

Πίνακας 5.2: Μετρήσεις τάσης μπαταρίας και ρεύματος για διαφορετικές ρυθμίσεις του προσομοιωτή.

V Battery Simulator (V)	V μπαταρίας (V)	Ρεύμα (A)	Κατεύθυνση ρεύματος
10	6,40	+0,320	Προσομοιωτής → μπαταρία
9	6,40	+0,220	Προσομοιωτής → μπαταρία
8	6,38	+0,135	Προσομοιωτής → μπαταρία
7	6,36	+0,062	Προσομοιωτής → μπαταρία
6	6,32	-0,030	Μπαταρία → προσομοιωτής
5	6,30	-0,115	Μπαταρία → προσομοιωτής
4	6,26	-0,202	Μπαταρία → προσομοιωτής
3	6,23	-0,283	Μπαταρία → προσομοιωτής
2	6,20	-0,377	Μπαταρία → προσομοιωτής

5.4.2 Ερμηνεία της αλλαγής πολικότητας του ρεύματος

Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν σαφή μεταβολή της κατεύθυνσης του ρεύματος μεταξύ των 7V και 6V της ρύθμισης του προσομοιωτή. Στα 7V καταγράφηκε θετικό ρεύμα +0,062A, ενώ στα 6V καταγράφηκε αρνητικό ρεύμα -0,030A. Επομένως, με βάση τα διαθέσιμα διακριτά σημεία μέτρησης, η περιοχή αντιστροφής βρίσκεται ανάμεσα σε αυτές τις δύο ρυθμίσεις. Δεν είναι δυνατό από τις συγκεκριμένες μετρήσεις να προσδιοριστεί ακριβώς το σημείο μηδενικού ρεύματος χωρίς πυκνότερη δειγματοληψία στην περιοχή.

Παράλληλα, καθώς η τάση του προσομοιωτή μειώνεται περαιτέρω, αυξάνεται το μέτρο του αρνητικού ρεύματος: από -0,030A στα 6 V σε -0,377A στα 2V. Η τάση της πραγματικής μπαταρίας παρουσιάζει επίσης σταδιακή μείωση από περίπου 6,40V σε 6,20V κατά τη διάρκεια των καταγεγραμμένων σημείων. Οι παρατηρήσεις αυτές συμφωνούν με τη μεταβολή της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των δύο πλευρών της πειραματικής συνδεσμολογίας.

5.5 Θερμική αξιολόγηση της βαθμίδας OPA549

Για την πειραματική αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς της βαθμίδας ισχύος πραγματοποιήθηκε δοκιμή με πραγματική μπαταρία τάσης 12,48V, ικανή να παρέχει ρεύμα έως 7A. Ο προσομοιωτής

μπαταρίας ρυθμίστηκε σταθερά στα 11,00V, δηλαδή σε τάση χαμηλότερη από την τάση της συνδεδεμένης μπαταρίας. Με αυτή τη συνθήκη η ροή του ρεύματος πραγματοποιούνταν από την πραγματική μπαταρία προς τον προσομοιωτή και η βαθμίδα OPA549 λειτουργούσε σε κατάσταση απορρόφησης ρεύματος (sink operation).

Η τιμή του ρεύματος ρυθμιζόταν μέσω του current limit διαδοχικά στα 1A, 2A, 3A, 4A και 5A. Για κάθε σημείο λειτουργίας διατηρούνταν η ίδια συνδεσμολογία και η ίδια ρύθμιση τάσης. Μετά από κάθε αλλαγή του ορίου ρεύματος η διάταξη παρέμενε σε λειτουργία για περίπου 5 λεπτά, ώστε η θερμοκρασία να προσεγγίσει μια σταθεροποιημένη κατάσταση, και στη συνέχεια πραγματοποιούνταν θερμογραφική καταγραφή.

5.5.1 Πειραματική διαδικασία και θερμογραφική μέτρηση

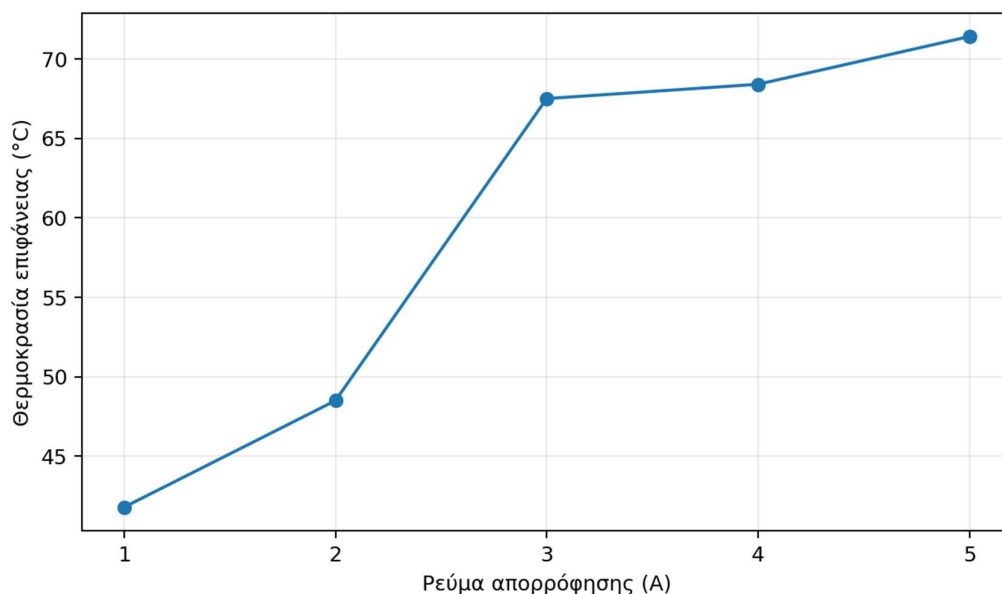
Οι θερμογραφικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με θερμική κάμερα FLIR. Στις εικόνες της κάμερας η τιμή εκπεμπτικότητας ήταν ρυθμισμένη σε $\varepsilon = 0,95$ [17]. Η ένδειξη που καταγράφεται αντιστοιχεί στη θερμοκρασία επιφάνειας στο επιλεγμένο σημείο μέτρησης στην περιοχή της βαθμίδας OPA549 και της ψύξης της. Η τιμή αυτή δεν πρέπει να ταυτίζεται με τη θερμοκρασία επαφής (junction temperature) του ολοκληρωμένου, καθώς η θερμική κάμερα μετρά την επιφανειακή θερμοκρασία του ορατού σημείου.

