



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Σχεδιασμός και υλοποίηση συστήματος ηλεκτρικής
τομογραφίας σύνθετης εμπέδησης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρήστος Γ. Δήμας

Επιβλέπων: Παύλος-Πέτρος Σωτηριάδης

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

**Σχεδιασμός και υλοποίηση συστήματος ηλεκτρικής
τομογραφίας σύνθετης εμπέδησης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρήστος Γ. Δήμας

Επιβλέπων: Παύλος-Πέτρος Σωτηριάδης

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την.....

.....

Παύλος-Πέτρος Σωτηριάδης Κωνσταντίνα Νικήτα Νικόλαος Ουζούνογλου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2016

.....

Χρήστος Γ. Δήμας

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Ηλεκτρονικών
Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Χρήστος Γ. Δήμας, 2016.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται, σχεδιάζεται και υλοποιείται (σε εκτυπωμένη πλακέτα PCB) ένα σύστημα ηλεκτρικής τομογραφίας σύνθετης αντίστασης. Η μέθοδος αυτή αποτελεί έναν μη επεμβατικό τρόπο^[1] απεικόνισης των εσωτερικών ιστών του σώματος μέσω του εντοπισμού της σύνθετης αντίστασης που αυτοί παρουσιάζουν μεταξύ διαδοχικών κόμβων. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η υλοποίηση μιας διάταξης με υψηλή για τα δεδομένα της διακριτική ικανότητα, βελτιωμένη απόκριση, σχετικά χαμηλό κόστος, μικρό μέγεθος και βάρος ώστε να επιτυγχάνεται η φορητότητά του.

Συγκεκριμένα στην εργασία αυτή σχεδιάζεται ένα σύστημα με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε ένα χαμηλής έντασης εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα να διαχέεται μέσα στον υπό εξέταση ανθρώπινο ιστό, και μέσω μια σειράς αρκετών ηλεκτροδίων να λαμβάνεται η αντίστοιχη τάση. Η τάση αυτή υποδεικνύει την αντίσταση που διαρρέει το ρεύμα αυτό και μέσω αυτής είναι δυνατό να αποφανθούμε για το είδος των ιστών που διαρρέονται από το ρεύμα. Εν συνεχεία, με κατάλληλους αλγορίθμους είναι δυνατή η απεικόνιση του εσωτερικού ιστού.

Για να σχεδιαστεί ένα τέτοιο σύστημα έπρεπε να προηγηθεί μια κατάλληλη και εκτενής μελέτη των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των ανθρωπίνων ιστών καθώς και των απαιτήσεων της διάταξης έτσι ώστε να καθοριστούν οι προδιαγραφές της και κατά συνέπεια τα εξαρτήματα από τα οποία αυτή θα αποτελείται και ο τρόπος διασύνδεσης μεταξύ τους. Το συνολικό κύκλωμα οδηγεί σωστά το ρεύμα στα ηλεκτρόδια και λαμβάνει την τάση που πρόκειται να μετρηθεί μέσω αυτών. Τα κύρια μέρη του κυκλώματος που σχεδιάστηκε εδώ είναι μια πηγή ρεύματος, ένα κατάλληλο σύστημα πολυπλεκτών για την διακοπτική οδήγηση ρεύματος-τάσεων, το κατάλληλο σύστημα μικροελεγκτή για τον προγραμματισμό των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και τη λήψη των μετρήσεων, καθώς και το διαφορικό στάδιο εξόδου. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιούμε συγκεκριμένα 64 ηλεκτρόδια κάτι το οποίο καθιστά το κύκλωμα αρκετά περίπλοκο στο σχεδιασμό του.

Στο παρόν έντυπο γίνεται αρχικά αναφορά στη μέθοδο ηλεκτρικής τομογραφίας σύνθετης αντίστασης και των πλεονεκτημάτων της, αναλυτική μελέτη των απαιτήσεων του συστήματος και επιλογή των στοιχείων που χρησιμοποιούνται. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοιώσεων και μετρήσεων που

πραγματοποιούνται και τέλος αναφέρονται ορισμένες πιθανές μελλοντικές προεκτάσεις και δυνατότητες του συστήματος αυτού, ώστε να καθίσταται δυνατή η πλήρης αξιοποίησή του.

Λέξεις-κλειδιά: Ηλεκτρική τομογραφία σύνθετης αντίστασης, EIT, ρεύμα, τάση, ιστός, ηλεκτρόδια, πολυπλέκτες, μικροελεγκτής.

ABSTRACT

In this diploma thesis, an electrical impedance tomography system is designed and implemented (in Printed Circuit Board). This method constitutes a non surgery way of human internal tissues imaging, by detecting their impedance between adjacent nodes. Purpose of this thesis is the implementation of an experimental setup with relatively high precision, improved response, relatively low cost, small size and weight, so that it becomes portable.

Specifically in this treatise a system is designed in such a way that a low intensity alternating current is diffused into the human tissue under examination, and through a series of lots of electrodes, a voltage is measured. That voltage indicates the resistance that this current flows and through this resistance it is possible to deduce about the tissue types being flowed. Then, with appropriate algorithms we are able to image the tissue interior.

In order to design such a system, a proper and extensive study of the electrical properties of human tissue as well as the requirements of the device so as to determine its specifications and therefore its components and the connections between them, should be preceded. The total circuit drives correctly the current to the electrodes and receives the voltage that is about to be measured through them. The basic parts of the circuit designed is a current source, an appropriate system of multiplexers for current injection and voltages switching, the appropriate microcontroller system to program the integrated circuits and receive the measurements, and the differential exit stage. In this thesis, we specifically use 64 electrodes, something which makes the circuit design quite complicated.

The present printed matter, firstly refers to the method of electrical impedance tomography and its advantages, then the requirements of the system are analyzed and the components to be used are selected. Subsequently, simulation and measurement results are presented and in final, some possible future extensions and capabilities of the system to allow full utilization are referred.

Key-words: Electrical Impedance Tomography, EIT, current, voltage, tissue, electrodes, multiplexers, microcontroller

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Παύλο-Πέτρο Σωτηριάδη, για την καθοδήγηση και τις υποδείξεις του. Ευχαριστώ επίσης τους συναδέλφους μου Κωνσταντίνο Παπαφώτη και Κωνσταντίνο Ούστογλου για τη σημαντική βοήθειά τους και τις πολύτιμες συμβουλές τους.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ABSTRACT.....	7
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	10
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	11
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	12
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	12
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	14
1. Εισαγωγή.....	14
2. Εφαρμογές.....	16
3. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου.....	19
4. Μέθοδοι τοποθέτησης ηλεκτροδίων.....	23
4.1. Η παρακείμενη τοποθέτηση.....	23
4.2. Η αντιθετική τοποθέτηση.....	25
4.3. Η διαγώνια τοποθέτηση.....	26
4.4. Η τοποθέτηση αγώγιμου ορίου.....	27
5. Κριτήρια και επιλογή τοποθέτησης για τη διάταξη.....	28
6. Ηλεκτρικές ιδιότητες των ιστών.....	29
Η ΔΙΑΤΑΞΗ.....	35
7. Σύντομη Περιγραφή.....	35
8. Μελέτη επιμέρους διατάξεων και επιλογή στοιχείων.....	39
8.1. Τα ηλεκτρόδια.....	39
8.2. Οι πολυπλέκτες.....	42
8.3. Ο μικροελεγκτής.....	58
8.4. Τροφοδοσία (Power Supply).....	78
8.5. Η πηγή ρεύματος (Current Source).....	84
8.6. Στάδιο εξόδου.....	92
8.7. Τροφοδοσία πηγής ρεύματος και AD8421.....	95
8.8. Η Μητρική πλακέτα (motherboard).....	97
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	102
9. Προγραμματισμός του συστήματος.....	102
10. Αποτελέσματα - σχολιασμός.....	119
11. Πιθανές επεκτάσεις-δυνατότητες.....	132

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Ηλεκτρική τομογραφία σύνθετης αντίστασης με σύστημα Pulmo Vista ^[3]	15
Εικόνα 2: Σύστημα Ηλεκτρικής Τομογραφίας κατασκευασμένο από τη Swisstom (Swisstom BB2) και συνοδευόμενο από κατάλληλο λογισμικό απεικόνισης και διεπαφής χρήστη	16
Εικόνα 3: Χρήση της EIT για αναγνώριση κίνησης χεριού. (Tomo: Wearable, Low-Cost Electrical Impedance Tomography for Hand Gesture Recognition)	18
Εικόνα 4: Σύστημα αξονικού τομογράφου σύγχρονης γενιάς. Αντιλαμβάνεται εύκολα κανείς το μέγεθος και το κόστος ενός τέτοιου εξοπλισμού.	20
Εικόνα 5: Σύγκριση εικόνας που λαμβάνεται από αξονική υπολογιστική τομογραφία - CT (αριστερά) και ηλεκτρική τομογραφία σύνθετης αντίστασης -EIT (δεξιά), για την απεικόνιση των πνευμονικών ιστών	22
Εικόνα 6: Δομικό διάγραμμα ενός συστήματος EIT και μια απλή πειραματική διάταξη.....	37
Εικόνα 7: Εκτυπωμένη πλακέτα υλοποίησης συστήματος EIT 16 ηλεκτροδίων. Ήδη διακρίνεται η εξαιρετική περιπλοκότητα του συστήματος κάτι που απαιτεί δομικό διάγραμμα τόσο για την κατασκευή όσο και για την επεξήγησή του ^[8]	39
Εικόνα 8: Ειδική ζώνη ενσωμάτωσης ηλεκτροδίων μέτρησης στο σύστημα Pulmo Vista ^[3]	40
Εικόνα 9: Το πλαστικό δοχείο της πειραματικής διάταξης με τα προσαρτημένα ηλεκτρόδια (phantom 2D model).....	42
Εικόνα 10: α) Ο πολυπλέκτης ADG1406, β) Ο πολυπλέκτης ADG1404, γ) Το ολοκληρωμένο SN74LV574 (Flip-FlopsTri-StateOctal).....	52
Εικόνα 11 Χαρακτηριστική πλακέτα SO-DIMMDDR3 204pin με αναγραφόμενες διαστάσεις ^[13]	55
Εικόνα 12 Εμπρόσθια όψη της πλακέτας της πλακέτας SO-DIMM DDR3.....	57
Εικόνα 13: Πίσω όψη της πλακέτας SO-DIMM DDR3	57
Εικόνα 14: Αριστερά: ο μικροελεγκτής της Atmel Atmega8, Δεξιά: το διάγραμμα με τις λειτουργίες των pins που διαθέτει.	62
Εικόνα 15: Αναπτυξιακή πλακέτα arduino Uno (ενσωματώνει το μικροελεγκτή Atmel Atmega328P).	66
Εικόνα 16: Μητρική πλακέτα ενσωματωμένου συστήματος	67
Εικόνα 17: Προγραμματισμός του μικροελεγκτή ARM ATSAM3X8E (32bit) της αναπτυξιακής πλακέτας Arduino due, με χρήση external programmer	69
Εικόνα 18: 2D σχέδιο του PCB layout της πλακέτας μικροελεγκτή	78
Εικόνα 19: Η πλακέτα τροφοδοσίας.....	83
Εικόνα 20: Η πλακέτα πηγής ρεύματος, σταδίου εξόδου και της τροφοδοσίας τους .	97
Εικόνα 21: Η μητρική πλακέτα, με τις πλακέτες πολυπλεκτών τοποθετημένες α) εμπρόσθια όψη, β) πίσω όψη	101
Εικόνα 22: ρυθμίσεις προγραμματιστή AVR pocket για επικοινωνία με τον atmega 328.....	103

Εικόνα 23: Ανακατασκευασμένη εικόνα για ομοιογενές δοχείο και 16 ηλεκτρόδια μέτρησης	126
Εικόνα 24: Ανακατασκευασμένη εικόνα για δοχείο με περιεχόμενο γυάλινο μπουκάλι και 16 ηλεκτρόδια μέτρησης	127
Εικόνα 25: Ανακατασκευασμένη εικόνα για δοχείο με περιεχόμενα δυο γυάλινα μπουκάλια και 16 ηλεκτρόδια μέτρησης	128
Εικόνα 26: εικόνα για ομοιογενές δοχείο και 64 ηλεκτρόδια μέτρησης	130
Εικόνα 27: Ανακατασκευασμένη εικόνα για δοχείο με περιεχόμενο γυάλινο μπουκάλι και 64 ηλεκτρόδια μέτρησης	131
Εικόνα 28: Ανακατασκευασμένη εικόνα για δοχείο με περιεχόμενα δυο γυάλινα μπουκάλια και 64 ηλεκτρόδια μέτρησης	132

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Ηλεκτρική τομογραφία στο λόφο του τύμβου Καστά, Αμφίπολη Σερρών .	19
Σχήμα 2: Διάγραμμα παρουσίασης του τρόπου λειτουργίας της παρακείμενης μεθόδου (σε σύστημα 16 ηλεκτροδίων). Απεικονίζονται οι 2 πρώτες μεγάλες "επαναλήψεις", στις οποίες η πηγή ρεύματος τοποθετείται στα ζεύγη ηλεκτροδίων 1-2 και 2-3 αντίστοιχα ^[4]	24
Σχήμα 3: Διάγραμμα της αντιθετικής τοποθέτησης ηλεκτροδίων ρεύματος, για N=16 ηλεκτρόδια	25
Σχήμα 4: Σχηματική απεικόνιση της διαγώνιας μεθόδου για δυο ζεύγη πηγής ρεύματος ^[4]	27
Σχήμα 5: Σχηματική απεικόνιση της τοποθέτησης των ηλεκτροδίων κατά την στρατηγική αγωγίμου ορίου ^[1]	28
Σχήμα 6: Διάγραμμα μοντέλων διεπαφής για διάφορους τύπους σύνδεσης ^[5]	30
Σχήμα 7: Απλό μοντέλο διεπαφής ηλεκτροδίου - σώματος ^[1]	31
Σχήμα 8: Απλουστευμένο ισοδύναμο κύκλωμα ανθρώπινου σώματος.....	33
Σχήμα 9 Ισοδύναμο κυκλωματικό μοντέλο διάταξης μεταξύ 2 ηλεκτροδίων έκχυσης ρεύματος και 2 ηλεκτροδίων μέτρησης τάσης.....	33
Σχήμα 10: Δομικό διάγραμμα EIT που υλοποιείται με χρήση FPGA ^[8]	38
Σχήμα 11: Κυκλωματικό διάγραμμα της λειτουργίας του αναλογικού πολυπλέκτη σε επίπεδο VLSI	44
Σχήμα 12: Σχηματικό διάγραμμα της σύνδεσης των επιμέρους στοιχείων ενός πολυπλέκτη 64x1	47
Σχήμα 13: Σχέδιο λειτουργίας ενός καναλιού του SN74LV574 σε επίπεδο λογικών πυλών	51
Σχήμα 14: Σχηματικό κυκλωματικό διάγραμμα πολυπλέκτη 64x1 με καταχωρητή....	53
Σχήμα 15: PCBσχέδιο της πλακέτας SO-DIMMDDR3, πρώτο επίπεδο επίστρωσης χαλκού.....	56
Σχήμα 16:σχέδιο της πλακέτας SO-DIMMDDR3, τελευταίο (4ο) επίπεδο επίστρωσης χαλκού.....	56

Σχήμα 17: Δομικό διάγραμμα SPI σύνδεσης ^[22]	68
Σχήμα 18: Δομικό διάγραμμα SPI σύνδεσης	70
Σχήμα 19: Κυκλωματικό διάγραμμα προγραμματιστή rocket AVR.	75
Σχήμα 20: Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος μικροελεγκτή	77
Σχήμα 21: 2D σχέδιο του PCB layout της πλακέτας μικροελεγκτή	78
Σχήμα 22: 2D σχέδιο του PCB layout της πλακέτας Power Supply	82
Σχήμα 23: 3D αναπαράσταση της ίδιας πλακέτας.....	83
Σχήμα 24: Σχηματικό διάγραμμα της πλακέτας τροφοδοσίας	84
Σχήμα 25: Κυκλωματικό διάγραμμα απλής πηγής ρεύματος.....	85
Σχήμα 26: Η κυκλωματική διάταξη του διαφορικού με 2 εξόδους ενισχυτή THS413X	87
Σχήμα 27: Σχηματικό κυκλωματικό διάγραμμα συνολικής διάταξης πηγής ρεύματος.....	88
Σχήμα 28: Το σχηματικό διάγραμμα πηγής ρεύματος σχεδιασμένο στο LTSpice.....	89
Σχήμα 29: Αριστερά: ιδανική πηγή ρεύματος, Δεξιά: Πραγματική πηγή ρεύματος ...	92
Σχήμα 30: Σχηματικό διάγραμμα του AD8421	93
Σχήμα 31: Κύκλωμα υπερερατού φίλτρου στην είσοδο του AD8421.....	94
Σχήμα 32: Σχηματικό διάγραμμα της διάταξης εξόδου.....	94
Σχήμα 33: Κυκλωματικό διάγραμμα τροφοδοσίας.....	95
Σχήμα 34: Σχήμα PCB πλακέτας πηγής ρεύματος, σταδίου εξόδου και τροφοδοσίας τους	96
Σχήμα 35: Σχηματικό διάγραμμα της μητρικής πλακέτας (motherboard). Διακρίνεται ο τρόπος με τον οποίο έχει πραγματοποιηθεί η απαρίθμηση των αναλογικών σημάτων, καθώς και η ανά 2 DIMM διαφορετική χαρτογράφηση τους	100
Σχήμα 36: Σχέδιο PCB μητρικής πλακέτας-εμπρόςθια όψη	101

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Ειδική αντίσταση (Ohm) ανά ιστό και συχνότητα ^[1]	32
Πίνακας 2: Προτεινόμενες τιμές αντιστάσεων	87

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Ρεύμα τροφοδοσίας του ADG1404, συναρτήσει τάσεων τροφοδοσίας και ψηφιακών σημάτων	49
Διάγραμμα 2: Ρεύμα τροφοδοσίας του ADG1406, συναρτήσει τάσεων τροφοδοσίας και ψηφιακών σημάτων	49
Διάγραμμα 3: Ρεύμα τροφοδοσίας μικροελεγκτή ATMEGA 328 συναρτήσει τάσης τροφοδοσίας και συχνότητας ρολογιού ^[25]	73
Διάγραμμα 4: Ρεύμα εξόδου για $V_{pp}=2V$, $f=1MHz$, $R_L=10K\Omega$	89
Διάγραμμα 5: Ρεύμα εξόδου για $V_{pp}=2V$, $f=1MHz$, $R_L=20K\Omega$	90
Διάγραμμα 6: Ρεύμα εξόδου για $V_{pp}=2V$, $f=2MHz$, $R_L=10K\Omega$	90
Διάγραμμα 7: Ρεύμα εξόδου για $V_{pp}=2V$, $f=2MHz$, $R_L=20K\Omega$	91

Διάγραμμα 8: Πυκνότητα θορύβου VS αντίσταση πηγής	93
Διάγραμμα 9: Κατανομή τιμών πίνακα μετρήσεων (16x16) σε ομοιογενές δείγμα 16 ηλεκτροδίων	125
Διάγραμμα 10: Κατανομή τιμών πίνακα μετρήσεων (16x16) σε δείγμα μέτρησης 16 ηλεκτροδίων με περιεχόμενο ένα γυάλινο μπουκάλι	126
Διάγραμμα 11: Κατανομή τιμών πίνακα μετρήσεων (16x16) σε δείγμα μέτρησης 16 ηλεκτροδίων με περιεχόμενα δυο γυάλινα μπουκάλια	128
Διάγραμμα 12: Κατανομή τιμών πίνακα μετρήσεων (64x64) σε ομοιογενές δείγμα 64 ηλεκτροδίων	129
Διάγραμμα 13: Κατανομή τιμών πίνακα μετρήσεων (64x64) σε δείγμα μέτρησης 64 ηλεκτροδίων με περιεχόμενο ένα πλαστικό μπουκάλι	130
Διάγραμμα 14: Κατανομή τιμών πίνακα μετρήσεων (64x64) σε δείγμα μέτρησης 64 ηλεκτροδίων με περιεχόμενα δυο γυάλινα μπουκάλια	131

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. Εισαγωγή

Μέχρι σήμερα, για την απεικόνιση του εσωτερικού του ανθρώπινου σώματος είναι ευρέως γνωστές οι μέθοδοι αξονικής τομογραφίας (CT), μαγνητικής τομογραφίας (MRI), η τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίου (PET), η μέθοδος των υπερήχων καθώς και άλλες παρόμοιες μέθοδοι που βασίζονται στις παραπάνω. Οι μέθοδοι αυτοί είναι εξαιρετικά αποτελεσματικές καθώς συμβάλλουν στην άμεση εξέταση και διάγνωση των προβλημάτων που ενδέχεται να παρουσιάζει ένας ιστός του ασθενούς. Ωστόσο είναι σαφές ότι πέραν του υψηλού κόστους οι απεικονιστικές αυτές τεχνικές στην συντριπτική πλειοψηφία τους χρησιμοποιούν δέσμες ακτινοβολίας η οποία μακροπρόθεσμα μπορεί να επιφέρει δυσάρεστες επιπτώσεις στην υγεία του ασθενούς. Οι παράγοντες αυτοί αποτρέπουν τη συχνή και επαναλαμβανόμενη σε τακτά χρονικά διαστήματα χρήση των τρόπων αυτών από τον ασθενή, πέρα από το ότι συντελείται μια χρονοβόρα διαδικασία για την πραγματοποίηση κάθε τέτοιας εξέτασης. Όλα τα παραπάνω αποτελούν ένα κίνητρο για τις ερευνητικές ομάδες να εξετάσουν νέες, εναλλακτικές, ασφαλέστερες και πιο οικονομικές μεθόδους ιατρικής απεικόνισης.

Η ηλεκτρική τομογραφία σύνθετης αντίστασης (Electrical Impedance Tomography) αποτελεί μια νέα εντελώς διαφορετικής φιλοσοφίας μέθοδο απεικόνισης, μέσω της οποίας επιχειρείται να προσπεραστούν τα μειονεκτήματα των προηγούμενων μεθόδων και παράλληλα να αυξηθεί η αποτελεσματικότητά της με την εξέλιξη όλο και πιο σύγχρονων βιοϊατρικών συστημάτων.

Όπως περιληπτικά ήδη αναφέρθηκε, η ηλεκτρική τομογραφία (EIT) απεικονίζει τις αλλαγές στην αντίσταση και κατά συνέπεια στην αγωγιμότητα του εσωτερικού του ανθρώπινου σώματος, με τη μέτρηση των τάσεων που δίνουν τα ηλεκτρόδια που έχουν τοποθετηθεί σε συγκεκριμένες θέσεις γύρω από την επιφάνεια του υπό εξέταση ιστού.

Στην πραγματικότητα, οι απαρχές της ιδέας για τη μέθοδο αυτή δεν είναι τόσο πρόσφατες. Προτάθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1980 από τους Barber και Brown του τμήματος Medical Physics and Clinical Engineering στο Sheffield στο Ηνωμένο Βασίλειο. Ωστόσο η πρώτη θεωρητική μελέτη αποδίδεται στον J. Webster (1978). Έκτοτε η μέθοδος αυτή κατάφερε να αποσπάσει το ενδιαφέρον μιας ευρείας

κατηγορίας επιστημονικών κλάδων. Σε αυτούς περιλαμβάνονται μαθηματικοί που μελετούν αντίστροφα προβλήματα (inverse problems), φυσικοί που μελετούν τις ιδιότητες των αντιστάσεων που παρουσιάζουν οι βιολογικοί ιστοί (bioimpedance), ηλεκτρονικοί και προφανώς ο κλάδος της ιατρικής, όπου είναι θεμελιώδους σημασίας να ξεπεραστούν προβλήματα, τεχνικά και μη, που παρουσιάζουν οι παρούσες μέθοδοι απεικόνισης.

Στη διάρκεια της δεκαετίας του '90 σημαντικές θεωρητικές μελέτες πάνω στο αντικείμενο της EIT πραγματοποιούνται από τον John Webster (1990), από τον David Holder^[2] (1993) και από τους Rigaud και Morucci (1996). Αρκετές μελέτες και πρακτικές υλοποιήσεις συστημάτων ακολούθησαν την επόμενη εικοσαετία. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή ακόμα δεν χρησιμοποιείται ευρέως. Πιλοτικά αναπτύχθηκαν κάποιες εφαρμογές από το πανεπιστήμιο του Gottingen (με 16 ηλεκτρόδια μέτρησης), τη Maltron International (Sheffield Mark 3.5 System, 16 ηλεκτρόδια) και το πανεπιστήμιο του Sao Paolo στη Βραζιλία (σύστημα Enlight 1800 των 32 ηλεκτροδίων μέτρησης, διατέθηκε στην Timpel SA). Τα συστήματα αυτά που ανταποκρίνονται στις προδιαγραφές ασφαλείας που τίθενται από τη νομοθεσία, έχουν χρησιμοποιηθεί κατά κύριο λόγο από κλινικές ερευνητικές ομάδες σε νοσοκομεία.



Εικόνα 1: Ηλεκτρική τομογραφία σύνθετης αντίστασης με σύστημα Pulmo Vista^[3]

Το 2011, η Dräger Medical διέθεσε το πρώτο σύστημα EIT απεικόνισης πνευμονικών ιστών για καθημερινή ιατρική χρήση (Pulmo Vista, 16 ηλεκτρόδια). Το 2014 η Swisstom AG παρουσίασε ένα σύστημα 32 ηλεκτροδίων μέτρησης (Swisstom

BB²), το οποίο πρόκειται σύντομα να διατεθεί σε αρκετές περιοχές της δυτικής Ευρώπης. Παράλληλα, έχουν αρχίσει να αναπτύσσονται συστήματα ηλεκτρικής τομογραφίας πολλαπλών συχνοτήτων (MF-EIT) που έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικά στον εντοπισμό κακοήθων όγκων. Ένα τέτοιο σύστημα (Zed ScanI) διατέθηκε το 2013 από τη Zilico Limited.



Εικόνα 2: Σύστημα Ηλεκτρικής Τομογραφίας κατασκευασμένο από τη Swisstom (Swisstom BB2) και συνοδευόμενο από κατάλληλο λογισμικό απεικόνισης και διεπαφής χρήστη

2. Εφαρμογές

Ήδη έχει καταστεί σαφές ότι η τομογραφία ηλεκτρικής σύνθετης αντίστασης βρίσκει πληθώρα ιατρικών εφαρμογών. Σε πολλά ιατρικά προβλήματα απαιτείται η γνώση της χρονικά μεταβαλλόμενης κατανομής των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του ανθρώπινου σώματος, όπως η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η διηλεκτρική σταθερά. Η **Ηλεκτρική αγωγιμότητα** (electrical conductance) εκφράζει την ευκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα περνάει μέσα από κάποιο αντικείμενο και αποτελεί το δυαδικό μέγεθος της ηλεκτρικής αντίστασης. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα δείχνει την απόκριση του υλικού εάν εφαρμοστεί σε αυτό διαφορά δυναμικού. Όσο μεγαλύτερη είναι η αγωγιμότητα του υλικού τόσο περισσότερο ηλεκτρικό ρεύμα θα ρεύσει εντός του υλικού. Η διηλεκτρική σταθερά αντικατοπτρίζει το πόσο εύκολα διαχωρίζονται τα φορτία σε ένα υλικό, όταν αυτό βρίσκεται υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου. Τα υλικά με υψηλή αγωγιμότητα επιτρέπουν τη ροή τόσο συνεχών όσο και εναλλασσόμενων ρευμάτων, ενώ τα υλικά με μεγάλη διηλεκτρική σταθερά επιτρέπουν τη ροή μόνο εναλλασσόμενων ρευμάτων. Από το γεγονός ότι υπάρχουν πάρα πολλά διαφορετικά είδη ιστών με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες είναι

προφανές το πόσο χρήσιμη είναι η γνώση των χαρακτηριστικών αυτών σε ιατρικές εφαρμογές.