Η ίδια διάρκεια αναμονής των 5 λεπτών χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα σημεία μέτρησης ώστε οι τιμές να είναι συγκρίσιμες μεταξύ τους. Η διαδικασία δεν αποδεικνύει ότι έχει επιτευχθεί πλήρης θερμική ισορροπία, παρέχει όμως συνεπή βάση σύγκρισης της θερμικής καταπόνησης καθώς αυξάνεται το απορροφώμενο ρεύμα.

5.5.2 Αποτελέσματα μετρήσεων

Πίνακας 5.3: Θερμοκρασία επιφάνειας στην περιοχή του OPA549 για διαφορετικές τιμές απορροφώμενου ρεύματος.

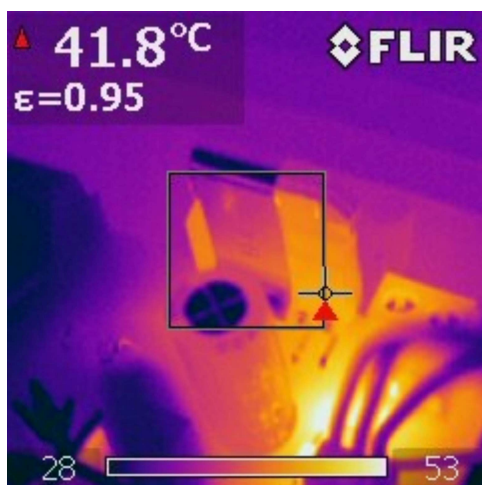
Ρεύμα (A)	Τάση μπαταρίας (V)	Ρύθμιση simulator (V)	Χρόνος αναμονής (min)	Θερμοκρασία επιφάνειας (°C)
1	12,48	11,00	5	41,8
2	12,48	11,00	5	48,5
3	12,48	11,00	5	67,5
4	12,48	11,00	5	68,4
5	12,48	11,00	5	71,4



Σχήμα 5.8: Μεταβολή της μετρούμενης θερμοκρασίας επιφάνειας ως προς το απορροφώμενο ρεύμα.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν σαφή συνολική αύξηση της μετρούμενης θερμοκρασίας με την αύξηση του ρεύματος. Για 1A καταγράφηκαν 41,8°C και για 2A 48,5°C. Στα 3A η θερμοκρασία αυξήθηκε στους 67,5°C, ενώ στα 4A και 5A οι αντίστοιχες τιμές ήταν 68,4°C και 71,4°C.

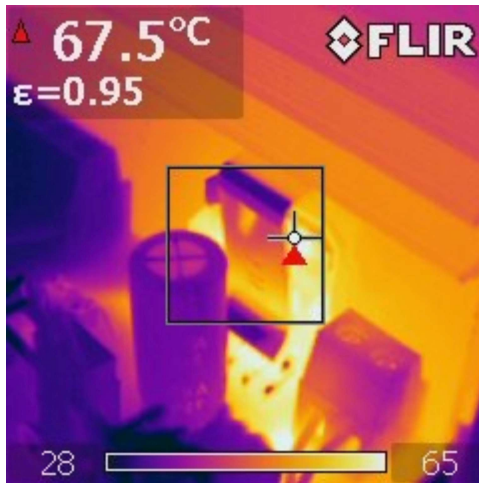
Η συνολική μεταβολή από το σημείο των 1A έως το σημείο των 5A ήταν 29,6°C. Η άνοδος δεν εμφανίζεται γραμμική σε όλο το εύρος του ρεύματος, καθώς η μεγαλύτερη μεταβολή παρατηρείται μεταξύ 2A και 3A, ενώ από 3A έως 5A η θερμοκρασία αυξάνεται πιο ήπια. Η συμπεριφορά αυτή δεν πρέπει να ερμηνευθεί ως πλήρης θερμική χαρακτηριστική του OPA549, επειδή οι μετρήσεις αφορούν τη συγκεκριμένη κατασκευή, το συγκεκριμένο σύστημα ψύξης, τη ροή αέρα και σταθερό χρόνο αναμονής 5 λεπτών.