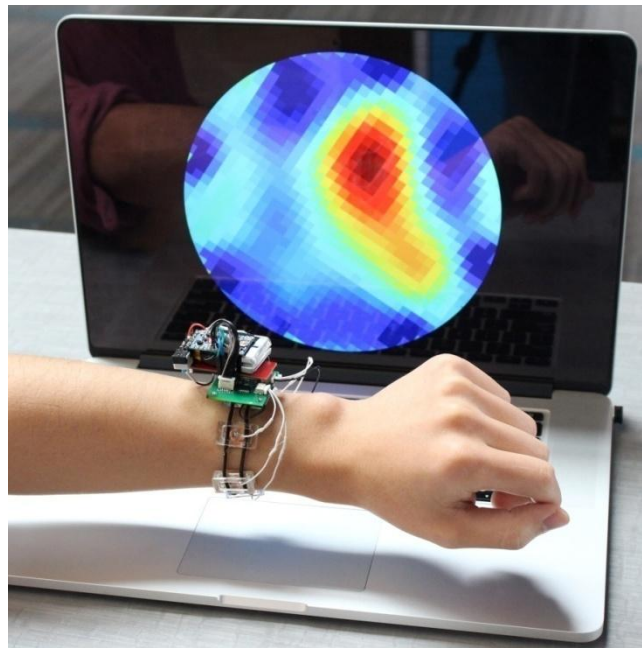
Μια σημαντική ιατρική εφαρμογή είναι η απεικόνιση του ιστού των πνευμόνων, για τον εντοπισμό θρόμβων ή εμβολής. Η πνευμονική εμβολή είναι μια συνήθης και σοβαρή επιπλοκή που εμφανίζεται μετά από χειρουργείο. Μέχρι στιγμής, η διαδικασία της διάγνωσης προϋποθέτει την εισαγωγή στον οργανισμό ραδιενεργών ουσιών, ώστε να γίνουν εμφανείς οι περιοχές των πνευμόνων με κανονική ροή αέρα, καθώς και η κυκλοφορία του αίματος. Οι εικόνες από την κυκλοφορία τους αίματος και του αέρα στους πνεύμονες συγκρίνονται και εντοπίζονται οι περιοχές που υπάρχει ροή αέρα, αλλά όχι αιμάτωση. Αυτές οι περιοχές υποδεικνύουν σημεία όπου υπάρχει πνευμονική εμβολή. Δεδομένου ότι οι πνευμονικοί ιστοί, το αίμα και ο αέρας έχουν διαφορετικά τα προαναφερθέντα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, καθίσταται σαφές ότι η ηλεκτρική τομογραφία σύνθετης αντίστασης θα μπορούσε κάλλιστα να συνεισφέρει την εφαρμογή αυτή. Το σημαντικότερο όφελος εδώ είναι η αποφυγή της χρήσης ραδιενεργών ουσιών και ακτινοβολίας που είναι επιβλαβή μακροπρόθεσμα για τον οργανισμό.

Πέρα από αυτό, η δυνατότητα απεικόνισης της ροής αέρα στους πνεύμονες διευκολύνει και άλλες ιατρικές διαδικασίες. Για παράδειγμα, στην περίπτωση οξείας πνευμονικής βλάβης ή σε σύνδρομο οξείας αναπνευστικής δυσχέρειας, η μηχανική υποστήριξη της αναπνοής είναι ζωτικής σημασίας για τους βαριά πάσχοντες ασθενείς. Δυστυχώς, έχει αποδειχτεί ότι η τοποθέτηση μηχανικής υποστήριξης της αναπνοής συνοδεύεται από επιδείνωση των πνευμονικών τραυμάτων και, κατά συνέπεια, αυξημένη πιθανότητα θανάτου. Μέσω της περιγραφόμενης σε αυτήν την εργασία μεθόδου δίνεται η δυνατότητα απεικόνισης της υπερέκτασης ή καταστροφής του πνευμονικού ιστού κατά την τεχνητή υποστήριξη της αναπνοής σε ασθενείς με τα προαναφερθέντα προβλήματα.

Μια ακόμα σημαντική εφαρμογή της ηλεκτρικής τομογραφίας σύνθετης αντίστασης αποτελεί η ανίχνευση κακοηθών νεοπλασιών σε αρκετές περιοχές του σώματος, ιδιαίτερα στην περιοχή των πνευμόνων και του εγκεφάλου. Ουσιαστικά γίνεται χρήση της χαρακτηριστικής ιδιότητας των όγκων, δηλαδή του γεγονότος ότι η αντίστασή τους διαφέρει σημαντικά από την αντίστοιχη του περιβάλλοντος υγιούς ιστού. Αντιλαμβανόμαστε τη χρησιμότητα της μεθόδου, καθώς αποφεύγονται εκτεταμένες και χρονοβόρες διαδικασίες συνεχούς δειγματοληψίας ιστών και

βιοψίας. Έτσι, σε πρώτη φάση είναι δυνατή η ανίχνευση ύπαρξης καρκινικών μορφωμάτων με αποφυγή επεμβατικών μεθόδων, ακτινοβολιών και περαιτέρω ταλαιπωρίας του ασθενούς.

Οι εφαρμογές της ηλεκτρικής τομογραφίας όμως δεν περιορίζονται σε αυστηρά ιατρικές εφαρμογές και μπορούν να συνδεθούν και με πολλούς άλλους κλάδους, συγγενικούς ή μη. Μέσω της απεικόνισης σύνθετης αντίστασης στο χώρο που "σαρώνει" η συστοιχία των ηλεκτροδίων, όπως αναφέρθηκε εντοπίζουμε τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του μέσου. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η ανακατασκευή ενός μοντέλου προσομοίωσης τμημάτων των ιστών με χρήση υλικών ανάλογων φυσικών ιδιοτήτων. Αυτό θα μπορούσε να έχει μεγάλη χρήση σε τομείς όπως η ρομποτική (για ιατρική ή μη χρήση από ρομποτική χειρουργική ως κατασκευή ευφυϊών ρομποτικών κυττάρων για χειρονακτική εργασία), τα συστήματα ασφαλείας μέσω αναγνώρισης μοναδικών σωματικών χαρακτηριστικών (hand gesture, κ.λ.π.).

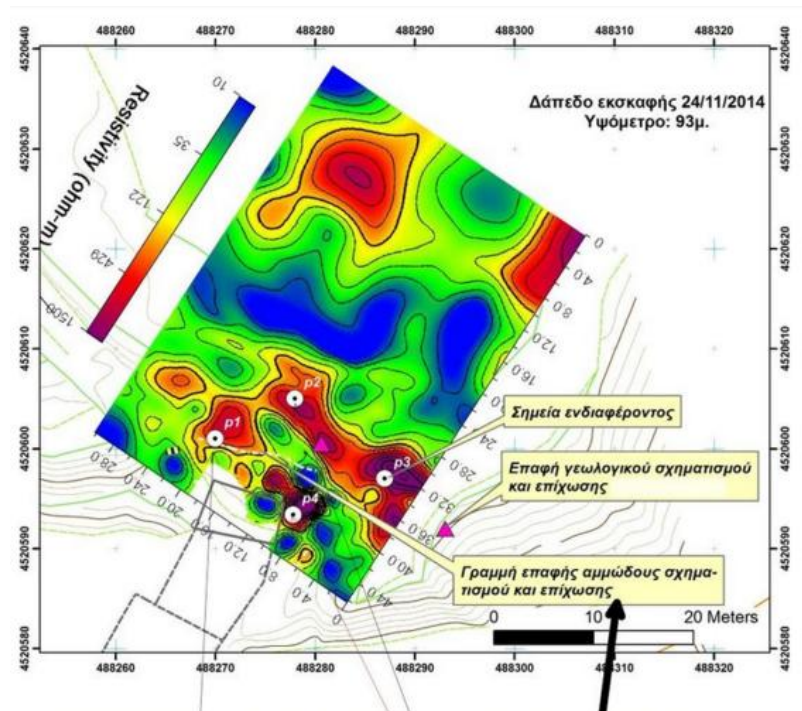


Εικόνα 3: Χρήση της EIT για αναγνώριση κίνησης χεριού. (Tomo: Wearable, Low-Cost Electrical Impedance Tomography for Hand Gesture Recognition)

Πέραν όμως των παραϊατρικών και ρομποτικών εφαρμογών και γενικότερα των εφαρμογών που αφορούν στην απεικόνιση αυστηρά ανθρώπινων ιστών, η ηλεκτρική τομογραφία σύνθετης αγωγιμότητας σαν μέθοδος χρησιμεύει στους τομείς της γεωλογίας, της σεισμογραφίας και κατ'επέκταση της αρχαιολογίας και της ανίχνευσης παντός είδους αντικειμένων που εντοπίζονται κάτω από την επιφάνεια της γης. Γνωρίζοντας τις χαρακτηριστικές ηλεκτρικές ιδιότητες του αντικειμένου μπορούμε να αποφανθούμε όχι μόνο για το είδος του αλλά και για το σε πόσο

περίπου βάθος ενδέχεται να βρίσκεται θαμμένο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης της μεθόδου στη σεισμολογία αποτελεί η μέθοδος BAN, η οποία αποτελεί ένα πειραματικό τρόπο πρόβλεψης σεισμικής δραστηριότητας μέσω της ανίχνευσης σεισμικών ηλεκτρικών κυμάτων μέσα από το έδαφος (SES, Seismic Electric Signals).

Στον τομέα της αρχαιολογίας χαρακτηριστικό και σχετικά πρόσφατο παράδειγμα της χρήσης παρεμφερούς μεθόδου αποτελεί η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον εντοπισμό του τύμβου της Αμφίπολης από ομάδες αρχαιολόγων-γεωλόγων. (Three-dimensional Electric Resistivity Tomography (ERT)).



Σχήμα 1: Ηλεκτρική τομογραφία στο λόφο του τύμβου Καστά, Αμφίπολη Σερρών

Σε κάθε περίπτωση, η μέθοδος ηλεκτρικής τομογραφίας αποτελεί ακόμα μια πειραματική κυρίως απεικόνιση εσωτερικών δομών που βρίσκεται σε εξελκτικό στάδιο, αναπτύσσεται διαρκώς και στο εγγύς μέλλον έχει τη δυνατότητα να διαδραματίσει ακόμα πιο σημαντικό ρόλο σε πολλούς επιστημονικούς κλάδους. Το μόνο σίγουρο είναι το ότι οι προεκτάσεις των εφαρμογών της εισέρχονται σε όλους σχεδόν τους τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας.

3. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου

Η μέθοδος της Ηλεκτρικής Τομογραφίας Σύνθετης Αντίστασης έχει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις υπόλοιπες ιατρικές απεικονιστικές τεχνικές. Οι σημαντικότερες υπεροχές αφορούν στο τάξης μεγέθους χαμηλότερο κόστος

κατασκευής και εφαρμογής της ΕΙΤ σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς αξονικούς και μαγνητικούς τομογράφους των οποίων το κόστος μπορεί να αγγίζει αρκετές δεκάδες χιλιάδες ευρώ, καθιστώντας την αγορά τους απαγορευτική για μικρά ιατρεία και μικρές τοπικές κλινικές. Αντιθέτως ένα εξελιγμένο σύστημα ηλεκτρικής τομογραφίας διακρίνεται από ένα λογικό για βιοϊατρική εφαρμογή κόστος το οποίο θα μπορούσε να επιτρέψει την αγορά του από οιαδήποτε ιατρική μονάδα. Στο τελευταίο μάλιστα συμβάλλει ξεκάθαρα και η εύκολη δυνατότητα μεταφοράς του, καθώς έχει γενικά μικρό μέγεθος και βάρος, μπορεί ακόμα και να φορηθεί από τον υπό εξέταση ασθενή. Αντίθετα τα συστήματα CT, x-ray, MRI, κ.λ.π. διακρίνονται από τεράστιο όγκο και βάρος και σε συνδυασμό με το τεράστιο κόστος τους και τη σπανιότητα της εξόπλισής τους ανά περιοχή αυξάνει την ταλαιπωρία του ασθενούς καθώς μια εξέταση τέτοιου τύπου αποτελεί μια αρκετά μεγάλη διαδικασία που απαιτεί χρόνο και χρήμα.



Εικόνα 4: Σύστημα αξονικού τομογράφου σύγχρονης γενιάς. Αντιλαμβάνεται εύκολα κανείς το μέγεθος και το κόστος ενός τέτοιου εξοπλισμού.

Επιπρόσθετα, η ταχύτητα λήψης των δεδομένων και σχηματισμού της εικόνας της εσωτερικής δομής που εξετάζεται είναι ασύγκριτα υψηλότερη από την αντίστοιχη των άλλων σύνθετων τρόπων απεικόνισης, καθότι απαιτούνται μόνο λίγα δευτερόλεπτα, χρόνος που αυξάνεται με την αύξηση της ανάλυσης του συστήματος, αλλά βελτιώνεται με τη χρήση όλο και πιο "έξυπνων" αλγορίθμων απεικόνισης,

ταχύτερων επεξεργασιών μετρήσεων και γενικότερα βελτιωμένου υλικού και λογισμικού. Παράλληλα, ο ηλεκτρικός τομογράφος δίνει τη δυνατότητα απεικόνισης μιας χρονικά μεταβαλλόμενης εικόνας, ώστε ουσιαστικά μπορούμε να λαμβάνουμε μια ζωντανή εικόνα του εσωτερικού ιστού που εξετάζεται.

Μια ακόμα σημαντική παράμετρος υπεροχής των συστημάτων ηλεκτρικής τομογραφίας είναι τα μεγάλα επίπεδα ασφαλείας που παρέχουν στον ασθενή. Η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που διαχέεται στους ιστούς μέσω των ηλεκτροδίων είναι αρκετά επίπεδα κάτω από τα μέγιστα επιτρεπτά όρια ασφαλείας, ώστε ο ασθενής δεν θα αισθάνεται καν το ρεύμα που τον διαπερνά. Σημαντικό όμως είναι και το γεγονός ότι στην απεικονιστική αυτή τεχνική δεν χρησιμοποιούνται καθόλου ακτινοβολία, ραδιενεργές ουσίες ή τοξικά αέρια, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες τεχνικές, η συχνή χρήση των οποίων έχει μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στην υγεία των ασθενών και προφανώς δεν ενδείκνυται.

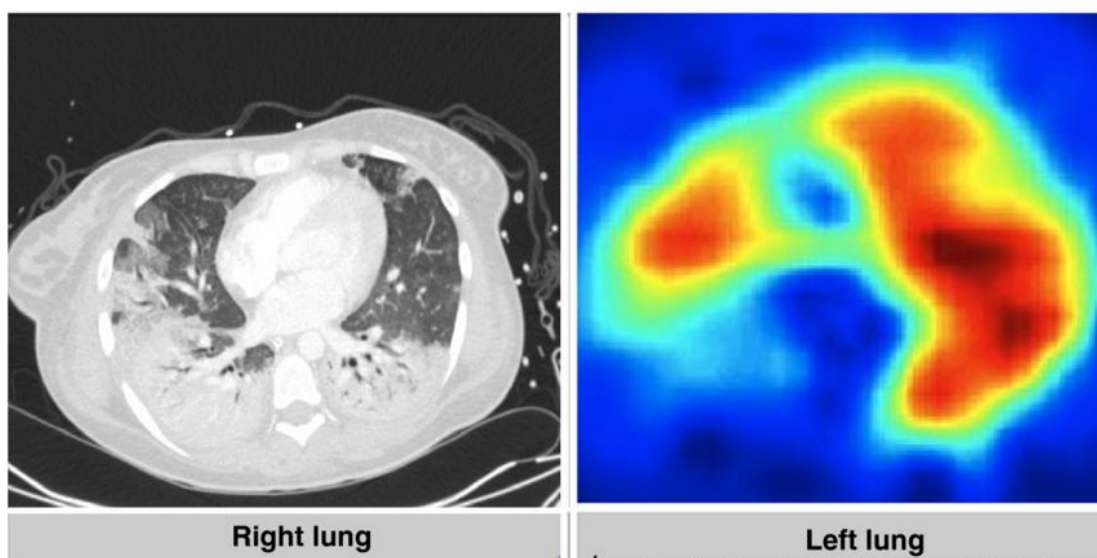
Τέλος, προφανώς η EIT αποτελεί μια μη επεμβατική μέθοδο, καθώς μόνο η επιφάνεια του δέρματος του ασθενή έρχεται σε επαφή με τα ηλεκτρόδια κατόπιν μάλιστα ελάχιστης τυπικής προετοιμασίας. Αυτό σημαίνει ελάχιστη ταλαιπωρία για τον ασθενή καθώς ελάχιστος χρόνος απαιτείται ενώ η διαδικασία δεν είναι καθόλου επίπονη.

Παρά τα παραπάνω πλεονεκτήματα ωστόσο, η ηλεκτρική τομογραφία σύνθετης αντίστασης διαθέτει σοβαρά μειονεκτήματα σε σχέση με τις υπόλοιπες απεικονιστικές τεχνικές. Το σημαντικότερο από αυτά είναι η χαμηλής ποιότητας εικόνα που λαμβάνεται.

Πιο συγκεκριμένα, το βασικό πρόβλημα εμφανίζεται στη σύνθεση της εικόνας από τις μετρήσεις των τάσεων που λαμβάνονται από τα ηλεκτρόδια που είναι τοποθετημένα στην περιφέρεια του σώματος. Αυτό συμβαίνει, διότι το αντίστροφο πρόβλημα της ανακατασκευής της εικόνας (inverse imaging reconstruction) από τα σήματα που ανακτώνται είναι μη γραμμικό και γενικά κακώς ορισμένο, εφόσον παρουσιάζεται αστάθεια και σφάλματα στις μετρήσεις και προσεγγίσεις στη μοντελοποίηση. Ειδικότερα, τα εγγεόμενα ρεύματα επηρεάζονται μη γραμμικά από τη γενική κατανομή των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του σώματος. Όταν εγγέεται ρεύμα περιφερικά του σώματος, οι αλλαγές που συντελούνται στις εσωτερικές ροές των ρευμάτων επιδρούν στις μεταβλητές περιφερικές τάσεις. Τέτοιου είδους αλλαγές, όμως, δεν είναι επηρεάζουν αισθητά τις τάσεις που μετρώνται σε σημεία μακριά από

τα σημεία έγχυσης ρεύματος. Επομένως, το αντίστροφο πρόβλημα της τομογραφίας ηλεκτρικής αγωγιμότητας έχει κάποια κακώς ορισμένα χαρακτηριστικά, με συνέπεια να δυσχεραίνεται η ανακατασκευή ακριβούς στατικής εικόνας με μεγάλη διακριτική ικανότητα σε πραγματικό περιβάλλον, όπου τα σφάλματα στις μετρήσεις είναι αναπόφευκτα.

Στην κακή ποιότητα εικόνας όμως συντελεί και το γεγονός ότι οι περισσότερες υλοποιήσεις της μεθόδου έχουν ως τώρα περιορισμένο αριθμό ηλεκτροδίων για λήψη μετρήσεων, με αποτέλεσμα τη λήψη περιορισμένου όγκου πληροφοριών από τις περιφερικές μετρήσεις. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι για υψηλότερη ποιότητα δεδομένων, απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός ηλεκτροδίων. Οι δυσκολίες σε αυτό είναι αρκετές τόσο σχεδιαστικά και προγραμματιστικά όσο και τεχνικά, καθώς γίνεται δυσχερέστερη η τοποθέτηση μεγάλου αριθμού ηλεκτροδίων, ενώ αυξάνεται και το περιθώριο σφαλμάτων.



Εικόνα 5: Σύγκριση εικόνας που λαμβάνεται από αξονική υπολογιστική τομογραφία -CT (αριστερά) και ηλεκτρική τομογραφία σύνθετης αντίστασης -EIT (δεξιά), για την απεικόνιση των πνευμονικών ιστών

Με την εξέλιξη των συστημάτων ηλεκτρικής τομογραφίας σύνθετης αγωγιμότητας συντελούνται αξιόλογες προσπάθειες για την αντιμετώπιση των παραπάνω μειονεκτημάτων, ούτως ώστε να καταστεί δυνατή η ευρεία χρήση της μεθόδου στον τομέα της βιοϊατρικής, πέρα από το πειραματικό στάδιο στο οποίο βρίσκεται εδώ και περίπου δυο δεκαετίες. Το εγχείρημα αυτό περιλαμβάνει προσθήκες και βελτιώσεις τόσο σε επίπεδο υλικού, με τη χρήση περισσότερων ηλεκτροδίων, καλύτερης ποιότητας κυκλωμάτων (ολοκληρωμένων και συνδέσεων, υλικού κατασκευής, κ.ά.) , βελτιωμένου συστήματος αποθορυβοποίησης και

ψηφιακής μετατροπής, ταχύτερων επεξεργασιών, κλπ., όσο και σε επίπεδο λογισμικού, όπου πραγματοποιείται υψηλού επιπέδου προγραμματισμός για την αποθορυβοποίηση και απεικόνιση μέσω ειδικών αλγορίθμων, οι οποίοι εκτός των άλλων, θα αξιοποιούν ολοένα και καλύτερα συγκεκριμένο αριθμό μετρήσεων για την παραγωγή περισσότερης πληροφορίας. Ήδη περίπου την τελευταία πενταετία διατίθενται στο εμπόριο τα πρώτα σχετικά αποτελεσματικά συστήματα ηλεκτρικών τομογράφων για ιατρική χρήση, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως εν μέσω χαρακτηριστικών παραδειγμάτων.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η κατασκευή ενός φορητού και σχετικά προσιτού συστήματος 64 ηλεκτροδίων μέτρησης, με χαμηλά σφάλματα μέτρησης, υψηλή ταχύτητα λήψης μετρήσεων και φυσικά δυνατότητα άμεσης επέκτασης τόσο του αριθμού των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται όσο και των συνολικών δυνατοτήτων της εφαρμογής. Άμεσος στόχος είναι η βελτίωση της εικόνας τόσο σε ανάλυση όσο και σε επίπεδο σφαλμάτων.

4. Μέθοδοι τοποθέτησης ηλεκτροδίων

Για την κατασκευή ενός αξιόπιστου συστήματος συλλογής δεδομένων, καθοριστική είναι η επιλογή της μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί στην τοποθέτηση και χρήση των ηλεκτροδίων, ώστε να λαμβάνεται η μεγαλύτερη δυνατή ποσότητα πληροφοριών σχετικά με τις ηλεκτρικές ιδιότητες του προς μέτρηση αντικειμένου. Η προσεκτική και επιτυχημένη επιλογή της μεθόδου έχει μεγάλη σημασία, διότι πρέπει να λαμβάνεται ένα πλήρες σύνολο ανεξάρτητων μετρήσεων. Σε διαφορετική περίπτωση, η εικόνα που θα προκύψει από την ανακατασκευή του αντίστροφου μοντέλου θα είναι αλλοιωμένη και αναξιόπιστη.

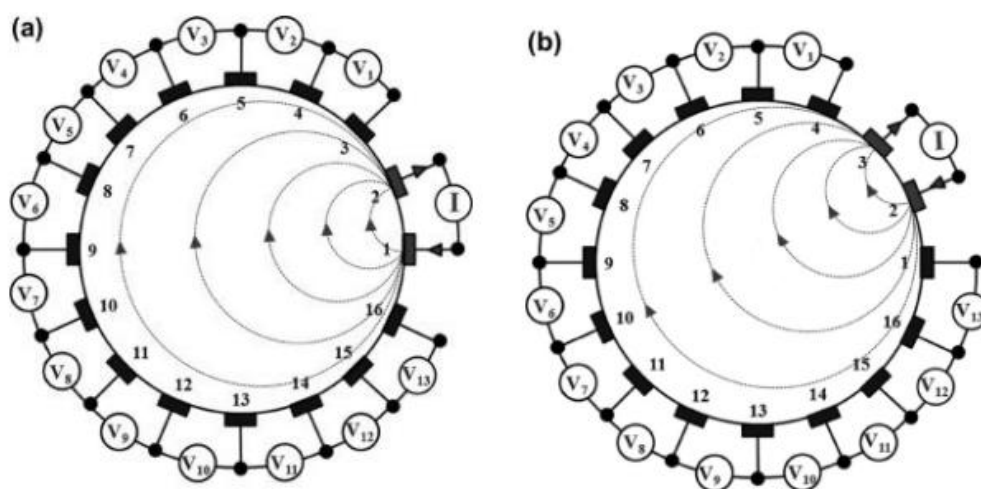
Υπάρχουν τέσσερις βασικές τεχνικές τοποθέτησης ηλεκτροδίων με χρήση ενός ζεύγους για πηγή ρεύματος και όλων των υπολοίπων για τη λήψη των μετρήσεων, η παρακείμενη στρατηγική, η αντιθετική, η διαγώνια και η στρατηγική αγωγίμου ορίου.

4.1. Η παρακείμενη τοποθέτηση

Κατά τη μέθοδο αυτή (adjacent current driven protocol) , εφαρμόζεται ρεύμα ανάμεσα σε δύο γειτονικά ηλεκτρόδια (δηλαδή δημιουργούμε μια πηγή ρεύματος μεταξύ δυο διαδοχικών ηλεκτροδίων) και λαμβάνονται μετρήσεις τάσεων από τα διαδοχικά ζεύγη όλων των υπόλοιπων περιφερικών ηλεκτροδίων. Έπειτα, δίνεται ρεύμα στο επόμενο ζεύγος ηλεκτροδίων και επαναλαμβάνονται οι αντίστοιχες

μετρήσεις τάσης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου έχουν πραγματοποιηθεί όλες οι απαραίτητες ανεξάρτητες μετρήσεις. Ουσιαστικά, από προγραμματιστικής άποψης, οι μετρήσεις πραγματοποιούνται μέσα σε δυο εμφωλευμένους επαναληπτικούς βρόχους. Η παρατήρηση αυτή έχει μεγάλη σημασία στη δημιουργία του προγραμματιστικού αλγορίθμου με τον οποίο θα οδηγείται το ρεύμα και θα λαμβάνονται οι τάσεις μέσα από τα ηλεκτρόδια. Με συνολικό αριθμό ηλεκτροδίων N , η μέθοδος αυτή απαιτεί συνολικά N^2 μετρήσεις. Ωστόσο, από αυτές, μόνο οι $N(N-1)/2$ μετρήσεις είναι ανεξάρτητες.^[1] Επιπρόσθετα, η τάση δεν μετράται στα ηλεκτρόδια έγχυσης ρεύματος για αποφυγή προβλημάτων της αντίστασης επαφής του εκάστοτε ηλεκτροδίου με τον ηλεκτρολύτη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του αριθμού των ανεξάρτητων μετρήσεων σε $N(N-3)/2$. Παρόλα αυτά υπάρχει η δυνατότητα λήψης τάσεων και από τα ηλεκτρόδια έγχυσης ρεύματος κάθε φορά με τη χρήση ειδικών αντιστάσεων τεσσάρων ακροδεκτών.

Το βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η μη ομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος, καθώς το περισσότερο ρεύμα ρέει κοντά στα περιφερικά ηλεκτρόδια. Αυτό σημαίνει ότι η ένταση του ρεύματος στο κέντρο του δείγματος είναι σχετικά χαμηλή, με συνέπεια η μέθοδος να αποκτά υψηλή ευαισθησία στη μέτρηση θορυβικών σφαλμάτων. Προσφέρει, όμως, και εξαιρετικά πλεονεκτήματα, καθώς απαιτεί ελάχιστο ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό, ενώ η ανακατασκευή της επιθυμητής εικόνας μπορεί να πραγματοποιηθεί σχετικά γρήγορα και χωρίς μεγάλες υπολογιστικές απαιτήσεις.^[3]

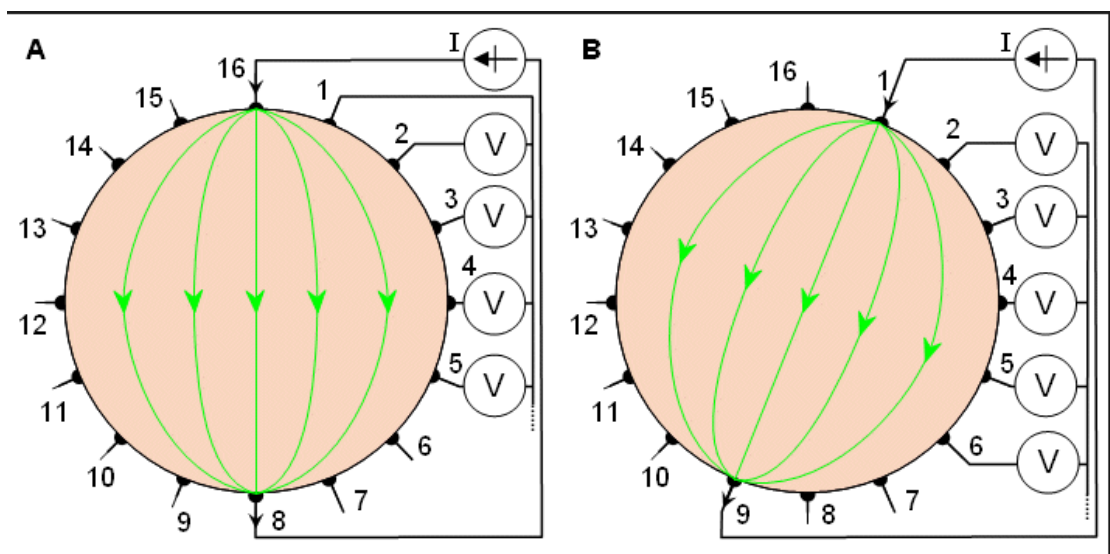


Σχήμα 2: Διάγραμμα παρουσίασης του τρόπου λειτουργίας της παρακείμενης μεθόδου (σε σύστημα 16 ηλεκτροδίων). Απεικονίζονται οι 2 πρώτες μεγάλες "επαναλήψεις", στις οποίες η πηγή ρεύματος τοποθετείται στα ζεύγη ηλεκτροδίων 1-2 και 2-3 αντίστοιχα^[4]

4.2. Η αντιθετική τοποθέτηση

Εδώ τα δυο άκρα της πηγής ρεύματος εφαρμόζονται σε ηλεκτρόδια τα οποία βρίσκονται σε ακριβώς αντιδιαμετρικές θέσεις μεταξύ τους. Ως τάση αναφοράς (voltage reference) χρησιμοποιείται αυτή που δίνει το ηλεκτρόδιο που βρίσκεται δίπλα στο ηλεκτρόδιο έκχυσης ρεύματος (I_{in}). Έτσι μετρώνται όλες οι υπόλοιπες τάσεις πλην αυτής στα ηλεκτρόδια έκχυσης, σε σχέση με την τάση αναφοράς. Στη συνέχεια αφού μετρηθούν οι τάσεις αυτές, ως νέα άκρα της πηγής ρεύματος λαμβάνεται το επόμενο κατά ωρολογιακή φορά ζεύγος αντιδιαμετρικών ηλεκτροδίων. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου ληφθούν όλες οι ανεξάρτητες μετρήσεις.

Η μέθοδος αυτή χαρακτηρίζεται από μικρότερη ευαισθησία στις μετρήσεις σε σχέση με την προηγούμενη, καθώς το περισσότερο ρεύμα ρέει προς το κέντρο της δομής που εξετάζεται. Το ρεύμα ρέει ομοιόμορφα και αυτό μας προσφέρει καλύτερη διακριτική ικανότητα. Παρόλα αυτά, για δεδομένο αριθμό ηλεκτροδίων έχουμε σημαντικά λιγότερες σε πλήθος ανεξάρτητες μετρήσεις από ότι στην παρακείμενη μέθοδο. Συγκεκριμένα, αν θεωρήσουμε N το πλήθος των ηλεκτροδίων μέτρησης που χρησιμοποιούνται στη διάταξη, οι ανεξάρτητες μετρήσεις προκύπτουν $M = N/4(3N/2 - 1)$. Αποδεικνύεται μαθηματικά ότι $N(3N/2 - 1)/4 < N(N - 3)/2$ για $N > 5$ ενώ όσο το πλήθος N αυξάνεται τόσο μεγαλύτερη και εμφανέστερη η διαφορά στην ανάλυση. Δεδομένου ότι στοχεύουμε σε χρήση μεγάλου σχετικά αριθμού ηλεκτροδίων, η μέθοδος αυτή δεν προτιμάται.

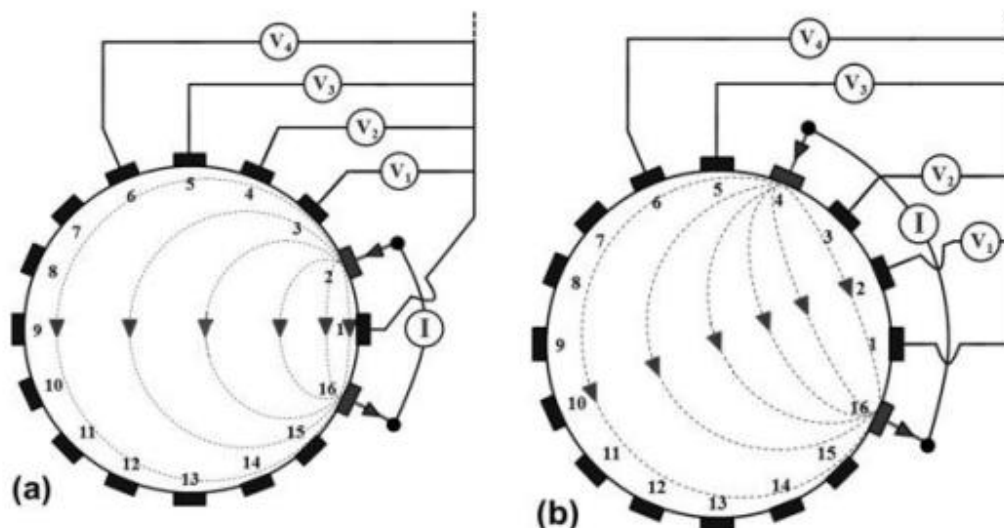


Σχήμα 3: Διάγραμμα της αντιθετικής τοποθέτησης ηλεκτροδίων ρεύματος, για $N=16$ ηλεκτρόδια

4.3. Η διαγώνια τοποθέτηση

Η διαγώνια μέθοδος (μέθοδος σταυρού), έχει ως γνώρισμα την έκχυση ρεύματος σε ηλεκτρόδια που βρίσκονται σε σχετικά μεγάλη απόσταση μεταξύ τους. Αυτό πρακτικά σημαίνει πιο ομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος σε σχέση με την παρακείμενη στρατηγική. Το βασικό όμως μειονέκτημα της μεθόδου είναι η ιδιαίτερα περίπλοκη πραγματοποίηση των μετρήσεων. Γενικά η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται εξαιρετικά σπάνια. Στη διαγώνια τοποθέτηση, διαδοχικά ηλεκτρόδια επιλέγονται σαν αναφορά ρεύματος και τάσης.

Συγκεκριμένα, αν ένα σύστημα διαθέτει N (άρτιος αριθμός) ηλεκτρόδια, το ηλεκτρόδιο N χρησιμοποιείται ως αναφορά ρεύματος και το ηλεκτρόδιο 1 ως αναφορά τάσης, σε πρώτη φάση. Εφαρμόζεται ρεύμα στο ηλεκτρόδιο 2, και λαμβάνονται $N-3$ μετρήσεις τάσης από τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια, και συγκεκριμένα μεταξύ των ζευγών 1-3, 1-4,... , 1-($N-1$). Έπειτα το ρεύμα εκχέεται μεταξύ των ηλεκτροδίων N και 4 και λαμβάνουμε άλλες $N-3$ μετρήσεις με αναφορά τάσης και πάλι αυτή του ηλεκτροδίου 1. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για τα ζεύγη πηγών ρεύματος ($N-8$), ($N-10$)...($N-(N-2)$). Προκύπτουν επομένως $(N/2-1)(N-3)$ μετρήσεις. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται ακόμα μια φορά, με ηλεκτρόδια αναφοράς ρεύματος και τάσης τα 3 και 2 αντίστοιχα αυτή τη φορά. Έτσι, το ρεύμα εκχέεται μεταξύ των 3 και 5,7,11... $N-1$,1) ενώ η τάση μετράται από τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια κάθε φορά. Έτσι προκύπτουν άλλες τόσες μετρήσεις με συνολικό αριθμό $2(N/2-1)(N-3)$. Παρόλα αυτά, για $N=16$, μόνο 104 από τις 182 μετρήσεις που λαμβάνονται είναι ανεξάρτητες. Η διαγώνια στρατηγική δεν έχει τόσο καλή ευαισθησία στην περιφέρεια όσο η παρακείμενη μέθοδος, αλλά έχει καλύτερη ευαισθησία στο εσωτερικό της δομής υπό εξέταση.

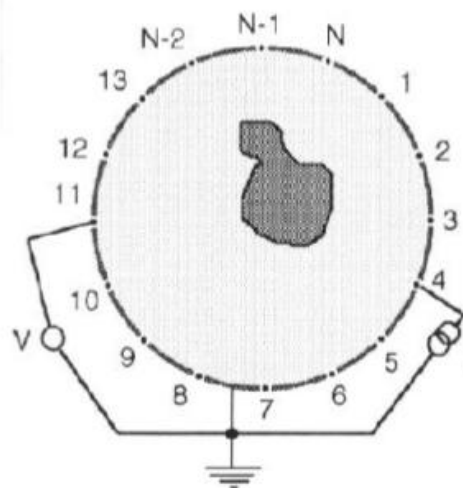


Σχήμα 4: Σχηματική απεικόνιση της διαγώνιας μεθόδου για δυο ζεύγη πηγής ρεύματος^[4]

4.4. Η τοποθέτηση αγώγιμου ορίου

Ονομάζεται και τριγωνομετρική μέθοδος. Εδώ χρειάζονται μόνο δύο ηλεκτρόδια για την πραγματοποίηση της κάθε μέτρησης, σε σύγκριση με τις προηγούμενες μεθόδους όπου απαιτούνται τέσσερα. Η σχετικά μεγάλη επιφάνεια του αγώγιμου συνόρου ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο για την τάση και το ηλεκτρόδιο για το ρεύμα χρησιμοποιείται ως καταβόθρα ρεύματος, για να μειωθεί η τάση κοινού σήματος στα ηλεκτρόδια μέτρησης, έως και οκτακόσιες φορές σε σχέση με την παρακείμενη στρατηγική. Επομένως, σε αυτή τη μέθοδο, δεν είναι απαραίτητη η χρήση τεχνικών ανάδρασης κοινού σήματος ή τεχνητής γείωσης. Επιπλέον, το γειωμένο αγώγιμο σύνορο μειώνει την επίδραση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών.

Εκτός, όμως, από την τάση κοινού σήματος, μειωμένο είναι και το πλάτος των μετρούμενων τάσεων έως και επτά φορές σε σχέση με την παρακείμενη στρατηγική, για δείγματα ιδανικού σχήματος. Εξαιτίας αυτών των δύο δεδομένων, η τελική ευαισθησία αυτών των δύο στρατηγικών είναι παραπλήσια.



Σχήμα 5: Σχηματική απεικόνιση της τοποθέτησης των ηλεκτροδίων κατά την στρατηγική αγωγίμου ορίου^[1]

5. Κριτήρια και επιλογή τοποθέτησης για τη διάταξη

Για την τελική επιλογή της μεθόδου τοποθέτησης των ηλεκτροδίων τάσης και ρεύματος για την παρούσα διάταξη πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι στη διάταξή μας σκοπός είναι η μέτρηση τάσης μεταξύ δυο ηλεκτροδίων που έχουν τοποθετηθεί περιμετρικά γύρω από τον ασθενή στο σημείο που εξετάζεται. Οι τάσεις που θα ληφθούν πρέπει να υποστούν κατάλληλη επεξεργασία για την τελική απεικόνιση του υπό εξέταση ιστού. Επίσης πρέπει να ληφθεί υπόψη η μέγιστη ανάλυση που μπορεί να προσφέρει η κάθε μέθοδος, η οποία είναι ανάλογη των ανεξάρτητων μετρήσεων που λαμβάνονται. Επομένως επιθυμούμε μια μέθοδο που προσφέρει με δεδομένο πλήθος ηλεκτροδίων περισσότερες ανεξάρτητες μετρήσεις. Ένα ακόμα βασικό κριτήριο είναι φυσικά η ακρίβεια και η ευαισθησία που προσφέρει η κάθε στρατηγική καθώς επίσης και η δυνατότητά της να υλοποιηθεί σε επίπεδο τόσο υλικού όσο και προγραμματιστικό. Με βάση τις παρατηρήσεις που πραγματοποιήθηκαν παραπάνω σε κάθε στρατηγική, επιλέγεται η παρακαείμενη στρατηγική τοποθέτησης ηλεκτροδίων. Πέρα από το γεγονός ότι εξυπηρετεί καλύτερα τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, καθότι η ανακατασκευή των εικόνων από τις τάσεις που λαμβάνονται συντελείται ταχύτερα από ότι στις άλλες μεθόδους, με μικρή κατανάλωση υπολογιστικών πόρων, είναι αξιοσημείωτο το ότι όλες σχεδόν οι προηγούμενες υλοποιήσεις ηλεκτρικών τομογράφων που προορίζονται είτε για πειραματική, είτε για εμπορική χρήση, ακολουθούσαν αυτή τη μέθοδο. Αξίζει επιπλέον να επαναληφθεί το ότι η παρακαείμενη μέθοδος απαιτεί το λιγότερο υλικό

εξοπλισμό, κρατώντας το επίπεδο του κόστους της υλοποίησης της εφαρμογής σχετικά χαμηλό.

Όπως αναλύθηκε προηγουμένως για N το πλήθος ηλεκτρόδια, η παρακείμενη στρατηγική προσφέρει $M=N(N-3)/2$ ανεξάρτητες μετρήσεις. Αυτό σημαίνει ότι για $N=64$ ηλεκτρόδια που θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα διάταξη θα λαμβάνονται $M=1952$ ανεξάρτητες μετρήσεις.^[1]

Οι περισσότερες από τις μέχρι τώρα υλοποιήσεις που χρησιμοποιούσαν 16 και 32 ηλεκτρόδια μέτρησης έδιναν από 104 και 464 ανεξάρτητες μετρήσεις αντίστοιχα, οπότε επιδιώκεται στη συνολική ανάλυση της εικόνας μια πολύ σημαντική βελτίωση. Σε περίπτωση επέκτασης του συστήματος σε 128 ή 256 ηλεκτρόδια μέτρησης ο αριθμός αυτός εκτοξεύεται σε 8000 και 32384 αντίστοιχα.

6. Ηλεκτρικές ιδιότητες των ιστών

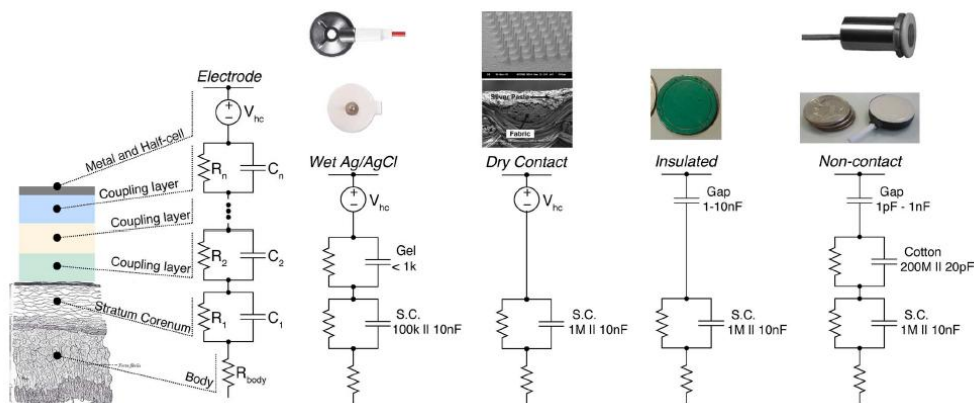
Για τον σχεδιασμό ενός συστήματος ηλεκτρικής τομογραφίας σύνθετης αντίστασης και τον καθορισμό των προδιαγραφών του επιβάλλεται σε πρώτο επίπεδο η μελέτη των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των ανθρώπινων ιστών. Με βάση τα χαρακτηριστικά αυτά και ιδιαίτερα την αγωγιμότητα και τη συμπεριφορά που αυτή παρουσιάζει σε διαφορετικές συχνότητες του εναλλασσόμενου ρεύματος που διαρρέει τους ιστούς, είναι δυνατό να καθοριστούν τα επίπεδα των ρευμάτων και των τάσεων που πρόκειται να εφαρμοστούν, οι συχνότητές τους, και κατά συνέπεια οι προδιαγραφές του κυκλώματος που πρόκειται να κατασκευαστεί.

Σημαντικό είναι να μελετηθεί σωστά η αντίσταση που παρουσιάζει το δέρμα με το ηλεκτρόδιο κατά την επαφή τους. Το δέρμα διακρίνεται από ορισμένες δομικές ιδιότητες από τις οποίες προκύπτουν και οι αντίστοιχες ηλεκτρικές ιδιότητες. Συγκεκριμένα, το δέρμα μπορεί να διαχωριστεί δομικά σε τρία βασικά στρώματα: την επιδερμίδα, τη δερμίδα και τον υποδόριο ιστό.^[1]

Η επιδερμίδα, η οποία είναι το εξωτερικό στρώμα του δέρματος, το οποίο έρχεται σε επαφή με το περιβάλλον, διαιρείται με τη σειρά της σε άλλα στρώματα. Το εξωτερικό της στρώμα είναι η κεράτινη στοιβάδα, η οποία συγκροτείται από νεκρά κύτταρα, είναι κακός αγωγός του ηλεκτρισμού και ουσιαστικά διαδραματίζει το ρόλο του μονωτή μεταξύ του εσωτερικού του δέρματος και κατά συνέπεια του οργανισμού και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Δεδομένου ότι η κεράτινη στοιβάδα είναι κακός αγωγός, θα διαδραματίσει το ρόλο του διηλεκτρικού στον πυκνωτή που θα

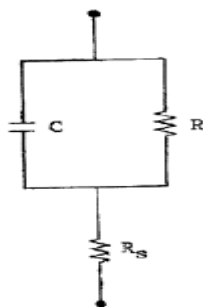
σηματιστεί μεταξύ μεταλλικού αντικειμένου (και συγκεκριμένα εδώ του ηλεκτροδίου) και του σώματος που είναι αρκετά πιο αγωγίμο σε σχέση με την κεράτινη στοιβάδα. Ανατρέχοντας στον μαθηματικό τύπο της χωρητικότητας ενός πυκνωτή $C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d}$, παρατηρούμε ότι αυτή είναι ανάλογη της επιφάνειας διεπαφής και αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης μεταξύ του ηλεκτροδίου και του ιστού, που, εφόσον το ηλεκτρόδιο θα έχει επαφή με την κεράτινη στοιβάδα, η απόσταση αυτή θα ταυτίζεται με το πάχος της στοιβάδας. Πέρα όμως από αυτό, σχηματίζεται και μια αντίσταση μεταξύ του ηλεκτροδίου και του ιστού, η οποία αυξάνεται όσο αυξάνεται το πάχος της κεράτινης στοιβάδας και μειώνεται όσο αυξάνεται η επιφάνεια επαφής και η υγρασία στην επιφάνεια του δέρματος που προκαλείται από τους ιδρωτοποιούς αδένες.

Φυσικά το ισοδύναμο κυκλωματικό μοντέλο είναι αρκετά περίπλοκο και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό και από το είδος της επαφής που δημιουργείται, ανάλογα δηλαδή με τον τύπο του ηλεκτροδίου που χρησιμοποιείται. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό διάγραμμα μοντέλων διεπαφής για διάφορους τύπους σύνδεσης.^[5]



Σχήμα 6: Διάγραμμα μοντέλων διεπαφής για διάφορους τύπους σύνδεσης^[5]

Ωστόσο, εφόσον τα ηλεκτρόδια που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν είναι ήδη κατασκευασμένα και τυποποιημένα, για την εύρεση των προδιαγραφών του συστήματος απαιτείται μια απλή προσέγγιση της τάξης μεγέθους και του εύρους των αντιστάσεων που συναντώνται καθώς και της μεταβολής τους συναρτήσει της συχνότητας, της υγρασίας και άλλων εξωγενών και ενδογενών παραγόντων. Έτσι μπορούμε να καταλήξουμε στην εξής μοντελοποίηση:



Σχήμα 7: Απλό μοντέλο διεπαφής ηλεκτροδίου - σώματος^[1]

Όπου C η προαναφερθείσα χωρητικότητα που αναπτύσσεται μεταξύ ηλεκτροδίου και ιστού, R η αντίσταση ηλεκτροδίου-ιστού και R_s η αντίσταση που παρουσιάζεται από άλλους παράγοντες (gel, ιδρώτας), και προσεγγιστικά μπορεί να θεωρηθεί ωμική. Στην πραγματικότητα, η R_s αποτελεί και αυτή παράλληλο συνδυασμό χωρητικότητας με ωμική αντίσταση, ωστόσο η επίδραση της χωρητικότητας εκείνης είναι αμελητέα σε σχέση με τη χωρητικότητα της κεράτινης στοιβάδας και για λόγους απλούστευσης μπορούμε να την αμελήσουμε.

Η σύνθετη αντίσταση που προκύπτει από αυτό το μοντέλο είναι:

$$z = (1/Cs) // R + R_s = \frac{R}{RCs + 1} + R_s.$$

Λόγω της ύπαρξης χωρητικότητας είναι εμφανής η εξάρτηση της αντίστασης αυτής από τη συχνότητα του ρεύματος ή της τάσης που διαπερνά την επαφή αυτή. Όσο πιο χαμηλές οι συχνότητες τόσο υψηλότερη η αντίσταση που παρουσιάζεται. Αυτό σημαίνει ότι για χαμηλές συχνότητες υπό σταθερή τάση το ρεύμα που ρέει στον πυκνωτή θα είναι αρκετά μικρό και θα αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητάς του. Γενικά οι μέγιστες τιμές της αντίστασης διεπαφής πρακτικά μπορούν να φτάσουν τα 100kΩm για πολύ χαμηλές συχνότητες (dc αντίσταση) ενώ με τη σταδιακή αύξηση της συχνότητας η τιμή αυτή μειώνεται αρκετά. Κοντά στο 1MHz αυτή η τιμή κυμαίνεται περίπου στα 1000Ωm, ενώ για 1GHz στα 100Ωm.

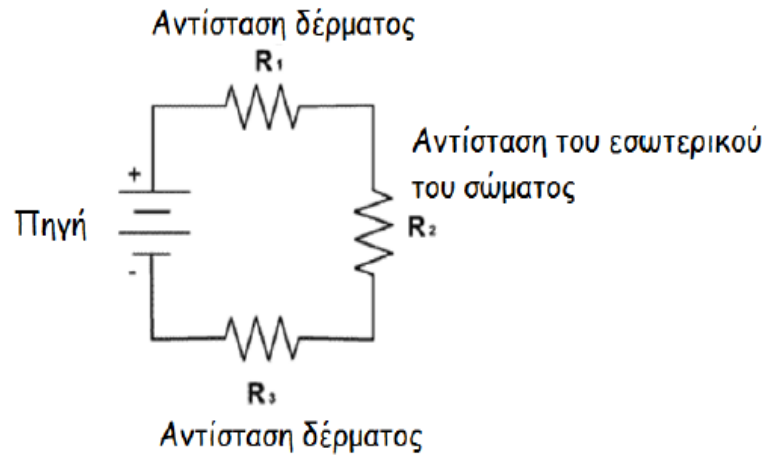
Πέρα από την αντίσταση που παρουσιάζεται στη διεπαφή όμως σημαντικό είναι να μελετηθεί και η συνολική αντίσταση που παρουσιάζει το εσωτερικό του ιστού. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία οι αντιστάσεις που παρουσιάζονται ανά ιστό και συχνότητα είναι οι παρακάτω:

Πίνακας 1: Ειδική αντίσταση (Ohm) ανά ιστό και συχνότητα^[1]

	DC	10 kHz	100 kHz	1 MHz	10 MHz
Οστά			20	16.7	14.3
Μύες	2.45	2.857	1.25	1.11	1.11
Δέρμα		2000	12.5	2	1.43
Πνεύμονες		33.33	10	6.67	3.33
Λίπος		40	40	40	40
Αίμα		1.6	1.6	1.426	0.91

Σε ac ρεύματα το ανώτερο όριο ασφαλείας για μικρή επιφάνεια επαφής είναι περίπου 30mA. Επίσης τα ηλεκτρόδια έχουν μικρότερη δυνατή διάμετρο περίπου ίση με 1cm, οπότε το εμβαδό επιφάνειας επαφής μπορεί να θεωρηθεί περίπου $A=\pi R^2=0.785\text{cm}^2$. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι για τη διαρροή ρεύματος προς το ανθρώπινο σώμα θα πρέπει να υπάρχουν τουλάχιστον 2 ηλεκτρόδια επαφής, ένα για την είσοδο και ένα άλλο για την έξοδο του ρεύματος, έτσι ώστε να δημιουργείται κλειστό κύκλωμα. Εφόσον όπως αναφέρθηκε χρησιμοποιείται η παρακείμενη στρατηγική μέτρησης, τα ηλεκτρόδια-ακροδέκτες της πηγής ρεύματος θα είναι διαδοχικά. Επίσης, θεωρούμε πως η απόστασή τους θα είναι περίπου 1cm (από κέντρο σε κέντρο). Χρησιμοποιώντας το μαθηματικό τύπο υπολογισμού αντίστασης $R=\rho(l/A)$, μπορούμε κατά προσέγγιση να υπολογίσουμε τη συνολική αντίσταση που θα συναντάται κάθε φορά από το ρεύμα.

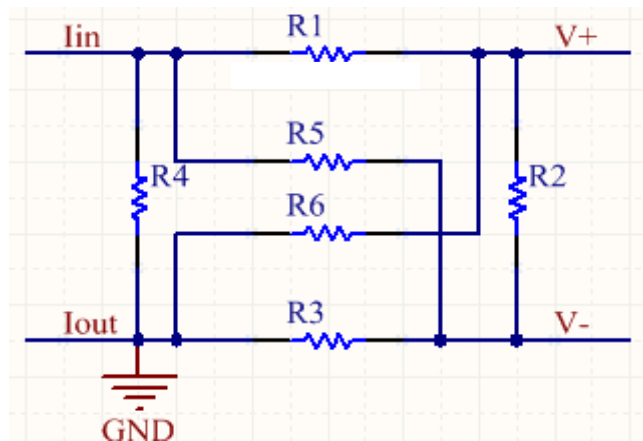
Πρώτα όμως πρέπει να καθοριστεί η δομή του ισοδύναμου κυκλώματος. Μια υπεραπλουστευμένη σχετικά εκδοχή για την συνολική αντίσταση του σώματος που συναντάται μεταξύ 2 ηλεκτροδίων είναι η εξής:



Σχήμα 8: Απλουστευμένο ισοδύναμο κύκλωμα ανθρώπινου σώματος

Το βασικό γνώρισμα των αντιστάσεων των ιστών είναι η εμφανής διαφορά της ειδικής αντίστασης του δέρματος και των οστών σε σύγκριση με αυτές των υπόλοιπων ιστών. Η συνολική αντίσταση των μαλακών εσωτερικών ιστών δεν υπερβαίνει τα 300Ω σε dc ρεύματα, ενώ η αντίσταση του δέρματος κυμαίνεται από 1-100K Ω . Παράγοντες που καθορίζουν σε στενότερο εύρος την τιμή της αντίστασης αυτής αποτελούν η υγρασία του δέρματος και η επιφάνεια της επαφής με το ηλεκτρόδιο. Λόγω αυτής της μεγάλης διαφοράς της τάξης μεγέθους των 2 αντιστάσεων, συμπεραίνεται ότι το δέρμα είναι ο ουσιαστικός προστατευτικός παράγοντας για τον ανθρώπινο οργανισμό απέναντι στον ηλεκτρισμό.