Σχήμα 5.9: 1 A, 41,8 °C ($\epsilon = 0,95$).



Σχήμα 5.10: 2 A, 48,5 °C ($\epsilon = 0,95$).



Σχήμα 5.11: 3 A, 67,5 °C ($\epsilon = 0,95$).



Σχήμα 5.12: 4 A, 68,4 °C ($\epsilon = 0,95$).



Σχήμα 5.13: 5 A, 71,4 °C ($\epsilon = 0,95$).

5.5.3 Αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς

Η δοκιμή επιβεβαιώνει πειραματικά ότι η λειτουργία του προσομοιωτή ως sink συνοδεύεται από αυξανόμενη θερμική καταπόνηση της βαθμίδας ισχύος όσο αυξάνεται το ρεύμα που απορροφάται από την πραγματική μπαταρία [11]. Το αποτέλεσμα είναι συμβατό με τη λειτουργία μιας γραμμικής βαθμίδας ισχύος, στην οποία μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας που διαχειρίζεται το ενεργό στοιχείο μετατρέπεται σε θερμότητα και πρέπει να απομακρυνθεί μέσω της ψύκτρας και της εξαναγκασμένης ροής αέρα.

Η μέγιστη καταγεγραμμένη επιφανειακή θερμοκρασία στη συγκεκριμένη σειρά δοκιμών ήταν 71,4 °C στα 5 A. Η τιμή αυτή δεν αποτελεί άμεσα θερμοκρασία junction του OPA549 και συνεπώς δεν μπορεί από μόνη της να χρησιμοποιηθεί για υπολογισμό του θερμικού περιθωρίου ως προς το thermal shutdown. Παρέχει όμως χρήσιμη πειραματική ένδειξη της πραγματικής θερμικής συμπεριφοράς της κατασκευής και τεκμηριώνει την αναγκαιότητα της ψύκτρας και του ανεμιστήρα που έχουν ενσωματωθεί στη συσκευή.

Για πληρέστερη θερμική αξιολόγηση σε μελλοντική δοκιμή θα μπορούσε να καταγραφεί η θερμοκρασία συναρτήσει του χρόνου για μεγαλύτερο διάστημα σε σταθερό ρεύμα, καθώς και να συγκριθούν διαφορετικά σημεία λειτουργίας με και χωρίς εξαναγκασμένη ψύξη. Παρ' όλα αυτά, η παρούσα σειρά μετρήσεων προσθέτει άμεση πειραματική τεκμηρίωση στη θεωρητική ανάλυση της θερμικής διαχείρισης που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια.

5.6 Συνολική αποτίμηση των πειραματικών αποτελεσμάτων

Οι πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν επέτρεψαν την αξιολόγηση της κατασκευής σε τρεις βασικούς άξονες: τη συμπεριφορά της τάσης εξόδου υπό ωμικό φορτίο, την αμφίδρομη ροή ρεύματος κατά τη σύνδεση πραγματικής μπαταρίας και τη θερμική συμπεριφορά της βαθμίδας ισχύος OPA549 κατά τη λειτουργία απορρόφησης ρεύματος [10].

Στις δοκιμές με ωμικό φορτίο παρατηρήθηκε πτώση της τάσης εξόδου από 10,00 V σε 9,62 V και από 20,00 V σε 19,32 V, ενώ οι καταγραφές του παλμογράφου ανέδειξαν τη στιγμιαία βύθιση και την επακόλουθη αποκατάσταση της τάσης κατά τη σύνδεση του φορτίου. Οι μετρήσεις αυτές έδειξαν ότι η έξοδος ανταποκρίνεται στην απότομη μεταβολή του φορτίου και επανέρχεται σε νέα σταθερή κατάσταση, με τη σχετική πτώση τάσης να παραμένει παρόμοια στα δύο εξεταζόμενα σημεία λειτουργίας.

Η δοκιμή με πραγματική μπαταρία επιβεβαίωσε πειραματικά το σημαντικότερο λειτουργικό χαρακτηριστικό της διάταξης ως προσομοιωτή μπαταρίας: τη δυνατότητα αλλαγής της κατεύθυνσης του ρεύματος. Όταν η τάση του προσομοιωτή ήταν υψηλότερη από την τάση της μπαταρίας, το ρεύμα είχε κατεύθυνση από τον προσομοιωτή προς την μπαταρία, ενώ όταν η ρυθμιζόμενη τάση μειώθηκε κάτω από την τάση της μπαταρίας, η φορά αντιστράφηκε και η διάταξη λειτούργησε ως αποδέκτης ρεύματος. Με βάση τα διαθέσιμα διακριτά σημεία μέτρησης, η αντιστροφή παρατηρήθηκε μεταξύ των 7 V και 6 V.

Τέλος, η θερμογραφική αξιολόγηση με κάμερα FLIR παρείχε άμεση εικόνα της θερμικής καταπόνησης της βαθμίδας OPA549 κατά τη λειτουργία sink. Με τον προσομοιωτή ρυθμισμένο στα 11,00 V και με πραγματική μπαταρία αρχικής τάσης 12,48 V, η μετρούμενη επιφανειακή θερμοκρασία στην περιοχή της βαθμίδας ισχύος αυξήθηκε από 41,8 °C στο 1 A σε 71,4 °C στα 5 A, μετά από ίσο χρόνο αναμονής περίπου 5 λεπτών για κάθε σημείο. Οι μετρήσεις δεν αποτελούν μέτρηση της θερμοκρασίας επαφής του ημιαγωγού, τεκμηριώνουν όμως τη σαφή αύξηση της θερμικής καταπόνησης με το ρεύμα και τη σημασία της ψύκτρας και της εξαναγκασμένης ψύξης στην πραγματική κατασκευή.

Συνολικά, τα αποτελέσματα του κεφαλαίου επιβεβαιώνουν ότι η κατασκευασμένη διάταξη επιτυγχάνει τις βασικές λειτουργίες για τις οποίες σχεδιάστηκε: ελεγχόμενη ρύθμιση τάσης, λειτουργία υπό φορτίο, αμφίδρομη διαχείριση ρεύματος και λειτουργία της βαθμίδας ισχύος σε πραγματικές συνθήκες θερμικής καταπόνησης. Παράλληλα, οι μετρήσεις αποτυπώνουν τα πρακτικά χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς της υλοποίησης και δημιουργούν την πειραματική βάση πάνω στην οποία στηρίζονται τα συνολικά συμπεράσματα και οι προτάσεις βελτίωσης του επόμενου κεφαλαίου.

Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης

6.1 Συνολική αποτίμηση εργασίας

Η παρούσα πτυχιική εργασία είχε ως αντικείμενο τη μελέτη, σχεδίαση και κατασκευή ενός προσομοιωτή μπαταρίας, με βασικό σκοπό τη δημιουργία μιας πρακτικής εργαστηριακής διάταξης για τον έλεγχο ηλεκτρονικών προϊόντων υπό ελεγχόμενες συνθήκες τροφοδοσίας. Η ανάγκη για μία τέτοια διάταξη προκύπτει από το γεγονός ότι η χρήση πραγματικών συσσωρευτών κατά τη διάρκεια επαναλαμβανόμενων δοκιμών δεν παρέχει πάντοτε την απαιτούμενη ευκολία, επαναληψιμότητα και δυνατότητα άμεσης μεταβολής των ηλεκτρικών συνθηκών. Η κατασκευή που αναπτύχθηκε επιχειρεί να καλύψει αυτή την ανάγκη μέσω μιας ρυθμιζόμενης βαθμίδας ισχύος, στην οποία ο χρήστης μπορεί να καθορίζει την επιθυμητή τάση και το επιτρεπόμενο όριο ρεύματος.

Κεντρικό στοιχείο της υλοποίησης αποτελεί ο τελεστικός ενισχυτής ισχύος OPA549. Η επιλογή του επέτρεψε να συνδυαστούν σε ένα βασικό ενεργό στοιχείο η λειτουργία κλειστού βρόχου ενός τελεστικού ενισχυτή, η δυνατότητα διαχείρισης υψηλού ρεύματος, ο προγραμματιζόμενος περιορισμός ρεύματος και οι ενσωματωμένες λειτουργίες θερμικής προστασίας. Η Texas Instruments προβλέπει μάλιστα τόσο αναλογικό έλεγχο του current limit με αντίσταση ή ποτενσιόμετρο όσο και ψηφιακό έλεγχο μέσω κατάλληλου σήματος ή DAC, χαρακτηριστικό που δημιουργεί σαφή διαδρομή για μελλοντική εξέλιξη της παρούσας κατασκευής.

Η εργασία δεν περιορίστηκε στη θεωρητική μελέτη του κυκλώματος. Η σχεδίαση μεταφέρθηκε σε πραγματική πλακέτα, πραγματοποιήθηκε πρωτοτυποποίηση πριν από την τελική κατασκευή και αναπτύχθηκε μηχανικό περίβλημα για την ολοκλήρωση της συσκευής. Με αυτόν τον τρόπο η διαδικασία κάλυψε διαδοχικά στάδια ενός πραγματικού ηλεκτρονικού προϊόντος: από τον προσδιορισμό της ανάγκης και την επιλογή της βασικής τοπολογίας μέχρι τη σχεδίαση PCB, την κατασκευή, τη μηχανική ενσωμάτωση και τη λειτουργική αξιολόγηση.

6.2 Συμπεράσματα ως προς την ηλεκτρονική σχεδίαση

Η χρήση του OPA549 ως βασικής βαθμίδας ισχύος αποδείχθηκε κατάλληλη για τη φιλοσοφία του προσομοιωτή, καθώς επιτρέπει η έξοδος να καθορίζεται από ένα χαμηλής ισχύος σήμα ελέγχου, ενώ το μεγάλο ρεύμα διακινείται από το στάδιο ισχύος του ολοκληρωμένου [13]. Έτσι τα ποτενσιόμετρα ρύθμισης δεν χρειάζεται να μεταφέρουν το ρεύμα του φορτίου αλλά χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των αντίστοιχων εντολών τάσης και περιορισμού ρεύματος. Η αρχιτεκτονική αυτή διαχωρίζει λειτουργικά το κύκλωμα ελέγχου από τη διαδρομή ισχύος και αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα τόσο για τη χειροκίνητη λειτουργία όσο και για τη μελλοντική ψηφιοποίηση του συστήματος.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η δυνατότητα του OPA549 να λειτουργεί σε εφαρμογές source/sink. Σε επίπεδο συνολικής φιλοσοφίας, το χαρακτηριστικό αυτό είναι ουσιώδες για έναν προσομοιωτή μπαταρίας, επειδή η συσκευή που συνδέεται στους ακροδέκτες δεν είναι πάντοτε αποκλειστικά καταναλωτής ενέργειας. Σε ορισμένες εφαρμογές μπορεί να υπάρχει ροή ρεύματος προς την πλευρά που προσομοιώνει τη μπαταρία [11]. Ωστόσο, η δυνατότητα του ενισχυτή να απορροφά ρεύμα δεν πρέπει να ερμηνεύεται ως απεριορίστη ή ιδανική αναγεννητική λειτουργία [10]. Η πραγματική ικανότητα sink εξαρτάται από το πλήρες κύκλωμα, την κύρια τροφοδοσία, τη διαχείριση της επιστρεφόμενης ενέργειας και τα θερμικά όρια της βαθμίδας.