Θεωρούμε τώρα μια διάταξη 2 ηλεκτροδίων έκχυσης ρεύματος και άλλων 2 ηλεκτροδίων μέτρησης τάσης. Αγνοώντας οποιαδήποτε επίδραση από άλλα ηλεκτρόδια στην επιφάνεια του δέρματος, κατασκευάζουμε το ισοδύναμο κυκλωματικό μοντέλο της διάταξης. Αυτό λαμβάνει την εξής μορφή^[1]:



Σχήμα 9 Ισοδύναμο κυκλωματικό μοντέλο διάταξης μεταξύ 2 ηλεκτροδίων έκχυσης ρεύματος και 2 ηλεκτροδίων μέτρησης τάσης

Όπου σημειώνονται οι αξιοσημείωτες αντιστάσεις που συναντώνται τόσο στο δέρμα, όσο και στο εσωτερικό του οργανισμού από άλλους ιστούς, είτε μαλακούς, είτε σκληρούς.

Με την απλή μέθοδο κόμβων, όπου G_i , $i=1,2..6$, οι αντίστοιχες αγωγιμότητες των αντιστάσεων R_i , $i=1,2..6$, προκύπτουν οι εξής εξισώσεις:

$$\begin{bmatrix} G_1 + G_4 + G_6 & -G_1 & -G_6 \\ -G_1 & G_1 + G_2 + G_5 & -G_2 \\ -G_6 & -G_2 & G_2 + G_3 + G_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e1 \\ e2 \\ e3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I \\ I \\ 0 \end{bmatrix}$$

Με τη χρήση matlab βρίσκουμε τη συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος $G(s)=V_3(s)/I(s)$. Αντικαθιστώντας πειραματικά διάφορες πιθανές τιμές των αντιστάσεων αυτών ως αγωγιμότητες (όπου για κάθε i ισχύει $R_i=1/G_i$), και θεωρώντας ως τιμή ρεύματος το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα ασφαλείας, δηλαδή 30mA, η τάση εξόδου δίνει τιμές ως και 15Volts περίπου. Αυτό σημαίνει ότι σε ακραίες περιπτώσεις και σε ρεύματα κοντά στο όριο ασφαλείας, οι αναλογικές τάσεις που μπορούν θεωρητικά να δώσουν τα ηλεκτρόδια θα προσεγγίζουν μέχρι και αυτή την τιμή στο πλάτος τους. Αυτό είναι ένα αρκετά σημαντικό στοιχείο που θα χρησιμοποιηθεί για την επιλογή αρκετών στοιχείων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στη διάταξη. Συγκεκριμένα, κάθε ολοκληρωμένο κύκλωμα διαμέσου του οποίου θα διέρχονται αυτές οι αναλογικές τιμές των τάσεων, προερχόμενων από τα ηλεκτρόδια μέτρησης, θα πρέπει να μπορεί να τις "περνάει". Αυτό σημαίνει ότι η τροφοδοσία τους θα πρέπει να έχει μεγαλύτερο εύρος από αυτό των αναλογικών τάσεων, ούτως ώστε να μην παρουσιάζεται κορεσμός, δηλαδή αποκοπή σημάτων.

Η ΔΙΑΤΑΞΗ

7. Σύντομη Περιγραφή

Εφόσον εξετάστηκαν οι ιδιότητες των ιστών προς εξέταση, θα πρέπει να εξεταστεί η γενική δομή του συστήματος. Αυτό περιλαμβάνει το διαχωρισμό του όλου συστήματος σε επιμέρους υποσυστήματα, καθένα από τα οποία θα εξυπηρετεί συγκεκριμένο σκοπό. Αυτά επίσης θα πρέπει να συνδέονται μεταξύ τους με κατάλληλο τρόπο, έτσι ώστε τα ηλεκτρικά σήματα να διαδίδονται και να υφίστανται την επεξεργασία που απαιτείται.

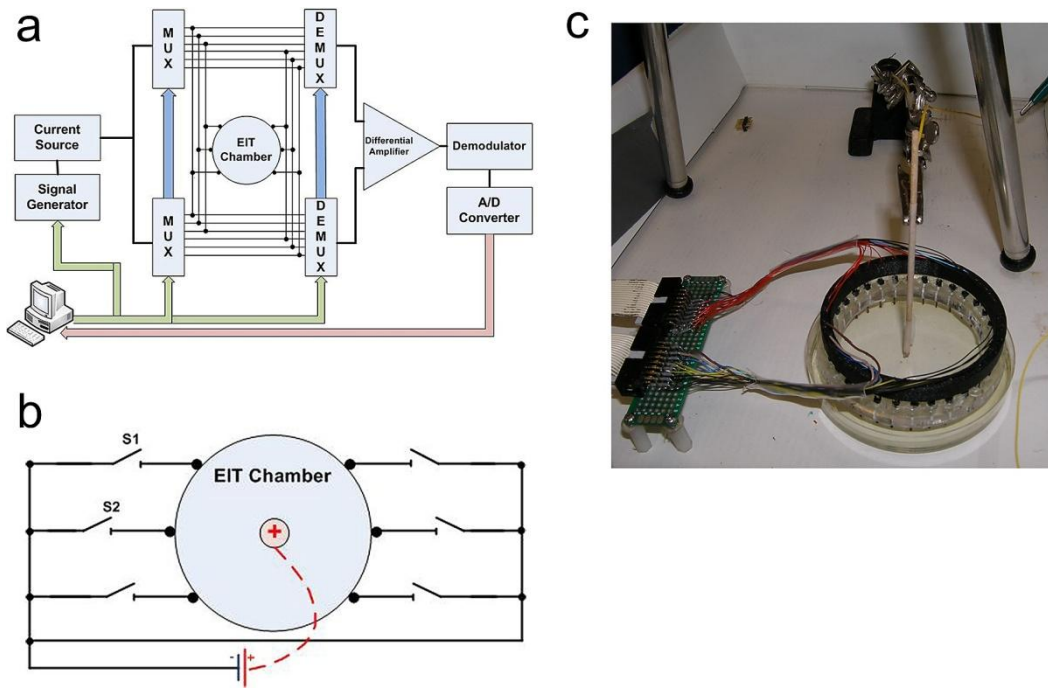
Συγκεκριμένα, ως εξετάσουμε ξανά τι συντελείται στο σύστημα αυτό. Διοχετεύεται ηλεκτρικό ρεύμα χαμηλής έντασης, ημιτονοειδούς μορφής σε ένα σύστημα ηλεκτροδίων περιφερικά, και λαμβάνονται τάσεις από τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια κάθε φορά. Αυτό σημαίνει πρακτικά ότι θα πρέπει να υπάρχει ένα σύστημα επιλογής των ηλεκτροδίων έκχυσης ρεύματος και των ηλεκτροδίων μέτρησης τάσης κάθε φορά. Εφόσον ο ρόλος των ηλεκτροδίων εναλλάσσεται επαναληπτικά με το χρόνο, θα χρειαστεί ένα σύστημα πολυπλεκτών για την οδήγηση του ρεύματος έκχυσης και των τάσεων μέτρησης. Επειδή χρησιμοποιούνται 64 ηλεκτρόδια μέτρησης, είναι προφανές ότι θα απαιτηθούν πολυπλέκτες 64x1. Ωστόσο χρειάζεται ένας τέτοιος πολυπλέκτης για να δίνει το απαιτούμενο ρεύμα εισόδου προς το κατάλληλο ηλεκτρόδιο κάθε φορά, ένας για να λαμβάνει το ρεύμα εξόδου από το διπλανό ηλεκτρόδιο, ένας για να λαμβάνει τη μια συνιστώσα της διαφορικής τάσης και ένας ακόμα για να λαμβάνει τη δεύτερη συνιστώσα της διαφορικής τάσης από το κατάλληλο ηλεκτρόδιο. Απαιτούνται επομένως, 4 πολυπλέκτες 64x1 ώστε να επιτελούν την οδήγηση ρεύματος-λήψη τάσης σύμφωνα με τον αλγόριθμο της παρακείμενης στρατηγικής μέτρησης που περιγράφηκε παραπάνω.

Προφανώς επίσης χρειάζεται μια κατάλληλα σχεδιασμένη πηγή ρεύματος που να παράγει το ημιτονοειδές ρεύμα που θα οδηγείται μέσω του πρώτου πολυπλέκτη προς τα ηλεκτρόδια. Επίσης είναι απαραίτητο να σχεδιαστεί ένα σύστημα το οποίο να μπορεί να καθορίζει τις τιμές που θα λαμβάνουν οι ψηφιακές εισοδοί των πολυπλεκτών έτσι ώστε να περνά το ρεύμα και οι τάσεις από τα κατάλληλα ηλεκτρόδια κάθε φορά, ώστε να εκτελείται ο αλγόριθμος. Αυτό επιτυγχάνεται με τη σχεδίαση ενός κυκλώματος μικροελεγκτή, το οποίο πρέπει να ενσωματώνεται στο παρόν σύστημα, να επικοινωνεί (ενσύρματα ή ασύρματα) με τον υπολογιστή έτσι

ώστε να προγραμματίζεται κατάλληλα και με τη σειρά του να στέλνει εντολές στις ψηφιακές εισόδους των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων του υπόλοιπου συστήματος (πολυπλεκτών στα πλαίσια της παρούσας εργασίας). Επίσης ρόλος του μικροελεγκτή (και συγκεκριμένα του analog to digital κομματιού του) είναι να λαμβάνει τις μετρηθείσες τιμές τάσεων οι οποίες έχουν εν τω μεταξύ υποστεί την κατάλληλη επεξεργασία, και να τις στέλνει πίσω στον υπολογιστή για περαιτέρω επεξεργασία και στη συνέχεια την κατασκευή της εικόνας.

Σε ότι αφορά στην επεξεργασία των τιμών μέτρησης απαιτείται αποθορυβοποίηση και μετατροπή των δεδομένων σε ψηφιακή μορφή ούτως ώστε να σταλούν στο μικροελεγκτή. Γι αυτές τις διεργασίες απαιτείται σε πρώτο στάδιο τουλάχιστον ένας διαφορικός ενισχυτής απόρριψης κοινού σήματος (CMRR), των διαφορικών τάσεων που λαμβάνονται σε κάθε μέτρηση, και εν συνεχεία ένας μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό κατάλληλου αριθμού bit. Θα ήταν αποδοτικότερο εάν παρεμβалλόταν ένας αποδιαμορφωτής που να διαχωρίζει το μέτρο και τη φάση του σήματος που λαμβάνεται.^{[1][6]}

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται συνοπτικά ένα τυπικό σύστημα ηλεκτρικής τομογραφίας σύνθετης αντίστασης για πλήθος ηλεκτροδίων μέτρησης. Χαρακτηριστικό είναι ότι ανεξάρτητα του αριθμού των ηλεκτροδίων αυτών, η λογική λήψης- επεξεργασίας μετρήσεων, άρα και της κατασκευής του σχηματικού του συνολικού κυκλώματος δεν αλλάζει ^[7].

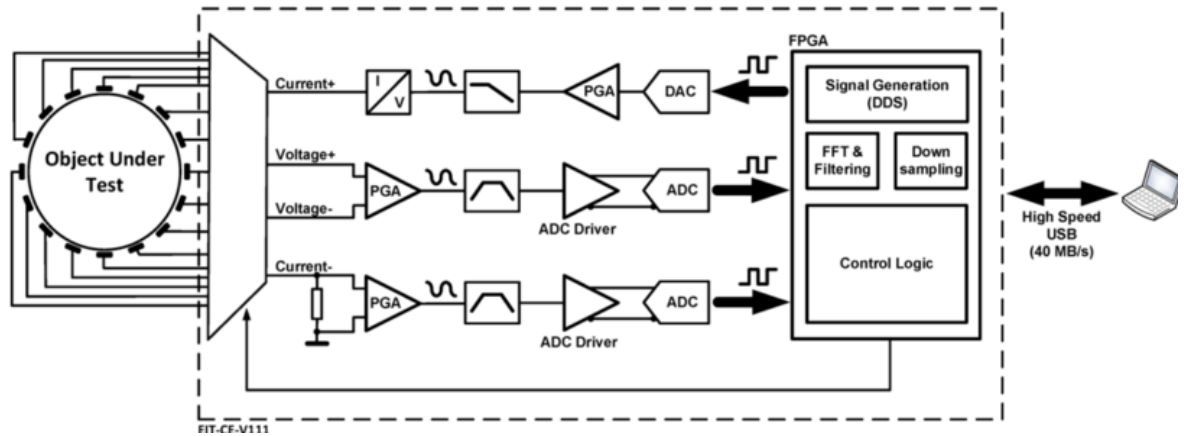


Εικόνα 6: Δομικό διάγραμμα ενός συστήματος EIT και μια απλή πειραματική διάταξη

Ωστόσο όσο αυξάνεται το πλήθος των χρησιμοποιούμενων ηλεκτροδίων, η πολυπλοκότητα του κυκλώματος αυξάνεται, και οι καλωδιώσεις απαιτούν ειδικό σχεδιασμό στην τελική πλακέτα κατασκευής και εκμετάλλευση της συμμετρίας που παρουσιάζεται στο σύστημα λήψης μετρήσεων, όπως ήδη διακρίνεται στο σχήμα. Περισσότερα για το συγκεκριμένο ζήτημα της σχεδίασης του συστήματος σε εκτυπωμένη πλακέτα δηλαδή (printed circuit board) θα ειπωθούν παρακάτω.

Τα βασικά δομικά χαρακτηριστικά του συστήματος που περιγράφηκε προηγουμένως ορίζουν ένα πλαίσιο κατασκευαστικών προδιαγραφών, απαιτήσεων και περιορισμών για το EIT, αλλά από την άλλη αφήνουν σημαντικά περιθώρια ευελιξίας στην επιλογή των στοιχείων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή αυτή.

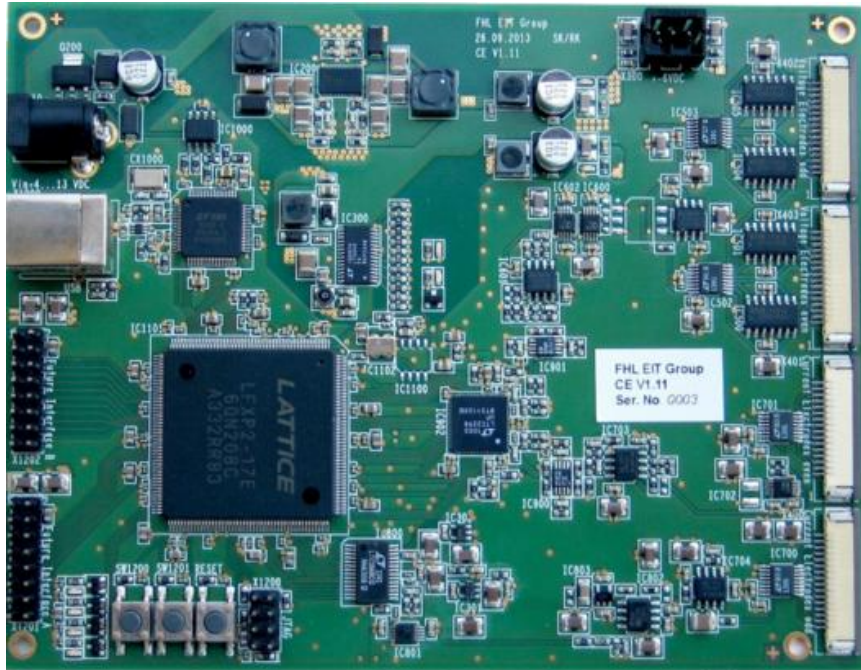
Επιπρόσθετα, θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο τρόπος αυτός της περιγραφής της δομής του συστήματος δεν είναι μονοσήμαντος. Υπάρχουν αρκετές εναλλακτικές υλοποιήσεις που χρησιμοποιούν είτε κάποια άλλη διάταξη ηλεκτροδίων μέτρησης (βλ. παραπάνω κεφάλαιο για τις μεθόδους τοποθέτησης ηλεκτροδίων), είτε ένα διαφορετικό τρόπο λήψης και επεξεργασίας αυτών των μετρήσεων (π.χ. με χρήση fpga αντί μικροελεγκτή), ενώ αναπτύσσονται διαρκώς ειδικοί αλγόριθμοι που θα αξιοποιούν δεδομένο πλήθος ηλεκτροδίων σε ειδικές διατάξεις για τη βέλτιστη αξιοποίηση της συνολικής πληροφορίας των μετρήσεων.



Σχήμα 10: Δομικό διάγραμμα EIT που υλοποιείται με χρήση FPGA^[8]

Σε κάθε περίπτωση αντιλαμβάνεται κανείς εύκολα ότι πρόκειται για ένα σχετικά περίπλοκης κατασκευής σύστημα σε ότι αφορά στο σχεδιασμό του. Το γεγονός αυτό καθιστά απαραίτητη τη χρήση σε πρώτο στάδιο απλουστευμένων δομικών διαγραμμάτων για τη κατά δύναμη απλούστερη εξήγηση και αντίληψη της λειτουργίας του συστήματος, προτού η ανάλυση προχωρήσει σε επόμενο στάδιο. Η προσέγγιση αυτή όμως προφανώς δεν αφορά μόνο στο EIT αλλά σχεδόν στο σύνολο των ηλεκτρονικών και όχι μόνο συστημάτων που κατασκευάζονται ή επεξηγείται η λειτουργία τους. Η απλοποίηση που προσφέρει η χρήση τους στην κατανόηση βασικών χαρακτηριστικών κάθε συστήματος τα καθιστά απαραίτητα εργαλεία στο χέρι ενός μηχανικού τόσο για τον ίδιο όσο και για τους κύκλους στους οποίους παρουσιάζει ένα σύστημα.

Παρακάτω θα αναλυθούν οι απαιτούμενες προδιαγραφές κάθε μέρους του ολικού συστήματος ώστε να καταλήξουμε πιο συγκεκριμένα στο τι εξαρτήματα πρόκειται να χρησιμοποιηθούν και με ποιο τρόπο θα συνδέονται αυτά μεταξύ τους.



Εικόνα 7: Εκτυπωμένη πλακέτα υλοποίησης συστήματος EIT 16 ηλεκτροδίων. Ήδη διακρίνεται η εξαιρετική περιπλοκότητα του συστήματος κάτι που απαιτεί δομικό διάγραμμα τόσο για την κατασκευή όσο και για την επεξήγησή του^[8]

8. Μελέτη επιμέρους διατάξεων και επιλογή στοιχείων

8.1. Τα ηλεκτρόδια

Για τέτοιου είδους εφαρμογές, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ηλεκτρόδια πολλών ειδών. Τυπικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ηλεκτρόδια από ανοξείδωτο ατσάλι, από αλουμίνιο ή τα συμβατικά αυτοκόλλητα ECG (Electro Cardio Graphy) ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται συνήθως και είναι τύπου Ag-AgCl,^[1] δηλαδή περιέχουν άργυρο και χλώριο. Μια ακόμη εναλλακτική επιλογή είναι η χρήση ηλεκτροδίων από χαλκό, τα οποία προσφέρουν καλή και ρεαλιστική προσέγγιση της σύνθετης αντίστασης της διεπαφής ηλεκτροδίου-δέρματος. Σε πολλές εφαρμογές της ηλεκτρικής τομογραφίας σύνθετης αντίστασης, χρησιμοποιούνται τα τυποποιημένα ηλεκτρόδια ECG, τύπου Ag-AgCl. Στην παρούσα εφαρμογή ωστόσο, όσο τουλάχιστον βρίσκεται σε καθαρά πειραματικό επίπεδο, χρησιμοποιούνται μπουλόνια διαμέτρου 3mm με μικρή κεφαλή, αντί κανονικών ηλεκτροδίων. Προφανώς το σώμα του πειράματος δεν είναι πραγματικός ασθενής, αλλά ένας πλαστικός ημιδιαφανής κουβάς γεμισμένος με αλατισμένο νερό (fantom model), που τρυπιέται συμμετρικά στην περιφέρειά του με βίδες. Ο επιθυμητός αριθμός των βιδών-ηλεκτροδίων που

απαιτούνται για την παραγωγή ποιοτικής και ακριβούς εικόνας ορίζεται να είναι 64 ηλεκτρόδια.

Πριν την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων, απαιτείται καθαρισμός της περιοχής επαφής με αλκοόλη και επικάλυψη των ηλεκτροδίων με λεπτό στρώμα ηλεκτρολυτικού gel. Τα ηλεκτρόδια αυτά πρέπει να κολληθούν σε μια ειδική ζώνη, σε ίση απόσταση μεταξύ τους ώστε να υπάρχει σωστή κατανομή ρεύματος και τάσεων μέτρησης, σύμφωνα πάντα με τις προδιαγραφές που ορίστηκαν παραπάνω, στο κεφάλαιο μελέτης των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των ιστών. Η απόσταση 2.5 cm μεταξύ τους με μια μικρή απόκλιση είναι εντός των απαιτήσεων που έχουν οριστεί ενώ η διάμετός τους είναι και αυτή περίπου 2cm. Προφανώς αυτό που πρέπει να προσέξει κανείς είναι και η ίδια η διάμετρος της ζώνης έτσι ώστε να μπορεί με ευκολία να τυλιχθεί γύρω από τον ασθενή στο σημείο που επιθυμείται η τομογραφία. 64 ηλεκτρόδια σε απόσταση 1cm από κέντρο σε κέντρο ορίζουν μια περιφέρεια 64cm που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί γύρω από το στήθος ενός ασθενούς κανονικού σωματότυπου. Ωστόσο λόγω της ποικιλομορφίας των σωματότυπων των ασθενών αλλά και των περιοχών λήψης μετρήσεων, η ζώνη στην οποία προσαρμόζονται τα ηλεκτρόδια θα πρέπει να είναι αρκούντως ελαστική ούτως ώστε η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων να αναπροσαρμόζεται κατάλληλα κάθε φορά.



Εικόνα 8: Ειδική ζώνη ενσωμάτωσης ηλεκτροδίων μέτρησης στο σύστημα Pulmo Vista^[3]

Μια πολύ σημαντική κατασκευαστική λεπτομέρεια επίσης αποτελεί και ο τρόπος με τον οποίο τα ηλεκτρόδια θα συνδέονται με το υπόλοιπο κύκλωμα EIT. Για το λόγο αυτό απαιτείται ένας ειδικός κοννέκτορας, τύπου D-subπου να βιδώνεται στην

πλακέτα και φυσικά να διαθέτει τουλάχιστον 64 female pins για την υποδοχή των καλωδίων των ηλεκτροδίων μέτρησης. Μετά από σχετική έρευνα, επιλέχθηκε ο DXM της Hirose Connectors, με 68 υποδοχές και απόσταση pins 1.27mm. Αυτός ο κοννέκτορας υποδέχεται έναν αρσενικό DX-30, στον οποίο τοποθετήθηκαν δυο 34άρια ribbon cables μεγάλου μήκους (2 μέτρων). Καθένα από αυτά τα 68 καλώδια της καλωδιοταινίας, στην άκρη του, διαχωρίζεται από τα υπόλοιπα 67 και κολλιέται στο μηχανικό ανάλογο του ηλεκτροδίου μέτρησης, δηλαδή την βίδα, στην άκρη που βρίσκεται έξω από τον κουβά προσομοίωσης. Σημειώνεται ότι μετρήσεις έδειξαν την παρουσία αντίστασης 0.8Ω από τον κοννέκτορα ως το αντίστοιχο ηλεκτρόδιο για κάθε καλώδιο. Αυτή η αντίσταση μπορεί να μην είναι αρκετά μεγάλη, ωστόσο σε περίπτωση εναλλασσόμενου σήματος, θα αναπτύσσονται αρκετά μεγάλες αυτεπαγωγές κατά μήκος τους, και χωρητικότητες μεταξύ τους ούτως ώστε να υπάρξει σημαντική παραμόρφωση του αναλογικού σήματος προς μέτρηση. Για τους λόγους αυτούς, αντί ribbon cable ιδανικά θα επιθυμούσαμε τη χρήση ομοαξονικών καλωδίων από τον κοννέκτορα στο εκάστοτε ηλεκτρόδιο, κάτι το οποίο όμως αυξάνει κατακόρυφα το κόστος της παρούσας εφαρμογής σε σημείο που να μην είναι συμφέρουσα η κατασκευή της για καθαρά πειραματικούς σκοπούς.



Εικόνα 9: Το πλαστικό δοχείο της πειραματικής διάταξης με τα προσαρτημένα ηλεκτρόδια (phantom 2D model)

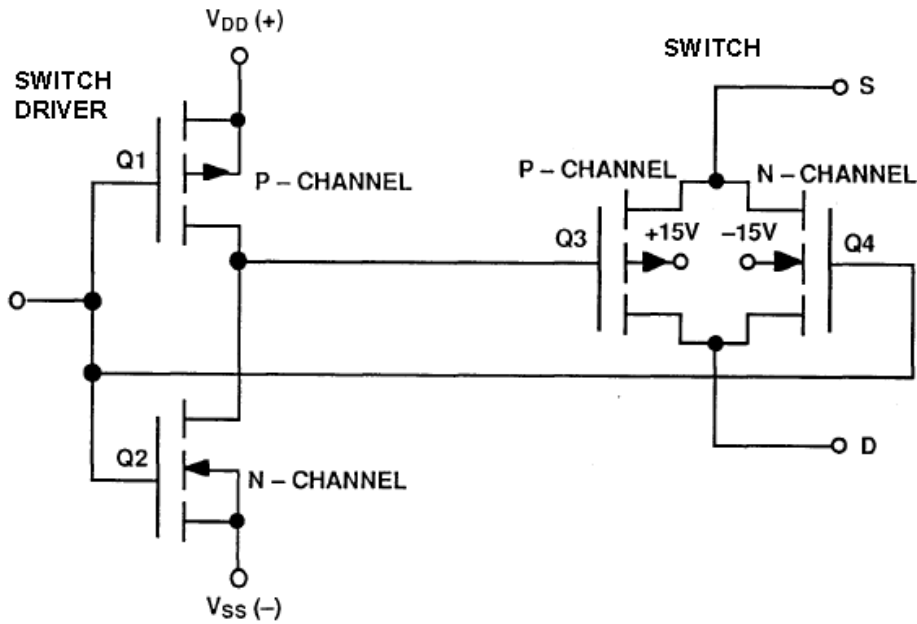
8.2. Οι πολυπλέκτες

Σύμφωνα με την παραπάνω περιγραφή απαιτούνται τέσσερις πολυπλέκτες 64x1. Πιο συγκεκριμένα, απαιτούνται δυο πολυπλέκτες μιας εισόδου και 64 εξόδων, για την έκχυση και την επιστροφή του ρεύματος που θα διαχέεται κάθε φορά και δυο πολυπλέκτες 64 εισόδων και μιας εξόδου για την έξοδο της διαφορικής τάσης που θα λαμβάνεται από τα ηλεκτρόδια μέτρησης. Στην πραγματικότητα, στην γλώσσα της καθαρά ψηφιακής σχεδίασης συστημάτων, ο (ψηφιακός) πολυπλέκτης έχει συνήθως πολλαπλές εισόδους και εν μέσω διακοπών επιλογής (ηδιακόπτες για 2^η εισόδους) καθορίζεται ποια από αυτές τις εισόδους θα οδηγηθεί στην (μοναδική) έξοδο του πολυπλέκτη. Η αντίστροφη λειτουργία επιτελείται από ολοκληρωμένο κύκλωμα που ονομάζεται αποπλέκτης.