Ο ρυθμιζόμενος περιορισμός ρεύματος αποτελεί ένα ακόμη κρίσιμο χαρακτηριστικό της διάταξης. Εκτός από εργαλείο καθορισμού της συμπεριφοράς του προσομοιωτή, λειτουργεί ως σημαντικό επίπεδο προστασίας σε περίπτωση υπερβολικής απαίτησης ρεύματος ή μη αναμενόμενης συμπεριφοράς του φορτίου. Η λειτουργία αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε εργαστηριακές δοκιμές, όπου η συσκευή μπορεί να συνδεθεί διαδοχικά σε διαφορετικά πρωτότυπα ή φορτία και επομένως είναι επιθυμητό το μέγιστο ρεύμα να καθορίζεται πριν από την εφαρμογή της τροφοδοσίας [9].

6.3 Θερμική διαχείριση και όρια λειτουργίας

Ένα από τα σημαντικότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη είναι ότι σε έναν γραμμικό προσομοιωτή υψηλού ρεύματος η θερμική σχεδίαση είναι εξίσου σημαντική με την ηλεκτρική. Η δυνατότητα του OPA549 να διαχειρίζεται υψηλά ρεύματα δεν σημαίνει ότι το μέγιστο ονομαστικό ρεύμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανεξάρτητα από την τάση εξόδου. Η ισχύς που αναπτύσσεται στο ολοκληρωμένο εξαρτάται από την τάση που παραμένει πάνω στο στάδιο ισχύος και από το ρεύμα που το διαρρέει. Για τον λόγο αυτό ο πραγματικός ασφαλής χώρος λειτουργίας καθορίζεται από τον συνδυασμό τάσης, ρεύματος, Safe Operating Area και θερμοκρασίας [12].

Ένα πρακτικό όριο της παρούσας προσέγγισης είναι η χαμηλότερη ενεργειακή απόδοση που χαρακτηρίζει μία γραμμική βαθμίδα ισχύος σε σχέση με μία διακοπτική ή αναγεννητική αρχιτεκτονική. Όταν η τάση εξόδου είναι σημαντικά μικρότερη από την κύρια τάση τροφοδοσίας και ταυτόχρονα απαιτείται υψηλό ρεύμα, μεγάλο μέρος της διαθέσιμης ισχύος μετατρέπεται σε θερμότητα. Η παρατήρηση αυτή δεν αναιρεί τη χρησιμότητα της κατασκευής, αλλά ορίζει το πεδίο στο οποίο πρέπει να χρησιμοποιείται και αποτελεί βασικό σημείο για πιθανές μελλοντικές αναβαθμίσεις.

6.4 Περιορισμοί της παρούσας έκδοσης

Η παρούσα έκδοση βασίζεται κυρίως σε χειροκίνητο χειρισμό. Η τάση και το όριο ρεύματος καθορίζονται μέσω αναλογικών ποτενσιόμετρων, ενώ η παρακολούθηση των βασικών ηλεκτρικών μεγεθών πραγματοποιείται από το ανεξάρτητο όργανο ένδειξης. Η λύση αυτή είναι απλή, άμεσα κατανοητή και κατάλληλη για χειροκίνητες εργαστηριακές δοκιμές, δεν παρέχει όμως δυνατότητα αυτοματοποιημένης εκτέλεσης σεναρίων, αποθήκευσης προκαθορισμένων τιμών ή καταγραφής δεδομένων σε υπολογιστή.

Επιπλέον, το σύστημα δεν διαθέτει στην παρούσα μορφή του κεντρικό ψηφιακό ελεγκτή ο οποίος να γνωρίζει με ακρίβεια την επιλεγμένη τάση και το πραγματικό ρεύμα εξόδου. Αυτό περιορίζει τη δυνατότητα δημιουργίας κλειστών αυτοματοποιημένων διαδικασιών δοκιμής. Για παράδειγμα, μία ακολουθία στην οποία η τάση μεταβάλλεται αυτόματα σε συγκεκριμένα επίπεδα, παραμένει για προκαθορισμένο χρόνο σε κάθε επίπεδο και καταγράφεται η απόκριση του φορτίου δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς εξωτερική παρέμβαση.