Ωστόσο εδώ τα σήματα που διαρρέουν τα ηλεκτρόδια είναι προφανώς αναλογικά, άλλωστε σαν ρεύμα εισόδου χρησιμοποιείται ημιτονικό κύμα, και αυτό συμβαίνει για να υπάρχει δυνατότητα καταγραφής όλων των ιδιοτήτων της αντίστασης που παρουσιάζουν οι εξεταζόμενοι ιστοί. Πιο συγκεκριμένα, επιθυμούμε εξέταση της συμπεριφοράς των ιστών όχι μόνο σε συνεχές ρεύμα, κάτι που θα έδινε απλά την πραγματική αντίστασή των ιστών αυτών αλλά και σε εναλλασσόμενο για τον καθορισμό της συμπεριφοράς τους με βάση τη μεταβολή της συχνότητας, ούτως ώστε κάθε φορά να μετράται μέτρο και φάση της αντίστασης που λαμβάνεται. Αυτό θα οδηγήσει σε μια σαφώς ευκρινέστερη και ορθότερη απεικόνιση. Πέρα από αυτό, με τη χρήση απλά ψηφιακών σημάτων το μόνο που θα επιτευχθεί θα ήταν η ανακατασκευή μιας ασπρόμαυρης εικόνας, όπου με μαύρο θα απεικονίζονταν τμήματα των ιστών με στοιχειώδη αντίσταση, ενώ με λευκό τμήματα με ελάχιστη αντίσταση. Αυτό είναι προφανές ότι δεν θα μας επέτρεπε την εξαγωγή σημαντικών πληροφοριών περί της συμπεριφοράς των ιστών. Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι μόνο με αναλογικά σήματα και μάλιστα διακριτών συχνοτήτων (άρα ημίτονο) θα μπορούσε ένα τέτοιο σύστημα να επιτελέσει σωστά το σκοπό κατασκευής του.

Η χρήση αναλογικών σημάτων μέτρησης οδηγεί με τη σειρά της και στη χρήση αναλογικών πολυπλεκτών. Ο αναλογικός πολυπλέκτης γενικά διαφέρει από τον ψηφιακό πρώτα από όλα στο γεγονός ότι τα σήματα που περνούν από μέσα του μέσω των διακοπών είναι αναλογικά και όχι ψηφιακά (0 ή 5V). Έπειτα η πλειοψηφία των αναλογικών πολυπλεκτών διαθέτουν μια βολική ιδιότητα: οι εισοδοί και οι έξοδοί τους μπορούν να εναλλάσσονται ανάλογα με το που δίνεται πρώτα το σήμα. Αυτό σημαίνει ότι επιτελούν τη λειτουργία πολυπλεκτών και αποπλεκτών ταυτόχρονα.

Η αρχή της λειτουργίας του πολυπλέκτη σε επίπεδο vlsi, είναι η ακόλουθη:^[9]



Σχήμα 11: Κυκλωματικό διάγραμμα της λειτουργίας του αναλογικού πολυπλέκτη σε επίπεδο VLSI

Όταν η ψηφιακή είσοδος του αντιστροφέα (αριστερά) πάρει λογική τιμή 1, τότε ενεργοποιούνται οι πύλες των τρανζίστορ της πύλης μετάδοσης και υπάρχει διέλευση σήματος από το D στο S αντίστροφα (εφόσον αυτό είναι δυνατό σε έναν αναλογικό πολυπλέκτη). Όταν η είσοδος πάρει τη λογική τιμή 0, τότε απενεργοποιείται η πύλη μετάδοσης και η έξοδος της τίθεται σε high z.

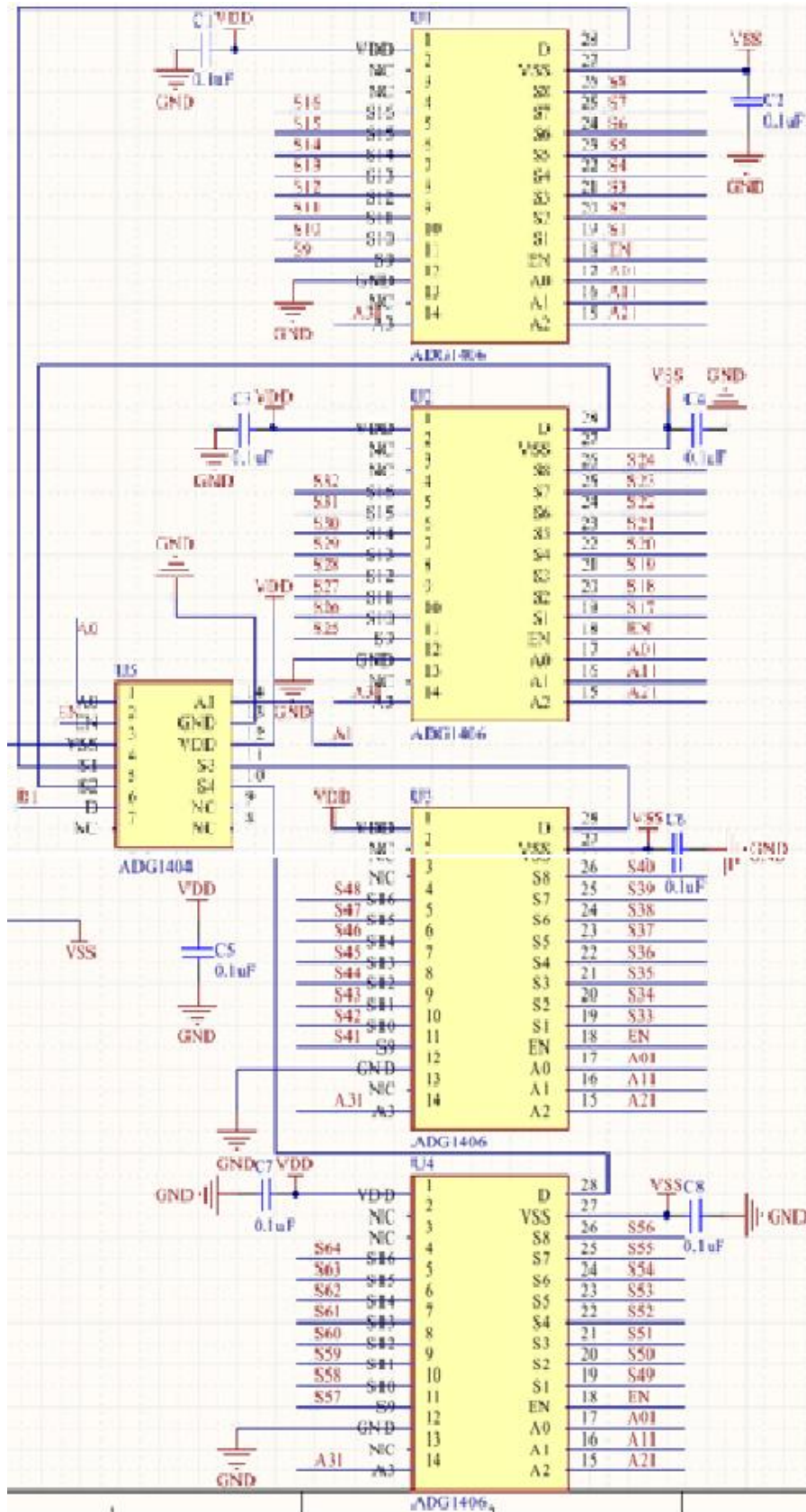
Πέρα όμως από τον αναλογικό τους χαρακτήρα, οι πολυπλέκτες που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν οφείλουν να ικανοποιούν και άλλες σημαντικές προδιαγραφές για την αποτελεσματικότητα του συστήματος. Συγκεκριμένα, θα πρέπει να διαθέτουν αρκετά μικρή εσωτερική αντίσταση (R_{ON} -αντίσταση διακόπτη), με τιμές της τάξης κάτω των 20Ω . ^[1] Η αντίσταση αυτή σχετίζεται με τον ημιαγωγό και τις παρεμβολές μεταξύ των διαφορετικών καναλιών και προσδιορίζει τον πιο σημαντικό παράγοντα σφάλματος. Η τιμή της εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία και η ένταση του ρεύματος σε κάθε κανάλι. Ακόμη, εξαιρετικά σημαντικός παράγοντας για την επιλογή του σωστού πολυπλέκτη είναι η ικανότητα απομόνωσης μιας ανεπιθύμητης ζεύξης σήματος μέσω ενός ανοικτού διακόπτη (isolation) σε υψηλές συχνότητες. Τέλος σημαντικό είναι και το ζήτημα της τάσης τροφοδοσίας των πολυπλεκτών, η οποία καθορίζει και το εύρος των κορυφών τάσης των σημάτων που διέρχονται μέσα από αυτούς. Από μελέτη σε προηγούμενο κεφάλαιο προέκυψε ότι (για τις μέγιστες επιτρεπτές τιμές ρευμάτων) υπάρχει περίπτωση να λαμβάνονται σήματα ύψους ως και 15V. Επομένως σε αυτή την περιοχή πρέπει να τροφοδοτούνται

και οι πολυπλέκτες, και μάλιστα από -15 ως 15V, διότι τα σήματα είναι ημιτονικά και κορυφές θα εμφανίζονται τόσο στα θετικά όσο και στα αρνητικά. Με το μεγάλο εύρος τροφοδοσίας θα αποφεύγεται ο κορεσμός των σημάτων (ψαλιδισμός) και επιπλέον δεν θα υπάρχει κίνδυνος υπερθέρμανσής τους και πρόκλησης μόνιμης ζημιάς στα ολοκληρωμένα κυκλώματα. Η τάση των σημάτων που διέρχονται από τους πολυπλέκτες στην παρούσα εφαρμογή ρυθμίζεται άμεσα από το πλάτος του ρεύματος εισόδου, πρέπει ωστόσο να είναι γνωστή η περιοχή τιμών των αντιστάσεων που πρόκειται να μετρηθούν ώστε να αποφευχθούν ανεπιθύμητες υψηλές τιμές τάσεων, πέρα του εύρους των πολυπλεκτών. Από την άλλη πλευρά μικρά ρεύματα που θα έχουν ως αποτέλεσμα πολύ μικρές τάσεις εξόδου (<300mV, ανά κανάλι) θα ήταν αδύνατο να οδηγήσουν σε λήψη αξιόπιστων μετρήσεων λόγω των υψηλών επιπέδων θορύβου που συναντώνται σε αυτά τα επίπεδα. Σημαντικό εδώ τέλος είναι να επαναλάβουμε ότι όσο μικρότερη είναι η συχνότητα σήματος εισόδου τόσο υψηλότερες τάσεις θα λαμβάνονται στην έξοδο και αυτό συμβαίνει ακριβώς διότι αύξηση της συχνότητας ρεύματος συντελεί στη μείωση της αντίστασης των ιστών.

Εκτελώντας μια εκτενή αναζήτηση στις διεθνείς αγορές ηλεκτρονικών στοιχείων, παρατηρεί κανείς εύκολα ότι δεν υπάρχουν (ακόμα) έτοιμοι αναλογικοί πολυπλέκτες 64x1. Ωστόσο, σε καμία περίπτωση κάτι τέτοιο δεν εμποδίζει την κατασκευή ενός τέτοιου συστήματος, διότι είναι γνωστό από τη λογική σχεδίαση ότι ένας μεγάλου αριθμού εισόδων πολυπλέκτης μπορεί να κατασκευαστεί με την κατάλληλη συνδεσμολογία μικρότερων πολυπλεκτών. Έτσι, στην περίπτωση μας, κάθε πολυπλέκτης 64x1 μπορεί να κατασκευαστεί σαν ένα σύστημα με έναν πολυπλέκτη 4x1 στην αρχή, του οποίου καθεμία από τις εξόδους του θα οδηγεί στις επιμέρους εισόδους καθενός από 4 πολυπλέκτες 16x1. Αυτό αν πρόκειται για πολυπλέκτη ρεύματος. Στην περίπτωση των πολυπλεκτών τάσης, αντίστοιχα, οι 4 εισοδοί του πολυπλέκτη 4x1 στην αρχή θα οδηγούν στις 4 επιμέρους εξόδους των 4 αντίστοιχων πολυπλεκτών 16x1. Για να γίνει ακόμα σαφέστερη η αναλυόμενη διάταξη, παραθέτουμε το σχηματικό στην επόμενη σελίδα. Σε επόμενο κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στη σημαντικότητα και τη χρησιμότητα των σχηματικών για την κατασκευή ηλεκτρονικών συστημάτων.

Επανερχόμενοι στο ζήτημα της επιλογής των πολυπλεκτών, παρατηρούμε ότι οι 4x1 πολυπλέκτες ADG1404 και οι 16x1 πολυπλέκτες ADG1406 της analog devices ικανοποιούν τις προδιαγραφές που περιεγράφηκαν προηγουμένως. Εδώ πρέπει να

σημειωθεί ότι για την εύρεση των χαρακτηριστικών κατασκευής και λειτουργίας ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος θα πρέπει να πραγματοποιείται εκτενής αναζήτηση και μελέτη του datasheet του. Συνήθως τα έγγραφα αυτά τα παρέχει η ίδια η εταιρεία που κατασκευάζει το αντίστοιχο ολοκληρωμένο. Σύμφωνα λοιπόν με τα datasheet των δυο αυτών πολυπλεκτών, μπορούν να διαθέτουν τροφοδοσία στα $\pm 15\text{Volts}$, τα $\pm 5\text{Volts}$ είτε μόνο θετική τροφοδοσία (single supply) στα 12Volts . Εμείς δεδομένου ότι επιθυμούμε τροφοδοσία $\pm 15\text{V}$ συμπεραίνουμε ότι το χαρακτηριστικό αυτό ικανοποιείται. Επίσης, κάθε πολυπλέκτης ADG1404 παρουσιάζει εσωτερική αντίσταση $1,5\Omega$, ενώ κάθε ADG1406 $9,5\ \Omega$ ^{[10],[11]} κατά μέγιστη τιμή, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι κάθε αναλογικό σήμα θα συναντά αθροιστικά αντίσταση από τους διακόπτες 11Ω περίπου, αρκετά μικρότερη αντίσταση από την μέγιστη επιτρεπτή των 20Ω που ορίστηκε. Στην πολύ μικρή αυτή αντίσταση που παρουσιάζεται, και κατ' επέκταση στην πολύ μικρή ενεργειακή κατανάλωση που παρουσιάζουν οι πολυπλέκτες αυτοί, συμβάλλει η τεχνολογία iCMOS που χρησιμοποιείται για την κατασκευή τους. Έτσι, ακόμα και στο σύνολό τους (θα χρειαστούν 16 16×1 και 4 4×1 για να κατασκευαστεί το ισοδύναμο των 4 πολυπλεκτών 64×1) οι πολυπλέκτες θα απορροφούν εξαιρετικά χαμηλές τιμές ρεύματος και κατ' επέκταση ισχύος. Δεν είναι τυχαίο το γεγονός που στο ίδιο το φύλλο προδιαγραφών αναφέρεται ότι οι συγκεκριμένοι πολυπλέκτες μεταξύ άλλων χρησιμοποιούνται και σε βιοϊατρικές εφαρμογές, και συγκεκριμένα για ιατρικό εξοπλισμό (medical equipment).



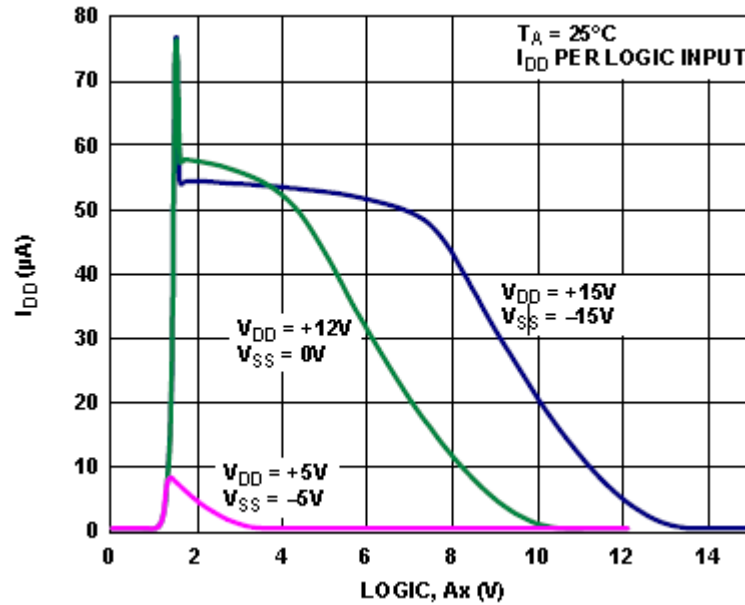
Σχήμα 12: Σχηματικό διάγραμμα της σύνδεσης των επιμέρους στοιχείων ενός πολυπλέκτη 64x1

Πέρα όμως από αυτά, πρέπει να αναφερθεί ο εξαιρετικά μικρός χρόνος καθυστέρησης διάδοσης του σήματος από τους διακόπτες (80nsec στα +/-15Volts),

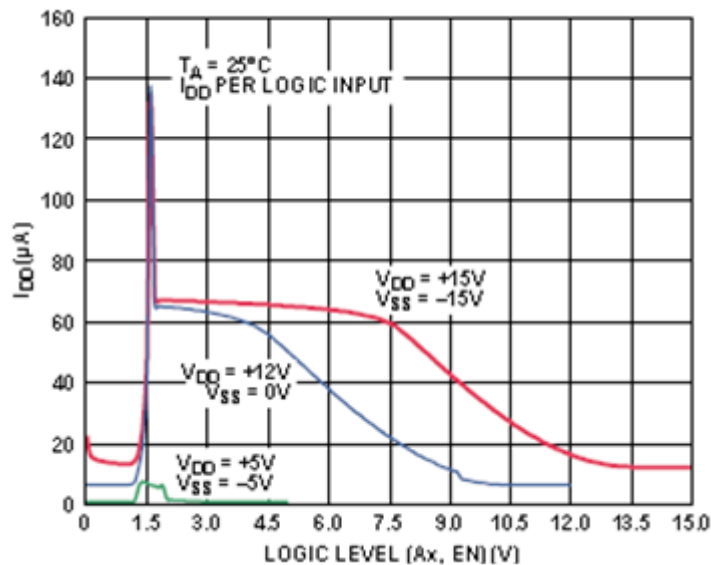
κάτι το οποίο είναι απαραίτητο για την υλοποίηση ενός συστήματος χωρίς προβλήματα στον απόκρισή του. ^{[10],[11]}

Ένα σημαντικό θέμα που προκύπτει σχετικά με τις τάσεις τροφοδοσίας των πολυπλεκτών, αλλά και γενικότερα των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, είναι η πρόκληση θορύβου τόσο σε αυτές από τα υπόλοιπα σήματα που βρίσκονται κοντά ή από την τροφοδοσία παράπλευρων ολοκληρωμένων, όσο και στα υπόλοιπα σήματα από αυτές. Έναν αρκετά αποτελεσματικό τρόπο μείωσης του θορύβου αυτού και αύξησης της αποτελεσματικότητας της λειτουργίας ενός κυκλώματος, αποτελεί η τοποθέτηση μεταξύ κύριας τροφοδοσίας παράπλευρα του ολοκληρωμένου και της γείωσης ενός ή περισσότερων πυκνωτών. Η χωρητικότητα και ο τύπος των πυκνωτών αυτών (που καλούνται decoupling ή bypass capacitors) συνήθως δεν είναι μονοσήμαντα και εξαρτώνται από τις προδιαγραφές των ολοκληρωμένων και τα χαρακτηριστικά του κυκλώματος γενικότερα. Στην προκειμένη περίπτωση τοποθετήθηκαν στις τροφοδοσίες των +/-15V κάθε πολυπλέκτη, κεραμικοί πυκνωτές χωρητικότητας 0.1uF. Συνολικά χρειάζονται 32 τέτοιοι πυκνωτές, 2 σε κάθε πολυπλέκτη 16x1. Φυσικά το σύστημα είναι δυνατό να δουλέψει και χωρίς αυτούς, ωστόσο οι πυκνωτές προσφέρουν αποτελεσματική αποθορυβοποίηση από την τροφοδοσία και τα υπόλοιπα μέρη του κυκλώματος, αυξάνοντας την αξιοπιστία και φυσικά το χρόνο ζωής του συστήματος.

Πέρα από το ζήτημα του θορύβου πάντα είναι σκόπιμο να μελετάται η ενεργειακή απαίτηση κάθε ολοκληρωμένου κυκλώματος ώστε αυτό να είμαστε σίγουροι ότι τροφοδοτείται επαρκώς. Ανάλογο της ισχύος είναι το ρεύμα που απορροφάται από την τροφοδοσία ενός ολοκληρωμένου. Τα δυο επόμενα διαγράμματα υποδεικνύουν το ρεύμα τροφοδοσίας συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας καθώς και της τάσης που χρησιμοποιείται επί των λογικών σημάτων εισόδου, για τους πολυπλέκτες ADG1404 και ADG1406 αντίστοιχα^{[10],[11]}:



Διάγραμμα 1: Ρεύμα τροφοδοσίας του ADG1404, συναρτήσει τάσεων τροφοδοσίας και ψηφιακών σημάτων



Διάγραμμα 2: Ρεύμα τροφοδοσίας του ADG1406, συναρτήσει τάσεων τροφοδοσίας και ψηφιακών σημάτων

Για τροφοδοσία +/-15Volts και Enable, $A_x=5\text{Volts}$ που αφορούν στην παρούσα διάταξη, έχουμε $I_{DD}=53\mu\text{A}$ και $I_{DD}=67\mu\text{A}$, αντίστοιχα.

Όπως αναφέρθηκε, για κάθε πολυπλέκτη nx1 απαιτούνται n ψηφιακά σήματα ελέγχου. Έτσι εδώ, κάθε πολυπλέκτης 16x1 θέλει 4 τέτοια σήματα, ενώ κάθε 4x1 2 τέτοια. Λαμβάνοντας υπόψη τη συνδεσμολογία που επιθυμούμε να επιτύχουμε στην παρούσα διάταξη, δηλαδή 4 πολυπλέκτες 64x1, κάθε 4αδα 16x1 πολυπλεκτών θα έχει

κοινές ψηφιακές εισόδους ελέγχου. Παρατηρώντας το σχήμα της προηγούμενης σελίδας γίνεται αντιληπτή η χρήση κοινών ψηφιακών σημάτων (A01-A31) σε κάθε πολυπλέκτη 16x1. Έτσι, ανά πολυπλέκτη 64x1, που συγκροτείται από 4 16x1 και έναν 4x1, θα έχουμε συνολικά $4+2=6$ ψηφιακά σήματα, κάτι το οποίο συμβαδίζει με τη λογική, καθώς $2^6=64$. Άρα η συνολική διάταξη, θα απαιτεί κανονικά $4*6=24$ ψηφιακές πύλες εισόδου, για να υπάρχει δυνατότητα κάθε φορά ελέγχου των αναλογικών σημάτων που θα διέρχονται από τους πολυπλέκτες.

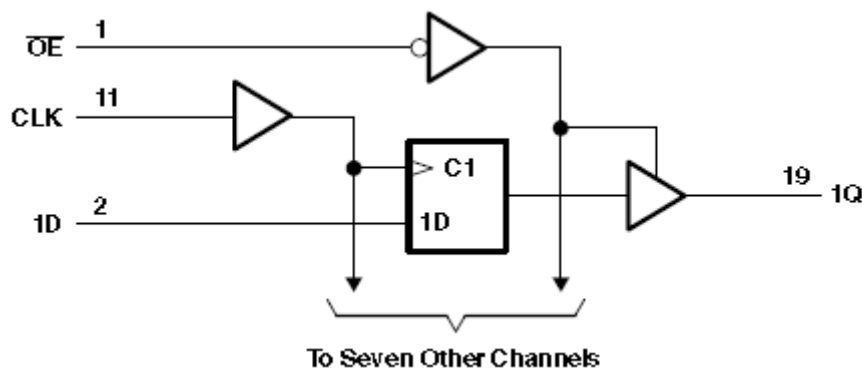
Η απαίτηση όμως για την ύπαρξη 24 ψηφιακών σημάτων ελέγχου σε ένα σύστημα μόνο και μόνο για τη ρύθμιση της λειτουργίας των πολυπλεκτών είναι αρκετά μεγάλη. Κάτι τέτοιο απαιτεί τη χρήση μικροελεγκτή μεγάλου αριθμού ψηφιακών εξόδων και αυτό από μόνο του θα αύξανε το κόστος κατασκευής της πλακέτας (εφόσον θα απαιτούνταν μεγαλύτερο τσιπ μικροελεγκτή), τις γενικότερες απαιτήσεις του συστήματος, θα μείωνε τις δυνατότητες του μικροελεγκτή, τόσο σε μνήμη όσο και σε χώρο, μην επιτρέποντας τη δυνατότητα χρήσης του για περαιτέρω λειτουργίες, όπως για παράδειγμα τη λήψη του αναλογικού σήματος και μετατροπή του σε ψηφιακό για να το στείλει στον Η/Υ.

Για τους λόγους αυτούς, κρίθηκε απαραίτητος ο περιορισμός των συνολικών ψηφιακών σημάτων που χρησιμοποιούνται στο σύστημα κατευθείαν από το ολοκληρωμένο κύκλωμα του μικροελεγκτή. Η πατέντα που χρησιμοποιήθηκε είναι η τοποθέτηση ενός καταχωρητή παράλληλης φόρτωσης 8bit, ανάμεσα σε καθέναν από τους τέσσερις πολυπλέκτες 64x1 και στο μικροελεγκτή. Συγκεκριμένα, ο κάθε καταχωρητής θα δέχεται τα 6 ψηφιακά σήματα ελέγχου, ως προγραμματιζόμενες εξόδους του μικροελεγκτή, και κάθε φορά που το ρολόι του (CLK pin) θα μεταβαίνει από την τιμή LOW στην τιμή HIGH (ως ψηφιακό σήμα), τα 6 ψηφιακά σήματα θα "περνούν" στις αντίστοιχες εξόδους του καταχωρητή και θα κατευθύνονται προς τον αντίστοιχο πολυπλέκτη. Δηλαδή, κάθε φορά ο μικροελεγκτής θα στέλνει κοινά ψηφιακά σήματα προς τους πολυπλέκτες, αλλά αυτά θα φτάνουν μόνο στον πολυπλέκτη, του οποίου ο αντίστοιχος καταχωρητής που προηγείται ρυθμίζεται μέσω του ρολογιού ώστε να περάσουν οι τιμές στις εξόδους του. Τα ψηφιακά σήματα που θα οδηγούνται στους υπόλοιπους 3 πολυπλέκτες κάθε φορά δεν θα αλλάζουν τιμή, καθώς παρά την αλλαγή των τιμών των εισόδων των αντίστοιχων παράλληλων καταχωρητών, οι εξοδοί τους θα παραμένουν ίδιες καθώς το ρολόι τους δεν άλλαξε τιμή (από 0 σε 1).