Επίσης, ο προσομοιωτής δεν πρέπει να θεωρείται πλήρες ηλεκτροχημικό μοντέλο μπαταρίας. Η πραγματική μπαταρία παρουσιάζει μεταβολή εσωτερικής αντίστασης, εξάρτηση από την κατάσταση φόρτισης, θερμοκρασιακή εξάρτηση, δυναμικά φαινόμενα και συγκεκριμένη καμπύλη φόρτισης και εκφόρτισης. Η παρούσα κατασκευή εστιάζει στην ελεγχόμενη ηλεκτρική διαπαφή που είναι χρήσιμη για συγκεκριμένες δοκιμές προϊόντων. Η διάκριση αυτή είναι σημαντική, ώστε τα αποτελέσματα των δοκιμών να ερμηνεύονται μέσα στο πραγματικό πεδίο εφαρμογής της διάταξης.

6.5 Μελλοντική ψηφιακή ρύθμιση τάσης και ρεύματος

Η σημαντικότερη προγραμματισμένη εξέλιξη της κατασκευής είναι η αντικατάσταση του αποκλειστικά χειροκίνητου ελέγχου από ψηφιακά ελεγχόμενη ρύθμιση [18]. Μία πρώτη προσέγγιση είναι η χρήση ψηφιακών ποτενσιόμετρων στα σημεία όπου σήμερα χρησιμοποιούνται τα αναλογικά ποτενσιόμετρα τάσης και ρεύματος. Με τον τρόπο αυτό η θέση της ρύθμισης θα μπορεί να καθορίζεται από μικροελεγκτή και όχι αποκλειστικά από τον χειριστή.

Η μετάβαση αυτή απαιτεί προσεκτική επιλογή των ψηφιακών ποτενσιόμετρων. Δεν αρκεί να έχουν την ίδια ονομαστική αντίσταση με τα μηχανικά ποτενσιόμετρα. Πρέπει να ελεγχθούν το επιτρεπόμενο εύρος τάσης στους ακροδέκτες και στον δρομέα, το μέγιστο ρεύμα του wiper, η ανάλυση σε βήματα, η ανοχή της συνολικής αντίστασης, η συμπεριφορά κατά την εκκίνηση και η κατάσταση στην οποία επανέρχονται μετά από απώλεια τροφοδοσίας. Επειδή οι ρυθμίσεις συνδέονται άμεσα με την τάση και το όριο ρεύματος της εξόδου, μία λανθασμένη αρχική κατάσταση του ψηφιακού στοιχείου θα μπορούσε να οδηγήσει σε ανεπιθύμητη εντολή κατά την ενεργοποίηση.

Για τον έλεγχο του current limit υπάρχει επιπλέον η δυνατότητα να εξεταστεί λύση με DAC αντί ψηφιακού ποτενσιόμετρου. Η τεκμηρίωση του OPA549 προβλέπει ρητά ψηφιακά ελεγχόμενο current limit μέσω χαμηλού επιπέδου ρεύματος ή τάσης και παρουσιάζει παράδειγμα πλήρως digitally controlled programmable power supply. Επομένως, σε επόμενη έκδοση αξίζει να συγκριθούν οι δύο προσεγγίσεις. Το ψηφιακό ποτενσιόμετρο διατηρεί μεγαλύτερη ομοιότητα με την υφιστάμενη αναλογική σχεδίαση, ενώ ένας DAC μπορεί να προσφέρει πιο άμεσο και ακριβή προγραμματισμό της εντολής, εφόσον σχεδιαστεί κατάλληλα το interface με τον OPA549.

6.6 Ενσωμάτωση μικροελεγκτή και επικοινωνία με υπολογιστή

Η προσθήκη μικροελεγκτή αποτελεί το επόμενο λογικό βήμα μετά την ψηφιοποίηση των ρυθμίσεων. Μία πλατφόρμα της οικογένειας ESP θα μπορούσε να αναλάβει τον κεντρικό έλεγχο της συσκευής, να προγραμματίζει τις επιθυμητές τιμές τάσης και ρεύματος, να διαβάζει τις πραγματικές μετρήσεις, να ελέγχει την κατάσταση της εξόδου και να επικοινωνεί με υπολογιστή [18]. Η επιλογή του συγκεκριμένου μικροελεγκτή θα πρέπει να γίνει στην επόμενη φάση με βάση τις απαιτήσεις ακρίβειας, τα διαθέσιμα interfaces, την ηλεκτρική απομόνωση που ενδεχομένως απαιτείται και τον επιθυμητό τρόπο επικοινωνίας.

Η σύνδεση με υπολογιστή θα μετατρέψει τη διάταξη από χειροκίνητο εργαστηριακό όργανο σε προγραμματιζόμενη πλατφόρμα δοκιμών. Ο χρήστης θα μπορεί να ορίζει τιμές setpoint από γραφικό περιβάλλον, να ενεργοποιεί και να απενεργοποιεί την έξοδο, να δημιουργεί ακολουθίες μεταβολής της τάσης και να αποθηκεύει τα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να δημιουργηθεί σενάριο στο οποίο η τάση μεταβάλλεται αυτόματα από μία αρχική σε μία τελική τιμή με συγκεκριμένο βήμα, ενώ σε κάθε σημείο καταγράφονται τάση, ρεύμα, χρόνος και κατάσταση της υπό δοκιμή συσκευής.

6.7 Προσθήκη κυκλώματος μέτρησης τάσης και ρεύματος

Η ψηφιακή λειτουργία προϋποθέτει ότι ο μικροελεγκτής δεν θα γνωρίζει μόνο την εντολή που έστειλε προς τη βαθμίδα ισχύος, αλλά και την πραγματική ηλεκτρική κατάσταση στην έξοδο. Για τον λόγο αυτό απαιτείται η προσθήκη κυκλώματος μέτρησης τάσης και ρεύματος. Η μέτρηση της τάσης μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω κατάλληλου διαιρέτη τάσης και αναλογικής βαθμίδας προσαρμογής, ώστε η μέγιστη τάση εξόδου να μετατρέπεται σε επίπεδο ασφαλές για τον ADC του ελεγκτή. Η επιλογή των αντιστάσεων πρέπει να λαμβάνει υπόψη τόσο την ακρίβεια όσο και το ρεύμα που καταναλώνει μόνιμα ο διαιρέτης.

Για τη μέτρηση ρεύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατάλληλη αντίσταση shunt σε συνδυασμό με ενισχυτή μέτρησης ρεύματος ή εξειδικευμένο current-sense ολοκληρωμένο. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να επιλεγεί προσεκτικά η τιμή του shunt, επειδή μεγαλύτερη αντίσταση αυξάνει την τάση μέτρησης αλλά ταυτόχρονα προκαλεί μεγαλύτερη πτώση τάσης και απώλεια ισχύος. Επιπλέον, εφόσον επιδιώκεται μέτρηση και στις δύο κατευθύνσεις ρεύματος, το κύκλωμα πρέπει να υποστηρίζει bidirectional current sensing, ώστε να διακρίνεται η λειτουργία source από τη λειτουργία sink.

6.8 Μελλοντική εξέλιξη προς προγραμματιζόμενο battery simulator

Η συνδυασμένη προσθήκη ψηφιακής ρύθμισης, μικροελεγκτή, μετρήσεων και επικοινωνίας με υπολογιστή επιτρέπει μία πολύ ευρύτερη εξέλιξη της κατασκευής. Αντί ο χρήστης να ορίζει μόνο μία σταθερή τάση, ο ελεγκτής θα μπορεί να παράγει χρονικά μεταβαλλόμενα προφίλ. Έτσι θα είναι δυνατό να προσομοιώνονται, σε λειτουργικό επίπεδο, διαφορετικές καταστάσεις μπαταρίας μέσω προκαθορισμένων καμπυλών τάσης και ορίων ρεύματος.

Σε επόμενο στάδιο θα μπορούσε να εισαχθεί λογισμικό μοντέλο απλής εσωτερικής αντίστασης. Αν η επιθυμητή ανοικτοκυκλωμένη τάση οριστεί ως VOC και το μετρούμενο ρεύμα ως I, η εντολή εξόδου θα μπορούσε να μεταβάλλεται σύμφωνα με μία σχέση της μορφής $V_{OUT} = V_{OC} - I \cdot R_{INT}$ κατά την εκφόρτιση. Με αυτό τον τρόπο η έξοδος δεν θα συμπεριφέρεται πλέον ως ιδανική σταθερή πηγή τάσης αλλά θα εμφανίζει ελεγχόμενη πτώση τάσης με το φορτίο, προσεγγίζοντας καλύτερα μία βασική ηλεκτρική ιδιότητα πραγματικής μπαταρίας.

Για εφαρμογές μεγαλύτερης ισχύος ή για εκτεταμένη λειτουργία sink, μία μελλοντική αρχιτεκτονική θα μπορούσε επίσης να εξετάσει διακοπτική ή αναγεννητική βαθμίδα ισχύος. Μία τέτοια λύση θα μπορούσε να μειώσει σημαντικά τις θερμικές απώλειες σε σχέση με την καθαρά γραμμική λειτουργία, αλλά θα αύξανε την πολυπλοκότητα του ελέγχου, τις απαιτήσεις ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και το κόστος σχεδίασης. Συνεπώς αποτελεί διαφορετικό επίπεδο εξέλιξης και όχι απλή τροποποίηση της υφιστάμενης πλακέτας.

6.9 Τελικό συμπέρασμα

Η κατασκευή του προσομοιωτή μπαταρίας αποτέλεσε μία ολοκληρωμένη εφαρμογή ηλεκτρονικής ισχύος, αναλογικού ελέγχου, θερμικής σχεδίασης, σχεδίασης PCB και μηχανικής ενσωμάτωσης. Η αξία της δεν περιορίζεται στη λειτουργία της ως ρυθμιζόμενης πηγής, αλλά βρίσκεται κυρίως στη δυνατότητα χρήσης της ως ελεγχόμενο εργαλείο κατά τη δοκιμή ηλεκτρονικών προϊόντων. Η ρύθμιση τάσης και περιορισμού ρεύματος, η δυνατότητα διαχείρισης σημαντικής ισχύος και οι προστασίες του OPA549 δημιουργούν μία πρακτική βάση για εργαστηριακή χρήση.

Παράλληλα, η υλοποίηση ανέδειξε τους περιορισμούς μιας γραμμικής βαθμίδας υψηλού ρεύματος, κυρίως ως προς την απώλεια ισχύος και τη θερμική διαχείριση. Οι περιορισμοί αυτοί είναι ουσιαστικό μέρος της σχεδίασης και καθορίζουν τις συνθήκες μέσα στις οποίες η συσκευή μπορεί να χρησιμοποιείται με ασφάλεια και αξιοπιστία. Η κατανόησή τους αποτελεί εξίσου σημαντικό αποτέλεσμα με την ίδια την κατασκευή.