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι και οι τιμές των ρολογιών του κάθε καταχωρητή θα ρυθμίζονται μέσω του προγραμματισμού του μικροελεγκτή, ανάλογα με το σε ποιον πολυπλέκτη επιθυμούμε την οδήγηση των ψηφιακών σημάτων κάθε φορά. Επομένως πλέον διαθέτουμε ένα σύστημα το οποίο απαιτεί μόνο 6 ψηφιακές εξόδους του μικροελεγκτή για τη ρύθμιση των πολυπλεκτών και άλλες 4 για κάθε ρολόι των 4 αντίστοιχων καταχωρητών, συνολικά επομένως 10 μόλις ψηφιακές εξόδους, αντί των 24 που απαιτούνταν χωρίς τη χρήση των καταχωρητών.

Ανατρέχοντας στον τρόπο λειτουργίας ενός παράλληλου n bit, καταχωρητή, παρατηρούμε ότι ουσιαστικά πρόκειται για ένα σύστημα n D Flip Flop, παράλληλα μεταξύ τους, τα οποία δέχονται ηδιαφορετικές ψηφιακές εισόδους και μια κοινή από το ρολόι. Ένα D flip flop είναι μια στοιχειώδης διάταξη μνήμης, η οποία ανάλογα με τον παλμό του ρολογιού που δέχεται, η έξοδος είτε παραμένει σταθερή (δηλαδή στην ίδια τιμή που είχε στον προηγούμενο παλμό του ρολογιού), είτε λαμβάνει την τιμή της εισόδου του flip flop. Ένας καταχωρητής θεωρείται θετικά ακμοπυροδότητος όταν οι τιμές των εισόδων των flip flop μεταβαίνουν στις εξόδους με εμφάνιση θετικού παλμού του ρολογιού (δηλαδή από LOW σε HIGH), ενώ στην αντίστροφη περίπτωση (αλλαγή των εξόδων όταν το ρολόι μεταβαίνει από HIGH σε LOW) θεωρείται αρνητικά ακμοπυροδότητος.

Αναζητώντας ένα κατάλληλο ολοκληρωμένο που να επιτελεί τη διεργασία αυτή, καταλήγουμε στο sn74LV574 της Texas Instruments. Ουσιαστικά είναι ένα ολοκληρωμένο αποτελούμενο από 8 παράλληλα μεταξύ τους D-Flip Flops, τρισταθούς εξόδου, το οποίο εύκολα επιτελεί τη λειτουργία που απαιτούμε. Δουλεύει σε τάσεις από 2 ως και 5.5V και είναι θετικά ακμοπυροδότητο. ^[12]

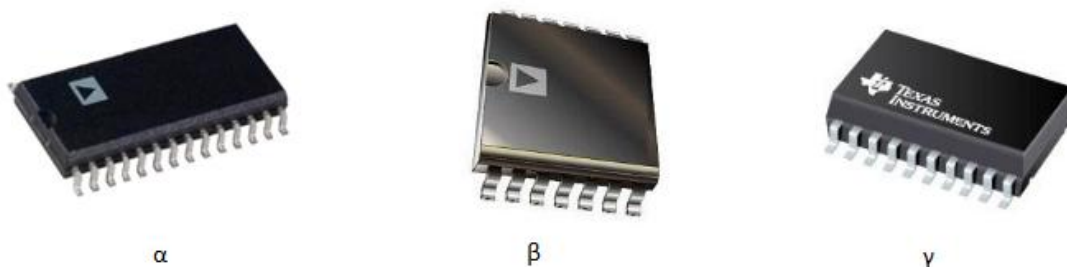


Σχήμα 13: Σχέδιο λειτουργίας ενός καναλιού του SN74LV574 σε επίπεδο λογικών πυλών

Κυκλωματικό διάγραμμα επεξήγησης της εσωτερικής διάταξης του ολοκληρωμένου SN74LV574. Το σήμα OE' βρίσκεται πάντα συνδεδεμένο με τη

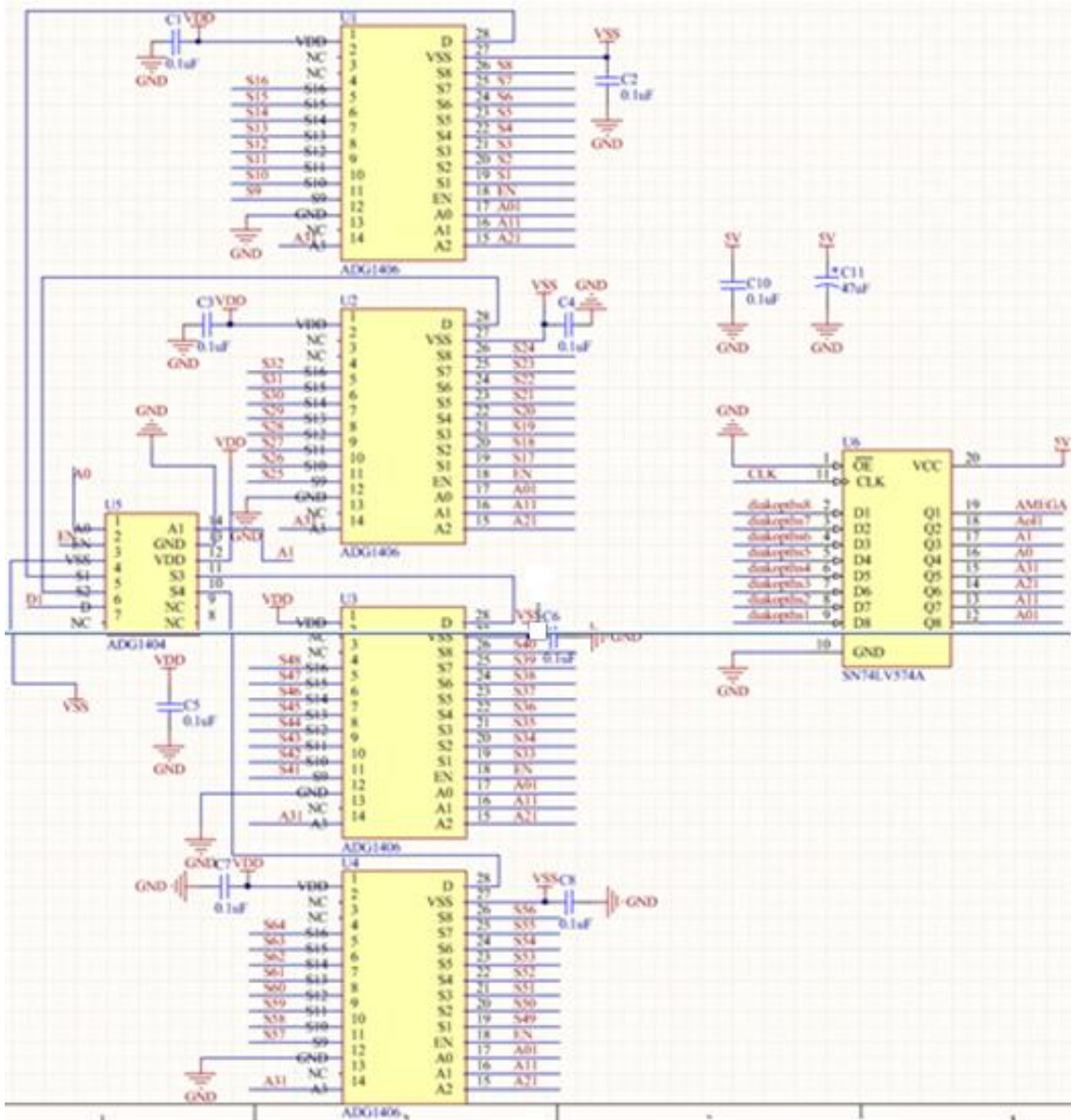
γείωση, ούτως ώστε το ολοκληρωμένο να βρίσκεται σε κατάσταση λειτουργίας. Το ρολόι CLK προερχόμενο από ψηφιακή έξοδο του μικροελεγκτή ρυθμίζει το εάν τα ψηφιακά δεδομένα 1D (προερχόμενα επίσης από το μικροελεγκτή) θα περάσουν στο 1Q (εμφάνιση θετικού παλμού-άνοδος), ώστε να αλλάξουν την κατάσταση του εκάστοτε πολυπλέκτη ή εάν η τιμή του 1Q θα παραμείνει ίση με αυτή που προϋπάρχει στο D Flip Flop από προηγούμενο προγραμματισμό του.

Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι τοποθετούνται 2 πυκνωτές μεταξύ της τροφοδοσίας του ολοκληρωμένου και της γης, ένας 100nF κεραμικός και ένας 47μF, πολικός τανταλίου, με τη θετική πλευρά του στα +5Volts. Όπως και στους πολυπλέκτες, και αυτοί εδώ οι πυκνωτές επιτυγχάνουν decoupling, απόζευξη δηλαδή της τροφοδοσίας.



Εικόνα 10: α) Ο πολυπλέκτης ADG1406, β) Ο πολυπλέκτης ADG1404, γ) Το ολοκληρωμένο SN74LV574 (Flip-Flops Tri-State Octal)

Το σχηματικό διάγραμμα του συστήματος πολυπλέκτης 1x64 (ή 64x1) και του octal D Flip flop του είναι το ακόλουθο: (χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Altium)



Σχήμα 14: Σχηματικό κυκλωματικό διάγραμμα πολυπλέκτη 64x1 με καταχωρητή

Λόγω της απόλυτης συμμετρίας των 4 αυτών διατάξεων, επιλέχθηκε να κατασκευαστούν 4 πανομοιότυπα printed circuit boards τα οποία να έχουν τέτοια μορφή ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν σε ειδικούς κωννέκτορες για τη σύνδεσή τους με το υπόλοιπο σύστημα. Η αντιμετώπιση αυτή:

- Απλουστεύει σημαντικά τον τρόπο σχεδιασμού και ελέγχου της διάταξης
- Οδηγεί στη δημιουργία μηχανικά αυτοτελών τμημάτων/υποσυστημάτων που μπορούν κάλλιστα να χρησιμοποιηθούν και σε άλλες διατάξεις

Ωστόσο υπάρχουν και τα μειονεκτήματά της:

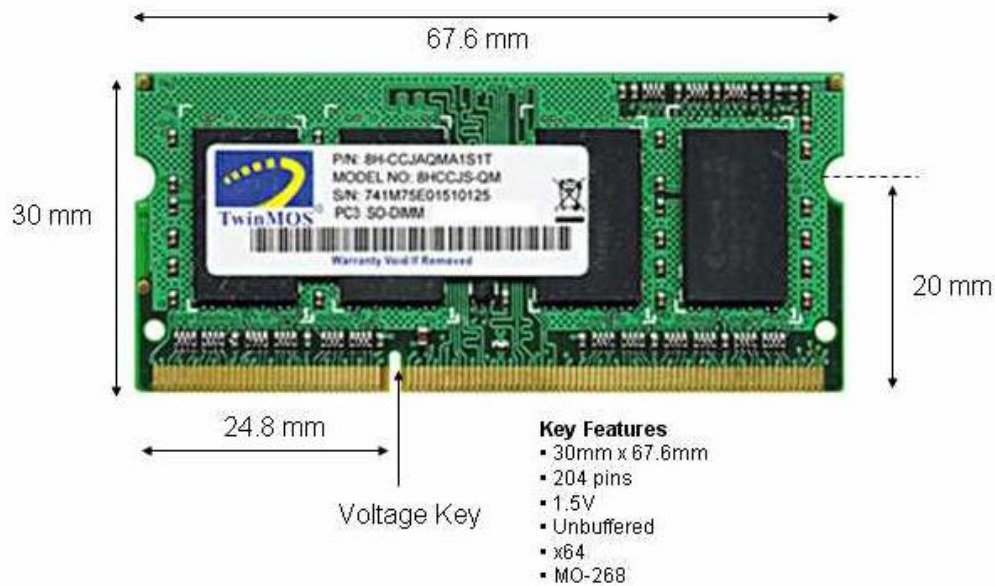
- Αυξάνεται το κόστος της κατασκευής: περισσότερες πλακέτες, περισσότερα εξαρτήματα (κωννέκτορες).

- Η συνολική διάταξη δεν αποτελεί ενσωματωμένο σύστημα με την πρακτική έννοια του όρου καθώς το συνολικό σύστημα διαμελίζεται μηχανικά σε πολλά τμήματα.

Είναι χαρακτηριστικό ότι κάθε κύκλωμα καταχωρητή-πολυπλέκτη διαθέτει 64 αναλογικά pins προς σύνδεση με το υπόλοιπο σύστημα καθώς και 9 ψηφιακά pins, γείωση και τροφοδοσία (η οποία προφανώς πρέπει να είναι ενιαία σε όλους τους πολυπλέκτες). Σημαντικό είναι επίσης το να κατασκευαστεί η πλακέτα με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγονται όσο το δυνατό περισσότερο τα παρασιτικά φαινόμενα μεταξύ των αναλογικών traces. Αυτό απαιτεί το σχεδιασμό της πλακέτας με differential pairs των αναλογικών δρόμων, κάτι το οποίο σημαίνει ότι κάθε αναλογικό σήμα θα πρέπει κατά δύναμη να βρίσκεται κοντά σε trace γείωσης. Επομένως, ανάμεσα σε δυο γειτονικά αναλογικά σήματα είναι απαραίτητο να υπάρχει μια γείωση η οποία φυσικά θα πρέπει να συνδέεται και με το υπόλοιπο σύστημα. Γίνεται έτσι εύκολα αντιληπτό ότι απαιτείται το κύκλωμα αυτό να συνδεθεί σε τουλάχιστον 150 σημεία με την υπόλοιπη διάταξη. Αυτό μας οδηγεί στην επιλογή ειδικών κοννεκτόρων τύπου SO-DIMM DR3, με 204 pins, 102 στη μπροστινή όψη και 102 στην πίσω. Ο κοννεκτορας αυτός δέχεται οριζόντια πλακέτες ειδικού σχήματος και εξειδικευμένων μηχανικών προδιαγραφών. Ακριβώς αυτό το σχήμα έχουν οι πλακέτες προσωρινής μνήμης (RAM) 3ης γενιάς που χρησιμοποιούνται για τα laptop. Σήμερα πλέον χρησιμοποιούνται SO-DIMM DDR4 και DDR5 για το σκοπό αυτό.

Το βασικό μηχανικό σχήμα μιας πλακέτας SO-DIMM DDR3 διαφαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

DDR3 SODIMM – 204pin



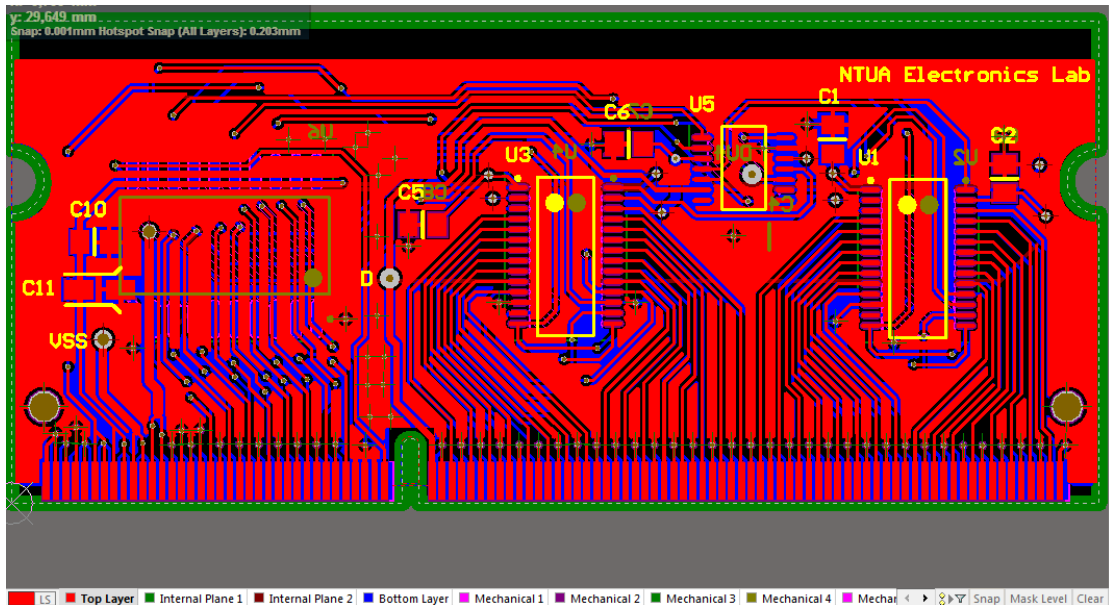
Εικόνα 11 Χαρακτηριστική πλακέτα S0-DIMMDDR3 204pin με αναγραφόμενες διαστάσεις^[13]

Βασικό χαρακτηριστικό είναι η ύπαρξη μιας εγκοπής (voltage key) στην αριστερή πλευρά της πλακέτας όπως την παρατηρεί κάποιος από την εμπρός όψη της. Αριστερά της εγκοπής αυτής βρίσκονται 36 pads εμπρός και 36 πίσω, ενώ δεξιά 65 εμπρός και άλλα 65 πίσω. Είναι απόλυτης σημασίας ο σχεδιασμός των μηχανικών προδιαγραφών της πλακέτας αυτής να πραγματοποιείται με απόλυτη ακρίβεια σε ό,τι αφορά στις διαστάσεις της και τις αποστάσεις μεταξύ των pads και των άλλων χαρακτηριστικών σημείων, ούτως ώστε όταν τοποθετηθεί μέσα στον κοννέκτορα, αφενός η τοποθέτηση να είναι δυνατή από μηχανικής άποψης (σωστό πάχος, πλάτος, θέση εγκοπής) και αφετέρου να υπάρχει πλήρης ευθυγράμμιση των pads της πλακέτας με τα pads του κοννέκτορα χωρίς το παραμικρό σφάλμα τυχόν επικάλυψης γειτονικών pads, κάτι το οποίο θα οδηγούσε σε βραχυκυκλώματα και ηλεκτρική δυσλειτουργία του συστήματος.

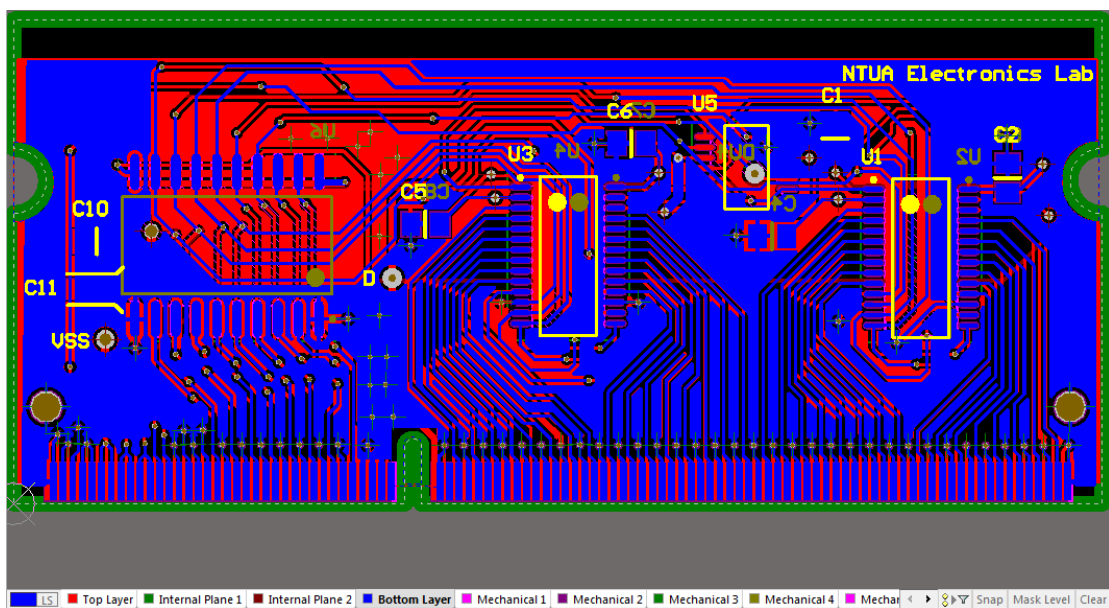
Η πλακέτα σχεδιάστηκε σε σύνολο 4 επίπεδα, 2 επίπεδα σημάτων (top και bottom) και δυο επίπεδα τροφοδοσίας (internal), εκ των οποίων το ένα χρησιμοποιείται για τα δυναμικά τροφοδοσίας -15 και +15V των πολυπλεκτών, ενώ το άλλο ως γείωση. Λόγω της ιδιαίτερης πυκνότητας των αναλογικών σημάτων και για λόγους αποφυγής ανεπιθύμητων παρασιτικών χωρητικών ή επαγωγικών συμπεριφορών σε υψηλότερες συχνότητες, όπως εννοήθηκε προηγουμένως, ανάμεσα σε δυο διαδοχικά traces θα πρέπει να υπάρχει γη. Αυτό μας οδηγεί στη δημιουργία μιας μεγάλης έκτασης (τόσο στο top όσο και στο bottom layer) έκχυσης χαλκού που

θα χρησιμοποιείται ως γη (και προφανώς θα συνδέεται με αυτή σε όσα το δυνατόν περισσότερα σημεία), καθώς επίσης και στην κατανομή των αναλογικών σημάτων ανά 2 pad, αφήνοντας ένα κενό για τη γη, που με τη σειρά της μέσω αυτών των pads θα συνδέεται με τα υπόλοιπα κυκλώματα της συνολικής διάταξης.

Στις παρακάτω εικόνες απεικονίζονται η πλακέτα πολυπλέκτη so-dimm ddr3, με μαρκαρισμένο σε πρώτο πλάνο το top layer και το bottom layer αντίστοιχα, ενώ στην 3η και 4η εικόνα διακρίνεται και το ίδιο το κύκλωμα εκτυπωμένο και με τα στοιχεία κολλημένα. Να σημειωθεί ότι για τα περισσότερα κυκλωματικά διαγράμματα-σχέδια καθώς και για τα pcb layouts χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Altium designer.



Σχήμα 15: PCB σχέδιο της πλακέτας SO-DIMM DDR3, πρώτο επίπεδο επίστρωσης χαλκού



Σχήμα 16: σχέδιο της πλακέτας SO-DIMM DDR3, τελευταίο (4ο) επίπεδο επίστρωσης χαλκού



Εικόνα 12 Εμπρός όψη της πλακέτας της πλακέτας SO-DIMM DDR3



Εικόνα 13: Πίσω όψη της πλακέτας SO-DIMM DDR3

Η χαρακτηριστική εγκοπή διαχωρίζει τα αναλογικά σήματα (δεξιά) από τα ψηφιακά (αριστερά) ενώ ακόμα πιο αριστερά βρίσκονται (καταλαμβάνοντας διπλάσιο αριθμό pads) τα σήματα τροφοδοσίας. Στην εμπρός όψη διέρχονται τα ψηφιακά σήματα που προέρχονται από τον μικροελεγκτή ενώ στην πίσω όψη διέρχονται τα ψηφιακά σήματα που οδηγούνται από τον καταχωρητή προς τους πολυπλέκτες. Τα τελευταία αυτά σήματα μάλιστα εξέρχονται μέσω των πίσω pads για λόγους επέκτασης του συστήματος από 2^6 αναλογικά σήματα (εδώ χρησιμοποιούνται μόνο 6 από τα 8 ψηφιακές εισόδους του SN74LV574) σε 2^8 , όπου θα χρησιμοποιούνται και οι 8. Στην εμπρός όψη κολλήθηκαν 2 πολυπλέκτες 64 προς 1 και ένας πολυπλέκτης 4

προς 1, ενώ στην από πίσω 2 πολυπλέκτες 64 προς 1 (ακριβώς πίσω από τους 2 16 προς 1 της εμπρός όψης) και ο octal D-FlipFlop. Είναι χαρακτηριστικό ότι όταν τοποθετούνται στους dimm connectors οι πλακέτες αυτές, αυτό που φαίνεται από πάνω είναι στην πραγματικότητα η πίσω όψη της πλακέτας αυτής. Επομένως, δεδομένου ότι σύμφωνα με το datasheet του SN74LV574, το ύψος του ολοκληρωμένου είναι σχετικά μεγάλο (2.65mm)^[12] σε σημείο που υπερβαίνει το ύψος της πλακέτας από την πλακέτα που πρόκειται να κολληθούν οι dimm connectors, αυτό θα πρέπει να βρίσκεται όταν η πλακέτα τοποθετηθεί στον κοννέκτορα από την πάνω μεριά (ώστε να χωράει), δηλαδή στο bottom layer της πλακέτας αυτής. Άλλο ένα χαρακτηριστικό της είναι ότι τα εμπρός και τα πίσω pads δεν βρίσκονται ακριβώς το ένα πίσω από το άλλο, αλλά έχουν μια απόκλιση 0.3mm, ^[14] αρκετά σημαντική για την τάξη μεγέθους των μηχανικών διαστάσεων της. Με άλλα λόγια, τα pad του top και του bottom layer έχουν διαφορετικά κέντρα συμμετρίας. Τέλος, το πάχος της επιλέγεται 1mm, όσο ακριβώς ορίζεται στα datasheet των πλακετών αυτού του τύπου. ^[14]

8.3. Ο μικροελεγκτής

Ήδη έχει γίνει απλή αναφορά στην έννοια μικροελεγκτής και στο στοιχειώδη του ρόλο στο κύκλωμα αυτό: να δίνει ως εξόδους προγραμματιζόμενα ψηφιακά σήματα. Ωστόσο η έννοια του μικροελεγκτή είναι κάτι πολύ πιο ευρύ και περίπλοκο, καθώς αποτελεί αναπόσπαστο στοιχείο σε κάθε σύγχρονο και μη ηλεκτρονικό σύστημα. Για το λόγο αυτό θα πρέπει πρώτα να γίνει μια γενική εισαγωγή στην έννοια αυτή. Στη συνέχεια ακολουθεί η κατηγοριοποίησή τους με διάφορα κριτήρια, έπειτα επεξηγούνται οι τρόποι σύνδεσής τους με τον υπολογιστή και το υπόλοιπο κύκλωμα, ενώ τέλος πραγματοποιείται η επιλογή του μικροελεγκτή που θα χρησιμοποιηθεί στο παρόν σύστημα. Παράλληλα γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση της έννοιας του ενσωματωμένου συστήματος.

8.3.1. Η έννοια

Ο μικροελεγκτής (ή πιο επιστημονικά, μικροϋπολογιστής) αποτελεί ένα αυτόνομο^[15] σύστημα με περιφερειακές μονάδες (διάταξη "αφέντης-σκλάβος"- "master-slave"), μνήμη και επεξεργαστή, για την εκτέλεση υπολογισμών. Ουσιαστικά πρόκειται, όπως μαρτυρά και το όνομά του, για έναν υπολογιστή, καθώς διαθέτει εσωτερικά όλα τα χαρακτηριστικά του. Όλες αυτές οι λειτουργίες ενσωματώνονται

σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα (microcontroller chip). Οι μικροϋπολογιστές έχουν τη δυνατότητα να προγραμματιστούν ώστε να επιτελέσουν συγκεκριμένες λειτουργίες. Πιο συγκεκριμένα, ένα τσιπ μικροελεγκτή προγραμματίζεται έτσι ώστε να δίνει ρεύμα σε συγκεκριμένα πινάκια ώστε αυτά να τροφοδοτήσουν το υπόλοιπο κύκλωμα ή τμήματά του με κατάλληλο τρόπο με σκοπό αυτό να επιτελεί την επιθυμητή λειτουργία. Σε πολλές περιπτώσεις, ένας μικροελεγκτής μπορεί να δέχεται και εισόδους είτε από κάποιον αισθητήρα (κάτι που καλείται real world input) είτε από το ίδιο το κύκλωμα και με βάση αυτές να πραγματοποιείται και ο προγραμματισμός του, ώστε να δώσει τις εξόδους που απαιτούνται.