Η υπάρχουσα πλατφόρμα παρέχει επίσης σαφή δυνατότητα περαιτέρω ανάπτυξης. Η αντικατάσταση των χειροκίνητων ρυθμίσεων από ψηφιακό έλεγχο, η ενσωμάτωση μικροελεγκτή, η προσθήκη OLED και κυκλωμάτων μέτρησης και η επικοινωνία με υπολογιστή μπορούν να μετατρέψουν την κατασκευή σε πλήρως προγραμματιζόμενο εργαστηριακό όργανο. Σε ακόμη πιο προχωρημένη μορφή, η αξιοποίηση των πραγματικών μετρήσεων σε αλγοριθμικό μοντέλο θα επέτρεπε την αναπαραγωγή δυναμικότερων χαρακτηριστικών μιας μπαταρίας και την αυτοματοποίηση ολόκληρων σεναρίων

ελέγχου. Με τον τρόπο αυτό η παρούσα εργασία δεν αποτελεί μόνο μία ολοκληρωμένη κατασκευή, αλλά και μία τεχνική βάση πάνω στην οποία μπορεί να αναπτυχθεί μία επόμενη, περισσότερο αυτοματοποιημένη γενιά του συστήματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Texas Instruments, “OPA549 High-Voltage, High-Current Operational Amplifier,” OPA549 datasheet, Rev. E, Oct. 2005.
- [2] Electronics-Lab, “1.2V–25V/10A Adjustable Power Supply Using Power Op-Amp,” Jan. 3, 2018.
- [3] I. Taniguchi, K. Kojima, and M. Fukui, “A practical battery charge/discharge simulator for future embedded systems including smart grids,” in Proc. 2009 International SoC Design Conference (ISOCC), 2009, pp. 173–176, doi: 10.1109/SOCCDC.2009.5423902.
- [4] A. Patel and A. V. Sant, “Operational amplifier based low power dc–ac converter for domestic applications,” in Proc. 2020 4th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI), 2020, pp. 58–63, doi: 10.1109/ICOEI48184.2020.9142939.
- [5] Hellas Digital, “ICL7107 Digital Ammeter Voltmeter Kit,” Sep. 1, 2026.
- [6] Texas Instruments, “OPA549-HiRel High-Voltage, High-Current Operational Amplifier,” OPA549-HiRel datasheet, May 2012.
- [7] Renesas Electronics, “ICL7106, ICL7107, ICL7107S: 3 1/2 Digit, LCD/LED Display, A/D Converters,” datasheet, FN3082.
- [8] STMicroelectronics, “L78: Positive Voltage Regulators,” L78 series datasheet.
- [9] R. Di Rienzo, A. Verani, F. Baronti, R. Roncella, and R. Saletti, “Modular battery emulator for development and functional testing of battery management systems: The cell emulator,” *Electronics*, vol. 11, no. 8, Art. no. 1215, 2022.
- [10] A. Verani, R. Di Rienzo, N. Nicodemo, F. Baronti, R. Roncella, and R. Saletti, “Modular battery emulator for development and functional testing of battery management systems: Hardware design and characterization,” *Electronics*, vol. 12, no. 5, Art. no. 1232, 2023.
- [11] N. Daniil and D. Drury, “Investigation and validation of methods to implement a two-quadrant battery emulator for power Hardware-in-the-Loop Simulation,” in Proc. 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2016), Florence, Italy, 2016, pp. 2070–2075.
- [12] S. Lale, M. Bašić, S. Lubura, B. Popović, and M. Ikić, “Current-mode controlled battery emulator,” *Processes*, vol. 13, no. 10, Art. no. 3281, 2025.
- [13] P. H. J. Kleutgens, L. Hagemann, A. Meißen, B. J. Mortimer, and R. W. De Doncker, “A power hardware-in-the-loop test bench for emulation of test scenarios and mission profiles for high-power DC charging stations,” *Elektrotechnik & Informationstechnik*, vol. 142, pp. 30–41, 2025.
- [14] H. M. Jassim, A. M. Zyuzev, and M. V. Mikhail, “Power hardware-in-loop emulation of a battery for charging systems and grid applications,” *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, vol. 335, no. 4, pp. 200–211, 2024.
- [15] Pulsonix, “Pulsonix SCM/PCB Users Guide / PCB Design Documentation.” [Online]. Available: <https://pulsonix.com/documentation> [Accessed: Sep. 1, 2026].
- [16] LPKF Laser & Electronics SE, “LPKF ProtoMat Circuit Board Plotter: PCB Milling Systems.” [Online]. Available: <https://www.lpkf.com/en/industries-technologies/research-in-house-pcb-prototyping/products/lpkf-protomat> [Accessed: Sep. 1, 2026].

- [17] FLIR Systems, “Thermographic measurement techniques,” FLIR technical documentation. [Online]. Available: <https://support.flir.com/docdownload/assets/web/4jau/en-us/T505000.xml.html> [Accessed: Sep. 1, 2026].
- [18] A. Verani, R. Di Rienzo, N. Nicodemo, F. Baronti, R. Roncella, and R. Saletti, “Open hardware/software modular battery emulator for battery management systems development and functional testing,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 84488–84497, 2024