Συνήθως ο προγραμματισμός των μικροελεγκτών υλοποιείται μέσω της επικοινωνίας του με έναν προσωπικό υπολογιστή ή κάποια αντίστοιχη προγραμματιστική πλατφόρμα (ή ακόμα και άλλους μικροελεγκτές, ωστόσο αυτή η αλυσίδα πάντα σχεδόν εκκινεί από κάποιον Η/Υ). Η επικοινωνία αυτή φυσικά δεν επιτυγχάνεται με μονοσήμαντο τρόπο. Παρακάτω υπάρχει μια συνοπτική παρουσίαση των βασικών αυτών τρόπων επικοινωνίας, που γενικά σχετίζονται άμεσα με τον τρόπο σύνδεσης του μικροελεγκτή, τόσο με το υπόλοιπο κύκλωμα όσο και με τον ίδιο τον υπολογιστή.

Συνηθίζεται σε αρκετές περιπτώσεις να υπάρχει μια σύγχυση μεταξύ των όρων μικροϋπολογιστής και μικροεπεξεργαστής. Στην πραγματικότητα, ο μικροϋπολογιστής αποτελεί μια διάταξη ευρύτερη του μικροεπεξεργαστή, τον οποίο και περιλαμβάνει κατά κανόνα μεταξύ άλλων. Έτσι ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα μικροελεγκτή περιέχει εσωτερικά μικροεπεξεργαστή (CPU) που χρονίζεται σε συγκεκριμένη συχνότητα και τροφοδοτείται ξεχωριστά από την υπόλοιπη διάταξη, μνήμες διαφόρων τύπων (flash, sram, eeprom), διαχειριστή ισχύος (power manager), κύκλωμα επεξεργασίας συχνοτήτων, εσωτερικό ρολόι-γεννήτρια παλμών, σειριακή περιφερειακή διεπαφή (serial peripheral interface- SPI και σε αρκετές περιπτώσεις διεπαφή USB, (USB interface), καθώς και μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό σήμα (analog to digital converter). ^[16]Επομένως, αναφερόμαστε σε έναν ολοκληρωμένο μικρού μεγέθους υπολογιστή, ο οποίος όμως απαιτεί προγραμματισμό και γι αυτό το λόγο απαιτείται κατάλληλη σύνδεσή του και επικοινωνία με το κύκλωμα και τον κεντρικό υπολογιστή.

8.3.2. Χαρακτηριστικά και τύποι μικροελεγκτών

Υπάρχουν αρκετές εταιρείες οι οποίες εξειδικεύονται στην κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων που προορίζονται για μικροϋπολογιστές. Οι πιο γνωστές από αυτές είναι η Atmel, η Microchip, η Zilog, η NXP, κλπ. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι δεν προορίζονται όλοι οι μικροελεγκτές για τις ίδιες χρήσεις. Αρκετοί είναι σχεδιασμένοι για παράδειγμα για βιομηχανικές αποκλειστικά εφαρμογές και γι αυτό το λόγο οι προδιαγραφές τους προβλέπουν υψηλές τάσεις. Δε θα ήταν υπερβολή να ειπωθεί ότι όσο υπάρχει αυτοματοποιημένη βιομηχανία υπάρχουν και μικροελεγκτές, καθώς ουσιαστικά η ύπαρξή τους συνέβαλε στην ανάπτυξη των πρώτων ηλεκτρονικών αυτοματοποιημένων μηχανισμών και των ρομποτικών κυττάρων.

Για απλές ηλεκτρονικές εφαρμογές χαμηλών τάσεων χρησιμοποιούνται πιο ευρέως οι μικροελεγκτές της Atmel, της Microchip και για πιο σύνθετα συστήματα υψηλών απαιτήσεων μνήμης και ταχύτητας, οι ARM. Οι δε πρώτοι καλούνται και AVR, ενώ οι δεύτεροι PIC. Για τους πρώτους ειδικότερα, υπάρχει υπέρ αρκετή πληροφόρηση στον παγκόσμιο ιστό, πηγές open source code για τον προγραμματισμό του και για πληθώρα εφαρμογών.

Σε ό,τι αφορά στους AVR, αν και διακρίνονται σε υποκατηγορίες με αρκετά κριτήρια, διαθέτουν ορισμένα κοινά βασικά χαρακτηριστικά.

Πρώτο και βασικότερο από αυτά είναι ότι διαθέτουν κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU), τροποποιημένης αρχιτεκτονικής Harvard, τύπου RISC. Η Harvard έχει το βασικό χαρακτηριστικό ότι διαθέτει φυσικά διαχωρισμένα σήματα και αποθηκευτικό χώρο για τον κώδικα του προγράμματος και τα δεδομένα. Είναι δυνατή η ταυτόχρονη πρόσβαση στη μνήμη του προγράμματος και στη μνήμη των δεδομένων^{[16],[17]}. Η Harvard διαφέρει από την αρχιτεκτονική Von Neumann που χρησιμοποιείται σε CPU προσωπικών υπολογιστών της οποίας βασικό γνώρισμα αποτελεί το διαμοιρασμό σημάτων και μνήμης του κώδικα και των δεδομένων. Η αρχιτεκτονική τύπου RISC) (Reduced Instruction Set Computer) έχει το χαρακτηριστικό ότι ένα μικρό σύνολο από εντολές εκτελούν έναν ελάχιστο αριθμό από απλές εργασίες. Πολύπλοκες εντολές προσομοιώνονται με ένα υποσύνολο από απλές εντολές. Ο προγραμματισμός σε RISC είναι πιο δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία από ό,τι σε άλλο σχεδιασμό (π.χ. CISC), γιατί οι περισσότερες από τις πολύπλοκες εντολές θα πρέπει να προσομοιωθούν χρησιμοποιώντας απλές εντολές.

Τέλος, ένας CPU μικροελεγκτή μπορεί να είναι των 8bit (η πιο συνηθισμένη κατηγορία), των 16bit ή των 32bit.

Άλλο βασικό κοινό χαρακτηριστικό αποτελούν οι τύποι μνημών που παρουσιάζονται.

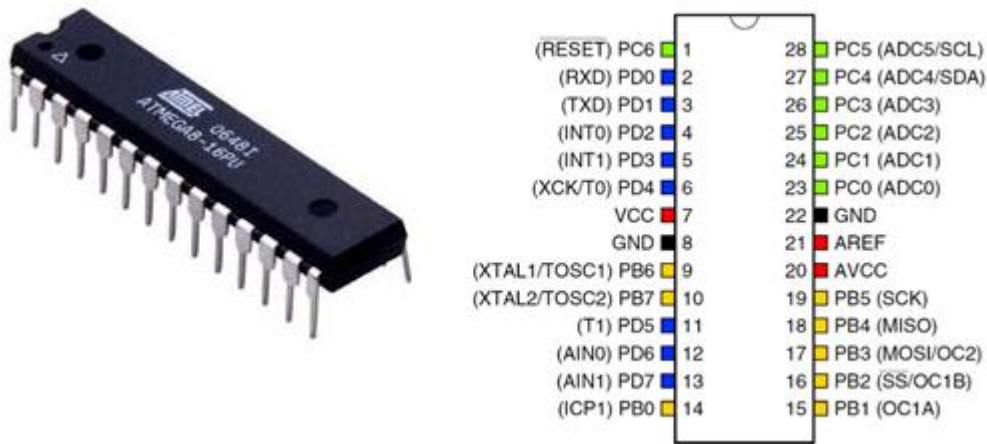
Η μνήμη flash αποτελεί μια μη πτητική μνήμη η οποία χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την εγγραφή και την αποθήκευση του κώδικα που χρησιμοποιείται για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή. Το μέγεθος της μνήμης αυτής διαφέρει από μικροελεγκτή σε μικροελεγκτή και καθορίζει σε σημαντικό βαθμό την αποθηκευτική του δυνατότητα σε μεγάλα και περίπλοκα προγράμματα που γράφονται με σκοπό εξειδικευμένες λειτουργίες. Συνήθως στους περισσότερους AVR, ένα μέρος της συνολικής flash είναι ήδη δεσμευμένο για bootloader. Αυτό σημαίνει ότι προϋπάρχει εργοστασιακός κώδικας ο οποίος χρειάζεται για να μπορεί εύκολα ο χρήστης-μηχανικός να προγραμματίσει το τσιπ με το δικό του κώδικα για τις ανάγκες του συστήματος που κατασκευάζει.^[16]

Η EEPROM^[18] είναι επίσης μια μη πτητική μνήμη (δηλαδή όταν παύει να υπάρχει τροφοδοσία του μικροελεγκτή, το περιεχόμενο της μνήμης αυτής εξακολουθεί να υφίσταται). Βασικό χαρακτηριστικό της είναι ότι μπορεί να προγραμματιστεί ή να διαγραφεί μέσω ηλεκτρονικών παλμών, χωρίς να απαιτείται παρέμβαση από υπολογιστή, ενώ είναι μόνο για ανάγνωση.

Η SRAM είναι η μνήμη χρησιμοποιεί για την αποθήκευση δεδομένων τις παραδοσιακές πύλες φλιπ-φλοπ. Σε αυτήν αποθηκεύονται οι μεταβλητές, οι σταθερές, δηλαδή τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στον κώδικα. Διατηρεί την κατάστασή της (0 ή 1), δηλαδή τα δεδομένα διατηρούνται αποθηκευμένα όσο υπάρχει τροφοδοσία ρεύματος χωρίς να χρειάζονται ανανέωση. Η μνήμη αυτή είναι αρκετά γρήγορη αλλά ακριβή.

Από άποψης υλικού και εξωτερικής μορφολογίας ένας AVR μικροελεγκτής, όπως και γενικότερα οι μικροελεγκτές, διαθέτουν κάποια πινάκια τροφοδοσίας (αρκετά χαμηλής τάσης, συνήθως είναι 5V, ή 3.3V), και μια σειρά πινάκων που χρησιμοποιούνται ως ψηφιακές είσοδοι/έξοδοι (I/O digital pins). Σε αυτά τα πινάκια ορίζεται κατά τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή πότε και αν θα περνάει ρεύμα ως έξοδος ή θα δέχεται ρεύμα ως είσοδο το τσιπ. Σε αρκετά τσιπ, μερικά από αυτά τα πινάκια λειτουργούν και ως αναλογικές είσοδοι, για το διάβασμα αναλογικών

σημάτων από αισθητήρες, ή pwm (pulse width modulation), για τη δημιουργία παλμών υψηλών συχνοτήτων και τη διαμόρφωσή τους. Πολλά πινάκια επίσης διαθέτουν και άλλες λειτουργίες, όπως υποδοχή SPIσημάτων (βλ. παρακάτω), σύνδεση με εξωτερικό κρύσταλλο ή ταλαντωτή, σύνδεση με USB, κλπ.



Εικόνα 14: Αριστερά: ο μικροελεγκτής της Atmel Atmega8, Δεξιά: το διάγραμμα με τις λειτουργίες των pins που διαθέτει.

Από άποψης λογισμικού, οι μικροελεγκτές παλαιότερα μπορούσαν να προγραμματιστούν μόνο σε γλώσσα χαμηλού επιπέδου (μηχανής, ή assembly). Στις αρχές της δεκαετίας του 1990 παρουσιάστηκε η δυνατότητα προγραμματισμού τους σε υψηλό επίπεδο και ειδικότερα σε C/C++, με τη χρήση ειδικών εντολών. Πλέον η εξέλιξη των δυνατοτήτων τόσο των μικροελεγκτών όσο και του λογισμικού επιτρέπουν τη χρήση σχεδόν οποιουδήποτε περιβάλλοντος χαμηλού ή υψηλού επιπέδου για τον προγραμματισμό των μικροϋπολογιστών. Είναι μάλιστα δυνατή η χρήση υπάρχοντων ειδικών βιβλιοθηκών αλλά και η δημιουργία νέων που επιτρέπουν όλο και πιο απλές εντολές για συνθετότερες λειτουργίες, οι οποίες παλαιότερα μπορούσαν να υλοποιηθούν μόνο με εκατοντάδες γραμμές κώδικα χαμηλού επιπέδου. Σήμερα ευρέως χρησιμοποιείται η C/C++ σε συνδυασμό με εντολές χαμηλού επιπέδου όπου αυτές διευκολύνουν, καθώς επίσης και αρκετές βιβλιοθήκες με παραλλαγές της python ή της java. Σε πολλές αναπτυξιακές πλακέτες του εμπορίου (arduino, nucleo, lilypad, aery32, κλπ.) έχουν αναπτυχθεί ειδικές βιβλιοθήκες με σκοπό οι μικροελεγκτές που περιέχονται να προγραμματίζονται με απλές και ειδικά διαμορφωμένες εντολές.

Οι AVR μικροελεγκτές διαθέτουν εσωτερικά πληθώρα καταχωρητών, καθένας από τους οποίους επιτελεί μια ή περισσότερες συγκεκριμένες λειτουργίες. Οι ονομασίες των καταχωρητών αυτών διαφέρουν από τσιπ σε τσιπ και οι δυνατότητες

και τα αναλυτικά τους χαρακτηριστικά καταγράφονται από τον ίδιο τον κατασκευαστή στο εκάστοτε φύλλο προδιαγραφών του ολοκληρωμένου (datasheet).

Παρά όμως τις διαφορές στο πλήθος και τις ονομασίες των καταχωρητών αυτών, μπορούμε να διακρίνουμε 3 βασικούς καταχωρητές τους οποίους θα χρησιμοποιήσουμε στην παρούσα εργασία και χρησιμοποιούνται γενικότερα ως βασικοί σε όλα τα ηλεκτρονικά projects, είτε άμεσα είτε έμμεσα μέσω βιβλιοθηκών που περιέχουν εντολές-συναρτήσεις που καλούν αυτούς τους καταχωρητές.^[19]

Ο DDRx Register (στους 8 bits AVR) χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των πινακίων (bits) που θα χρησιμοποιηθούν ως ψηφιακές είσοδοι ή έξοδοι στο εκάστοτε PORT. Εδώ μια σημαντική παρένθεση. Κάθε τσιπ μικροελεγκτή περιέχει ένα ή περισσότερα PORTS, καθένα από τα οποία περιέχει έναν αριθμό από pins (bits, I/O pins). Ανάλογα με το αν ο μικροελεγκτής χαρακτηρίζεται από 8, 16, 32 ή περισσότερα bits, τόσα bits περιέχει κάθε PORT (ή λίγα λιγότερα ανάλογα με την κατασκευή). Κάθε PORT κατονομάζεται συνήθως με ένα κεφαλαίο γράμμα της λατινικής αλφαβήτου (A, B, C, D, E, etc), ενώ κάθε πινάκιο ως P(Port_name)(Pin_number), για παράδειγμα PA00, PA01, PB03, κλπ. Στον προγραμματισμό σε C++, κάθε εντολή εκχώρησης που δίδεται σε DDRx καταχωρητή, δίδει τιμές σε ένα ολόκληρο PORT του μικροελεγκτή, δηλαδή σε όλα μαζί τα bits που περιέχει αυτό το PORT. Για παράδειγμα, σε C για AVR 8 bit μπορούμε να γράψουμε `DDRA=0b10110001` (μορφή 0b(δυαδική παράσταση των 8 bit)) ή `DDRA=0xB1`; (16δική μορφή της προηγούμενης δυαδικής παράστασης) ή

`DDRA = (1<<DDA0)|(1<<DDA4)|(1<<DDA5)|(1<<DDA7);`ή

`DDRA = (1<<0)|(1<<4)|(1<<5)|(1<<7);`

Οι εντολές αυτές σημαίνουν ότι στο PORTA, τα πινάκια 0, 4, 5 και 7 τίθενται ως ψηφιακές έξοδοι (μονάδα) ενώ όλα τα υπόλοιπα πινάκια στο PORTA τίθενται ως ψηφιακές είσοδοι (μηδενικά). Βασικό χαρακτηριστικό των εντολών καταχωρητών υψηλού επιπέδου είναι η αδυναμία προγραμματισμού του κάθε bit ανεξάρτητα από όλα τα υπόλοιπα. Για το λόγο αυτό αρκετά συχνά χρησιμοποιούνται εντολές χαμηλού επιπέδου (assembly) που παρεμβάλλονται ενδιάμεσα στον κώδικα της C++ αποκλειστικά για το σκοπό αυτό, είτε άλλες προγραμματιστικές τεχνικές με C++, οι οποίες βέβαια είναι πιο δαπανηρές σε μνήμη και επαφίεται στην κρίση του προγραμματιστή το ποιο δρόμο θα επιλέξει. Στους 32bit μικροελεγκτές AVR, ο

καταχωρητής που επιτελεί τη λειτουργία αυτή ονομάζεται ODER, και μια αντίστοιχη εντολή γράφεται μεταξύ άλλων ως εξής:
`AVR32_GPIO.port[0].oder=(1<<0)|(1<<1)|(1<<2)|(1<<3)|(1<<4)|(1<<5)|(1<<6)|(1<<7)|(1<<8)|(1<<9)|(1<<10);` που σημαίνει ότι στο PORT[0] του 32bit μικροελεγκτή, τα bit 0,1,2,3,4,5,6,7,8,9 και 10 τίθενται ως ψηφιακές εξόδους, ενώ τα υπόλοιπα από 11-31 τίθενται αυτόματα ως ψηφιακές εισόδους.

Ο PORTx Register, χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της τιμής τάσης (ψηφιακά άσπος ή μηδενικό, ηλεκτρικά Vcc ή 0) που δίδεται σε κάθε pin που πρέπει προηγουμένως να έχει ορισθεί με τον καταχωρητή DDRx ως ψηφιακή έξοδος, στο εκάστοτε PORT. Για παράδειγμα με τη σειρά εντολών `DDRA = (1<<0)|(1<<4)|(1<<5)|(1<<7); PORTA=(1<<0)|(1<<6)`, δίδεται η τιμή HIGH στο πινάκιο 0 του PORTA, που έχει ορισθεί ως ψηφιακή έξοδος, ενώ στα πινάκια 4,5,7 τίθεται LOW (στο PA06 εφόσον στην προηγούμενη εντολή ορίσθηκε ως ψηφιακή είσοδος, δεν τίθεται απολύτως τίποτα). Στους 32bit AVR τη λειτουργία αυτή επιτελεί ο καταχωρητής OVR, με χρήση της σύνταξης `AVR32_GPIO.port[0].onv=παράσταση`, σε γλώσσα C++. Προφανώς με τους καταχωρητές επίδοσης τιμής HIGH ή LOW στις ψηφιακές εξόδους δεν είναι δυνατή η αλλαγή της ιδιότητας των pin από έξοδο σε είσοδο και αντίστροφα. Η εντολή εκχώρησής του, αντιλαμβανόμεστε ότι θα "πιάσει" μόνο όσα πινάκια έχουν οριστεί ως ψηφιακές εξόδους.

Ο PINx register χρησιμοποιείται για να διαβάσει τις ψηφιακές τιμές των πινάκων που πρέπει να έχουν προηγουμένως οριστεί ως ψηφιακές εισόδους (δηλαδή μηδενικά στον DDRx). Η σύνταξη και η λογική στη γλώσσα C/C++ είναι παρόμοια με αυτή του PORTx.

8.3.3. Κυκλώματα μικροελεγκτών και επικοινωνία

Ένα τσιπ μικροελεγκτή για να λειτουργήσει σωστά θα πρέπει αφενός να συνδέεται κατάλληλα με το κύκλωμα που σχεδιάζεται και αφετέρου να προγραμματιστεί σωστά. Αυτό απαιτεί μια διάταξη επιπλέον στοιχείων γύρω από το ολοκληρωμένο του μικροελεγκτή. Έτσι, πλέον αναφερόμαστε σε ένα επιπλέον κύκλωμα, αυτό του μικροελεγκτή. Το κύκλωμα αυτό συναντάται σε δυο μορφές.

Η πρώτη μορφή που συναντάται ένα κύκλωμα μικροελεγκτή χαρακτηρίζεται από ένα εντελώς αυτόνομο κύκλωμα, το οποίο είναι κατασκευασμένο με τέτοιο τρόπο, ούτως ώστε να διαθέτει τη δυνατότητα σύνδεσης με οποιοδήποτε άλλο κύκλωμα, συνήθως μέσω κατάλληλα σχεδιασμένων υποδοχών. Οι διατάξεις αυτές καλούνται αναπτυξιακές πλακέτες (development boards), και κατασκευάζονται από πολλές εταιρίες.

Συνήθως μάλιστα, οι περισσότερες από αυτές τις αναπτυξιακές πλακέτες, πέρα από καλά οργανωμένο hardware διαθέτουν και καλές δυνατότητες ανάπτυξης λογισμικού. Στους μικροελεγκτές τους πέρα από το bootloader, έχει πραγματοποιηθεί από τους κατασκευαστές ειδικός προγραμματισμός για την ενσωμάτωση βιβλιοθηκών που περιέχουν ειδικές εντολές, οι οποίες δεν ανήκουν απαραίτητα σε κάποια γλώσσα και χαρακτηρίζονται περισσότερο ως ψευδοκώδικας. Σκοπός της ύπαρξης του λογισμικού αυτού είναι να μπορούν οι πλακέτες αυτές να προγραμματιστούν εύκολα από τον κατασκευαστή του συνολικού συστήματος, που θα προγραμματίζεται από την αναπτυξιακή πλακέτα. Συνήθως οι αναπτυξιακές πλακέτες είναι κατασκευασμένες από άποψη υλικού και λογισμικού με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να προγραμματιστούν και να επικοινωνήσουν με τον υπολογιστή και το κύκλωμα πολύ εύκολα, χωρίς να απαιτούνται βαθιές γνώσεις στο hardware και το software, ή επιπλέον πλακέτες (π.χ. external programmers). Οι πλακέτες αυτές χρησιμοποιούνται στην ανάπτυξη και τη δοκιμή πρωτοτύπων συστημάτων με τη χρήση breadboard ή πρόχειρα κατασκευασμένων πλακετών, με σκοπό μακροπρόθεσμα την ανάπτυξη ενσωματωμένων συστημάτων που θα υλοποιούν την ίδια λειτουργία και θα έχουν κατασκευαστεί σε μορφή που πληροί εμπορικές προδιαγραφές. Μερικές πολύ γνωστές αναπτυξιακές πλακέτες είναι οι εξής:

- **Arduino.** Πρόκειται για την πιο γνωστή εταιρία κατασκευαστή development boards, τα οποία είναι σχετικά προσιτά και εύχρηστα στο ευρύ κοινό, ακόμα και αν δεν διαθέτει εμπειρία στον τομέα της ηλεκτρονικής ή του προγραμματισμού. Συναντάται σε πολλές εκδόσεις με διαφορετικές υπολογιστικές δυνατότητες, ανάλογα με τις απαιτήσεις του συστήματος προς προγραμματισμό (Uno, Due, Micro, Nano, Zero, Yun, Leonardo, κλπ). Τόσο το υλικό όσο και το λογισμικό που χρησιμοποιεί είναι προσβάσιμα στο ευρύ κοινό, ενώ υπάρχει πληθώρα πηγών ανοιχτού κώδικα για πολλαπλές εφαρμογές. Επιπρόσθετα υπάρχει ειδικός

συντάκτης (IDE) για τη συγγραφή του κώδικα και φυσικά την ενσωμάτωσή του στον μικροελεγκτή. Παρόλα αυτά ο τρόπος κατασκευής και προγραμματισμού της ίδιας της πλακέτας είναι τέτοιος ώστε περιορίζει τις ανώτερες δυνατότητες του μικροελεγκτή που ενσωματώνει, με αποτέλεσμα να μην προτιμάται από έμπειρους ηλεκτρονικούς, παρά μόνο ίσως για τη δοκιμή πρωτοτύπων συστημάτων των οποίων ο σχεδιασμός βρίσκεται σε πολύ πρώιμο στάδιο.



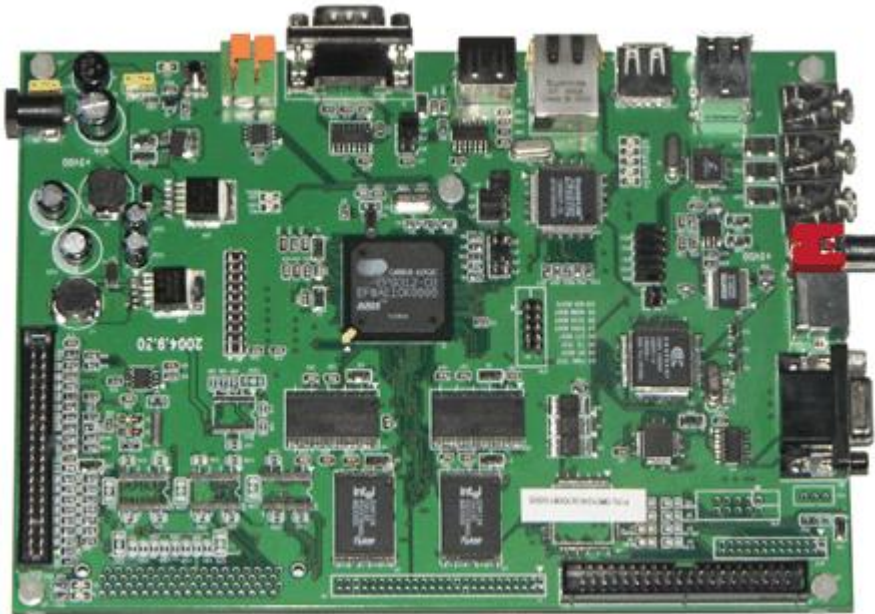
Εικόνα 15: Αναπτυξιακή πλακέτα arduino Uno (ενσωματώνει το μικροελεγκτή Atmel Atmega328P).

- Nucleo. Επίσης μια κατηγορία προσιτών πλακετών και λίγο πιο απαιτητικών σε γνώσεις του χρήστη από τις arduino, με πολύ περισσότερες όμως δυνατότητες, καθώς διαθέτουν κατά βάση ισχυρότερους μικροελεγκτές (συνήθως τύπου ARM). Διαθέτουν επίσης ειδικές βιβλιοθήκες λογισμικού, δεν απαιτούν κύκλωμα προγραμματιστή (external programmer). Όπως και τα arduino, και εδώ έχουν αναπτυχθεί ειδικοί συντάκτες για να προγραμματίζονται χωρίς ο προγραμματιστής να διαθέτει βαθιές γνώσεις σε embedded systems.
- BeagleBoard xM. Μια αρκετά ακριβότερη υψηλών δυνατοτήτων αναπτυξιακή πλακέτα που προτιμάται από έμπειρους ηλεκτρονικούς. Πέρα από τα στοιχειώδη, διαθέτει μικροελεγκτή ARM με μικροεπεξεργαστή συχνοτήτων 1GHz, συνδεσιμότητα με καλώδιο ethernet, ενώ διατίθεται ανοιχτός κώδικας.^[20]

Αναπτυξιακές πλακέτες κατασκευάζονται ακόμα και από τις ίδιες τις εταιρίες που κατασκευάζουν τους μικροελεγκτές, τους οποίους μάλιστα ενσωματώνουν και τις διαθέτουν ως ειδικά εργαλεία υλικού για την απλούστερη χρήση των ολοκληρωμένων.

Ωστόσο, παρότι οι αναπτυξιακές πλακέτες είναι απαραίτητες για τον πειραματισμό των ηλεκτρονικών σε νέα συστήματα προς σχεδιασμό και υλοποίηση (το γνωστό prototyping), σε καμία περίπτωση δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν στο τελικό σύστημα, είτε αυτό προορίζεται για επιστημονικούς είτε για εμπορικούς σκοπούς.

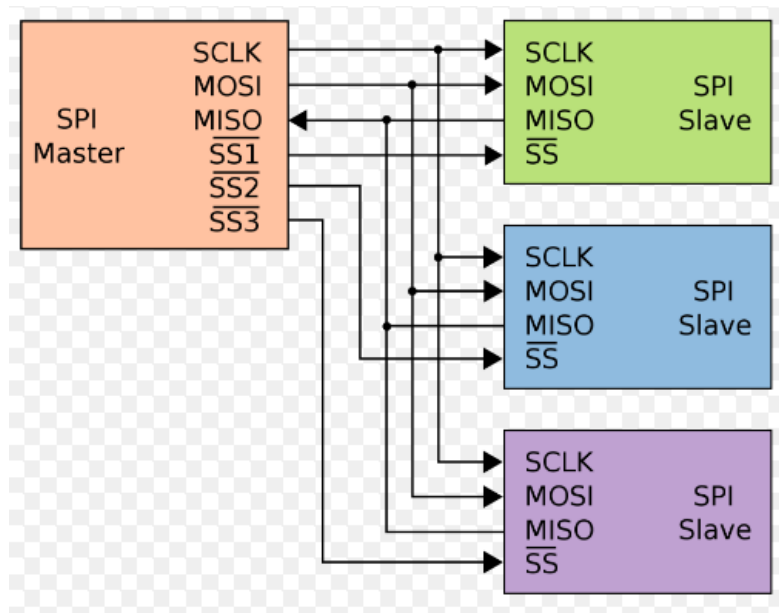
Τα κυκλώματα μικροελετών συναντώνται και ως τμήματα μεγαλύτερων διατάξεων-πλακετών, μπορεί δηλαδή να βρίσκονται ενσωματωμένα σε κοινή πλακέτα (motherboard) με το σύστημα που προγραμματίζεται από αυτές. Στην πραγματικότητα, βέβαια, το ενσωματωμένο σύστημα αποτελεί μια πολύ πιο ευρεία έννοια. Πρόκειται για το σύστημα που ενσωματώνει το λογισμικό μέσα στο υλικό, με σκοπό την υλοποίηση διατάξεων- συσκευών που χρησιμοποιούνται ούτως ώστε να ελέγχουν, να απεικονίζουν ή να υποβοηθούν τη λειτουργία υλικού εξοπλισμού. Στην πραγματικότητα όλες οι γνωστές μας και μη ηλεκτρονικές συσκευές αποτελούν ενσωματωμένα συστήματα.



Εικόνα 16: Μητρική πλακέτα ενσωματωμένου συστήματος

Επανερχόμενοι στο θέμα των κυκλωμάτων των μικροελετών, αυτά είτε βρίσκονται ενσωματωμένα είτε όχι, διαθέτουν ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά υλικού, τα οποία βέβαια διαφέρουν μερικώς ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή. Παρόλα αυτά μπορούμε να διακρίνουμε μερικούς βασικούς τρόπους επικοινωνίας με τον υπολογιστή και κατά συνέπεια προγραμματισμού τους.

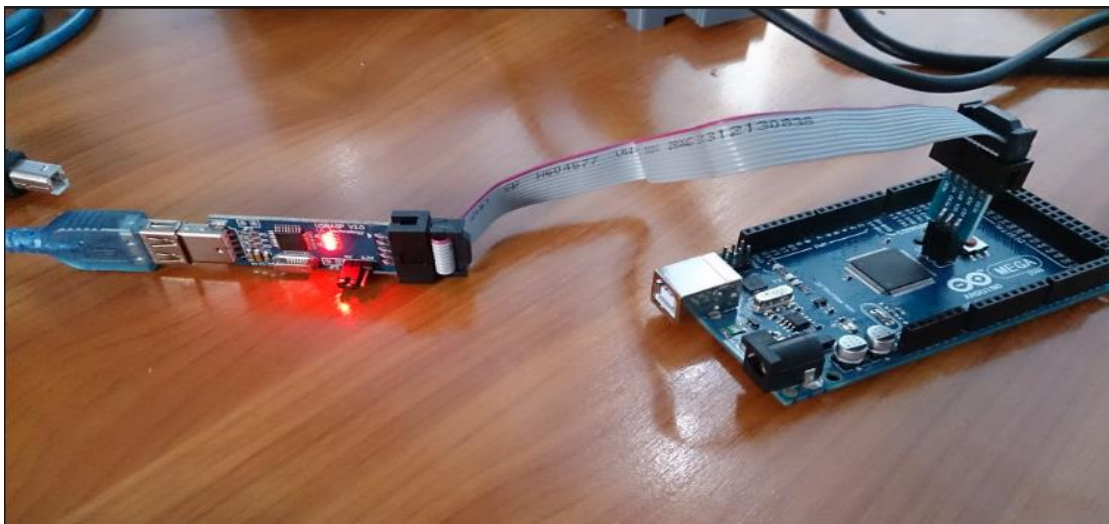
Ο πιο απλός τρόπος σύνδεσης και προγραμματισμού ενός μικροελεγκτή είναι σειριακά. Στην πλειοψηφία των απλών 8 bit AVR μικροελεγκτών αλλά και σε ορισμένους άλλους αυτό πραγματοποιείται με τη συνδεσμολογία **Serial Peripheral Interface (SPI)**.^[21] Η τεχνική αυτή βασίζεται στο γνωστό μοντέλο "αφέντης-σκλάβος (master-slave)" σύνδεσης ολοκληρωμένων κυκλωμάτων-υποσυστημάτων, όπου ένα κεντρικό σύστημα (αφέντης) μοιράζει κοινά ψηφιακά σήματα πληροφορίας στα υποσυστήματα (σκλάβοι), ενώ όλα τα υποσυστήματα είναι συγχρονισμένα μεταξύ τους με κοινό ρολόι.



Σχήμα 17: Δομικό διάγραμμα SPI σύνδεσης^[22]

Τα ψηφιακά σήματα πληροφορίας που πρέπει να φτάσουν στον μικροελεγκτή που πρόκειται να προγραμματιστεί καλούνται συνήθως SCK, MISO, MOSI. Ένας προσωπικός υπολογιστής επικοινωνεί με ένα κύκλωμα ή μια αναπτυξιακή πλακέτα μέσω καλωδίου USB. Ένα καλώδιο USB διαθέτει 4 πινάκια, ένα για την τροφοδοσία (5V), ένα για τη γείωση (GND), και άλλα δυο για τη δυαδική πληροφορία που μεταδίδει (D⁺, D⁻). Η πληροφορία αυτή για να μεταφερθεί στο μικροελεγκτή, θα πρέπει να μετασχηματιστεί στα σήματα τύπου SPI που αναφέρθηκαν παραπάνω. Επομένως, απαιτείται η ύπαρξη ενός διαμεσολαβητή, ο οποίος συνήθως είναι ένας μικροελεγκτής μικρότερος σε απόδοση από τον κύριο μικροελεγκτή. Ο προγραμματισμός του ώστε να δέχεται σήματα USB και να βγάζει την πληροφορία αυτή κωδικοποιημένη στα σήματα MISO, MOSI, SCK, είναι αρκετά δύσκολος για μη έμπειρους μηχανικούς ενσωματωμένων συστημάτων και αρκετά δαπανηρός από άποψη κυρίως χρόνου. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί ειδικά κυκλώματα-

διαμεσολαβητές, που τροφοδοτούνται μέσω USB και συνδέονται με το κύκλωμα μικροελεγκτή του προς υλοποίηση συστήματος. Τα κυκλώματα αυτά καλούνται προγραμματιστές (external programmers). Η επιλογή του σωστού programmerεπαφίεται στον προγραμματιστή-ηλεκτρονικό που προγραμματίζει και υλοποιεί το σύστημα, λαμβάνοντας υπόψη τις δυνατότητες που έχει και τη συμβατότητα με τον κύριο μικροελεγκτή. Υπάρχουν αρκετοί τύποι programmers και το κόστος τους κυμαίνεται ανάλογα με το εύρος εφαρμογής τους σε τύπους μικροελεγκτών και τις δυνατότητές τους. Ορισμένοι τύποι development boards μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως external programmers, αν προγραμματιστούν με κατάλληλο τρόπο. Επίσης οι περισσότερες αναπτυξιακές πλακέτες του εμπορίου διαθέτουν υποδοχές για τον προγραμματισμό τους από external programmer. Τέλος σε ό,τι αφορά στη συνδεσμολογία SPI, πρέπει να αναφερθεί ότι οι υψηλών δυνατοτήτων μικροελεγκτές (AVR 32bit, ARM, κλπ.) στην πλειοψηφία τους δεν διαθέτουν τη δυνατότητα σύνδεσης τύπου SPI, αλλά συνθετότερων παραλλαγών της, με περισσότερα σήματα πληροφορίας (JTAGICE). Αυτοί οι μικροελεγκτές απαιτούν και ακριβότερους external programmersγια να προγραμματιστούν, ενώ η διαδικασία που ακολουθεί ο προγραμματιστής για να επιτύχει την επικοινωνία του μικροελεγκτή με τον Η/Υ είναι γενικά πιο περίπλοκη και απαιτεί περισσότερη εμπειρία.



Εικόνα 17: Προγραμματισμός του μικροελεγκτή ARM ATSAM3X8E (32bit) της αναπτυξιακής πλακέτα Arduino due, με χρήση external programmer

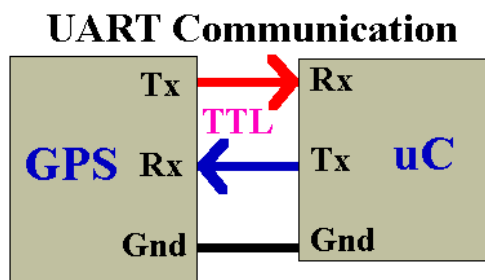
Πέραν της σειριακής σύνδεσης SPI, μια αρκετά συνηθισμένη διάταξη αποτελεί το πρωτόκολλο UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter). Το UART είναι ένα τσιπ προγραμματιζόμενο με τέτοιο τρόπο ώστε να ελέγχει τη διεπαφή του Η/Υ με τις επισυναπτόμενες σειριακές συσκευές. Ειδικότερα, παρέχει

στον Η/Υ τη διεπαφή (τύπου RS-232C, ή σε νεότερα συστήματα EIA232F) ούτως ώστε αυτός να μπορεί να επικοινωνήσει και να μεταδώσει/λάβει πληροφορίες από παράπλευρες συσκευές.

Βασικά χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου UART αποτελούν τα εξής:^[23]

- Μετατρέπει την πληροφορία (bytes) που λαμβάνει από τον Η/Υ σε σειριακή (serial bit stream) για εξερχόμενη μετάδοση.
- Σε εισερχόμενη μετάδοση, μετατρέπει τη σειριακή ροή των bits σε bytes που διαχειρίζεται ο Η/Υ.
- Εισάγει ένα bit ισοτιμίας (εάν επιλεγεί) προς εξερχόμενες μεταδόσεις, ελέγχει την ισοτιμία των εισερχόμενων bytes (εάν επιλεγεί) και διαγράφει το bit ισοτιμίας (parity bit)
- Εισάγει οριοδείκτες εκκίνησης και τερματισμού στην εξερχόμενη πληροφορία ενώ τους αφαιρεί από εισερχόμενη μετάδοση.
- Χειρίζεται τις διακοπές που προέρχονται από τη χρήση του πληκτρολογίου και του ποντικιού του Η/Υ (συσκευές με serial ports).

Από άποψης καθαρά συνδεσμολογίας στις αναπτυξιακές πλακέτες που υποστηρίζουν UART, χρησιμοποιείται ένα ενδιάμεσο ολοκληρωμένο (τύπου 232) του οποίου το πινάκιο Tx (Transmitter) συνδέεται με το αντίστοιχο Rx (Receiver) του μικροελεγκτή, ενώ το Rx του 232 με το Tx του μικροελεγκτή.^[24]



Σχήμα 18: Δομικό διάγραμμα SPI σύνδεσης

Ορισμένοι μικροελεγκτές διαθέτουν από μόνοι τους διεπαφή επικοινωνίας κατευθείαν με **USB** (USB interface), χωρίς τη χρήση external programmer. Η διεπαφή αυτή τροφοδοτείται εντελώς ξεχωριστά από το υπόλοιπο ολοκληρωμένο του μικροελεγκτή με τάση 5Volt, που είναι η τάση που λαμβάνεται εξάλλου μέσω του ίδιου του καλωδίου USB. Η διεπαφή διαθέτει επίσης πέραν της τροφοδοσίας και της

γείωσης, τα δυο πινάκια μεταφοράς πληροφορίας μέσω USB (D+, D-). Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η απευθείας σύνδεση του μικροελεγκτή με τον Η/Υ χρησιμοποιώντας ελάχιστο hardware. Κατά συνέπεια, η συνολική διάταξη είναι λιγότερο περίπλοκη από άποψης υλικού και σαφώς φθηνότερη, εφόσον δεν απαιτείται η απόκτηση του κατάλληλου external programmer. Όταν ο μικροελεγκτής τροφοδοτηθεί μέσω του USB θα ανιχνευτεί από τον Η/Υ. Ωστόσο για να είναι δυνατός ο προγραμματισμός του απαιτούνται κατάλληλες ρυθμίσεις λογισμικού οι οποίες διαφέρουν από μικροελεγκτή σε μικροελεγκτή. Οι ρυθμίσεις αυτές εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό και από το λειτουργικό σύστημα που διαθέτει ο εκάστοτε Η/Υ καθώς επίσης και από τα εργαλεία λογισμικού που χρησιμοποιούνται (συντάκτες, μεταγλωττιστές, drivers). Επίσης, πέρα από αυτά σχεδόν πάντα απαιτείται η εγκατάσταση ενός ηλεκτρονικού programmer (DFU programmer- Device Firmware Update), για να είναι σε θέση ο μικροελεγκτής να δεχτεί εντολές από τη γραμμή εντολών του Η/Υ. Αυτό απαιτεί από την πλευρά του προγραμματιστή ειδική γνώση και εμπειρία ώστε να χειρίζεται με άνεση απαραίτητα εργαλεία για το σκοπό αυτό (atmel Flip) καθώς και να γράφει σε γραμμή εντολών cmd κατάλληλες εντολές.

8.3.4. Το κύκλωμα μικροελεγκτή της διάταξης EIT

Πρώτο βήμα προφανώς για την επιλογή του κατάλληλου ολοκληρωμένου κυκλώματος μικροελεγκτή είναι ο καθορισμός των τεχνικών κριτηρίων που πρέπει να διαθέτει η παρούσα διάταξη. Σημαντικό καταρχάς είναι η άμεση επικοινωνία του υπολογιστή με το σύστημα και φυσικά μια ικανοποιητική ταχύτητα αποστολής και λήψης δεδομένων. Άλλο ένα κριτήριο αποτελεί η σημαντική κατανάλωση ισχύος ώστε η συνολική τροφοδοσία να είναι επαρκής αλλά και το σύστημα να πληροί τις προδιαγραφές χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Χρησιμοποιούμε για την παρούσα πειραματική διαδικασία και αποκλειστικά για τον προγραμματισμό των πολυπλεκτών τον μικροελεγκτή AVR Atmega 328PU. Ο συγκεκριμένος μικροελεγκτής είναι ένας 8bit AVR της Atmel, από τους πλέον διαδεδομένους σε χρήση. Στη φήμη του έχει συμβάλλει σημαντικά η χρήση του σε αναπτυξιακές πλακέτες arduino uno, micro, nano καθώς και σε δεκάδες άλλα γνωστά ή λιγότερο γνωστά στους ηλεκτρονικούς boards.

8.3.5. Χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή Atmega 328-PU ^[25]

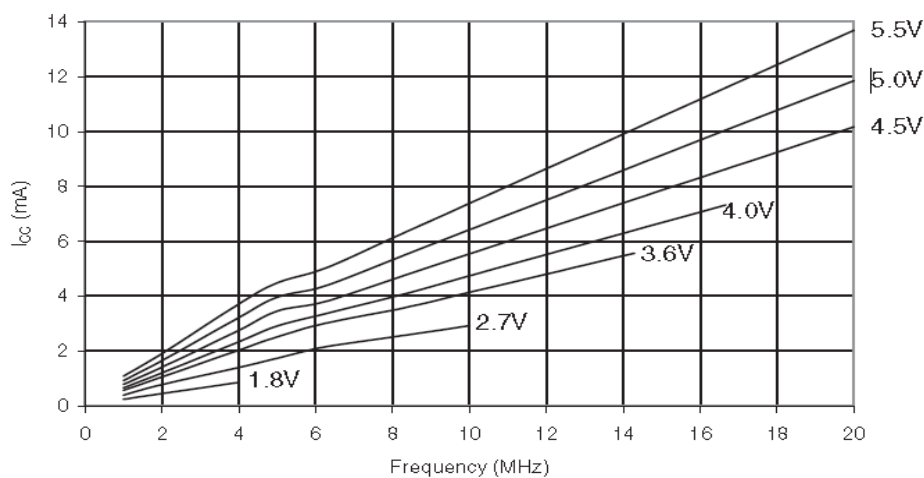
Ο Atmega 328-PU τροφοδοτείται με τάσεις από 3-5V. Συνιστώμενη τροφοδοσία είναι τα 5V, ωστόσο σε ορισμένες εφαρμογές όταν υπάρχει δυνατότητα, και για λόγους χαμηλότερης κατανάλωσης, προτιμάται τροφοδοσία 3.3V. Σε περίπτωση τροφοδοσίας 5V, το power supply ενός USB καλωδίου είναι αρκετό, ενώ για χαμηλότερη τροφοδοσίας απαιτείται η παρεμβολή ενός κατάλληλου voltage regulator.

Πέρα από το ζήτημα της τροφοδοσίας, ο atmega 328-PU διαθέτει 23 ψηφιακές εισόδους ή εξόδους (I/O pins), οι οποίες είναι υπέρ αρκετές για την εφαρμογή της παρούσας εργασίας. Τα pins αυτά κατανέμονται σε 3 ports, B (PB0-PB7), C (PC0-PC6) και D (PD0-PD7). 6 από αυτά τα pins μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως PWM έξοδοι, ενώ άλλα 6 ως αναλογικές εισοδοί/έξοδοι (ADC0-5, στο PORTC). Ωστόσο, αρκετές από αυτές τις ψηφιακές I/O, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν τόσο για την επικοινωνία του μικροελεγκτή με τον προσωπικό υπολογιστή μέσω USB, ούτως ώστε ο atmegana προγραμματιστεί, όσο και για το ρολόι του μικροελεγκτή που συνήθως είναι ένας κρύσταλλος κατάλληλης συχνότητας. Καθένα από αυτά τα ψηφιακά pins πρέπει να διαρρέεται από ρεύμα 20mA, ενώ σε περίπτωση υπέρβασης των 40mA προκαλείται η καταστροφή τους και φυσικά μόνιμη ζημιά στον ίδιο το μικροελεγκτή.

Σε προδιαγραφές μνήμης, ο atmega 328-PU διαθέτει μνήμη flash 32KB, ένα ποσοστό της οποίας (0.5KB) είναι δεσμευμένο από τον bootloader, ώστε να είναι δυνατό να προγραμματιστεί εύκολα. Η SRAM είναι 2KB, ενώ η EEPROM 1KB. Η EEPROM μπορεί να διαβαστεί και να γραφεί μέσω της κατάλληλης βιβλιοθήκης EEPROM (βλ. Χαρακτηριστικά και τύποι μικροελεγκτών). ^[25]

Φυσικά ο atmega 328-PU έχει τη δυνατότητα σύνδεσης SPI(4 SPI), χρησιμοποιώντας τα pins 17 (PB3-MOSI), 18 (PB4-MISO) και 19 (PB5-SCK). Εκτός από τη δυνατότητα σύνδεσης μέσω του πρωτοκόλλου SPI, διαθέτει και UART (pins PD0-RXD και PD1-TXD). (βλ. Κυκλώματα μικροελεγκτών και επικοινωνία). Για την παρούσα εργασία, επιλέξαμε επικοινωνία με SPI, με χρήση κατάλληλου κυκλώματος προγραμματιστή, δεσμεύοντας για ακριβώς αυτό το σκοπό τα pins 17,18,19. Ο μικροελεγκτής αυτός διαθέτει εσωτερικό ρολόι (ρυθμιζόμενο από κρύσταλλο 8MHz) που παράγει παλμούς ώστε να χρονίζεται στο 1MHz, παρόλα αυτά με σύνδεση και κατάλληλο προγραμματισμό εξωτερικού κρυστάλλου ο χρονισμός του at328 μπορεί

να φτάσει σε συχνότητα μέχρι 20MHz. Υπάρχουν φυσικά και άλλοι εσωτερικοί κρύσταλλοι (128kHz και 32kHz) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν με προγραμματισμό των ειδικών καταχωρητών εάν σκοπός είναι η σημαντικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας με αντίβαρο ένα πιο αργό σύστημα. Πιο υψηλές συχνότητες ρολογιού απαιτούν υψηλότερο και στενότερο εύρος τροφοδοσίας (πιο κοντά στα 5Volts) με αντίκτυπο την υψηλότερη ισχύ. Παρακάτω παρατίθεται ένα διάγραμμα του απορροφούμενου από το μικροελεγκτή ρεύματος συναρτήσει της συχνότητας του εξωτερικού κρυστάλλου για διάφορες τιμές της τάσης τροφοδοσίας. Στην περίπτωση μας απαιτούνται περίπου 10mA που θα πρέπει να παρέχονται από την τροφοδοσία.



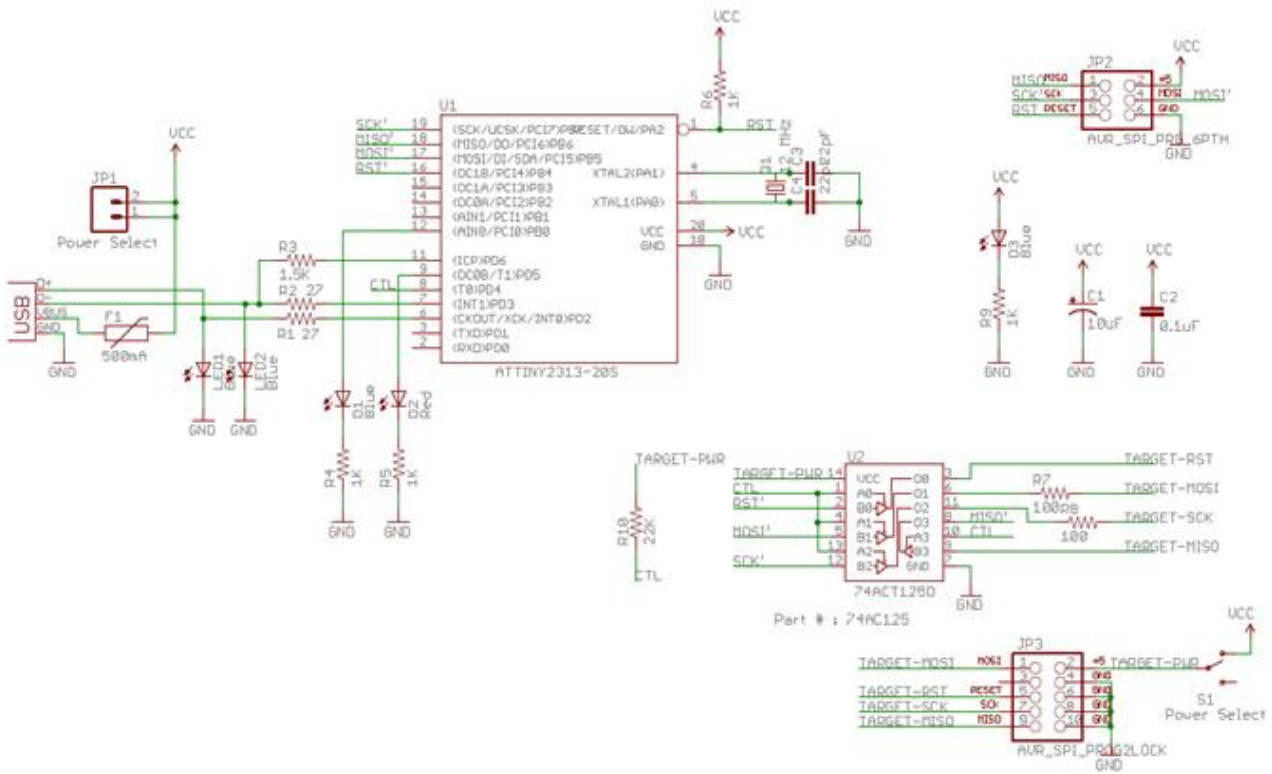
Διάγραμμα 3: Ρεύμα τροφοδοσίας μικροελεγκτή ATMEGA 328 συναρτήσει τάσης τροφοδοσίας και συχνότητας ρολογιού ^[25]

8.3.6. Περιφερειακά στοιχεία σύνδεσης με το μικροελεγκτή

Είναι προφανές ότι ένας μικροελεγκτής για να προγραμματιστεί και να λειτουργεί σωστά απαιτεί ένα σύνολο ηλεκτρονικών εξαρτημάτων που να συνδέονται κατάλληλα με αυτόν. Το σύνολο αυτό μαζί με το μικροελεγκτή απαρτίζουν την αναπτυξιακή πλακέτα που χρησιμοποιείται. Στη συγκεκριμένη διάταξη επιχειρούμε μια αρκετά απλουστευμένη προσέγγιση σε αυτό το ζήτημα έτσι ώστε το κύκλωμα που θα προκύψει να είναι όσο το δυνατό λιγότερο περίπλοκο.

Το πρώτο και βασικότερο ζήτημα που προκύπτει είναι η επικοινωνία του μικροελεγκτή με τον υπολογιστή. Εφόσον επιλέχθηκε σύνδεση τύπου SPI, χρησιμοποιούμε τα MISO, MOSI και SCK pins του atmega 328. Χρειάζεται επίσης το RESET pin και φυσικά η τροφοδοσία του (VCC, την καθορίσαμε στα 5 Volts,

απευθείας από το USB). Τα παραπάνω σήματα μαζί με την αναφορά τους, δηλαδή τη γείωση, οδηγούνται σε ένα header brin (iscp header), ώστε να υποδεχτεί τον κατάλληλο programmer για να δημιουργηθεί ο διάυλος επικοινωνίας με το PC. Για programmer χρησιμοποιήθηκε ο rocket AVR programmer, το σχηματικό διάγραμμα του οποίου παρατίθεται στην παρακάτω εικόνα: Η βασική δομή του περιστρέφεται γύρω από τη χρήση ενός μικροελεγκτή ATTINY2313, για τη μετατροπή των σημάτων D+ και D- του USB σε σήματα δεδομένων τύπου SPI (MISO, MOSI, SCK), τα οποία θα εισέρχονται στον μικροελεγκτή ATMEGA 328-PU της διάταξής μας. Άλλο ένα βασικό του χαρακτηριστικό είναι ότι διαθέτει τη χειροκίνητη (μέσω διακόπτη) δυνατότητα επιλογής τροφοδοσίας μέσω του PC (USB Power Supply) είτε ανεξάρτητης τροφοδοσίας από άλλο κύκλωμα ή τροφοδοτικό. Ο programmer αυτός μπορεί να προγραμματίσει τους περισσότερους AVR 8bit μικροελεγκτές, όχι όμως 32bit ή ARM, οι οποίοι απαιτούν ακριβότερους και πιο περίπλοκους στο χειρισμό προγραμματιστές. Τέλος, για να ανοίξει ο διάυλος επικοινωνίας του avr rocket programmer με το pc και τον atmega 328pu, απαιτείται πέρα από την εγκατάσταση των απαραίτητων drivers (εάν το λειτουργικό σύστημα του Η/Υ είναι windows), και η χρήση κατάλληλου λογισμικού για τον ορισμό της διεπαφής (interface) μέσω εντολών γραμμής και φυσικά για την συγγραφή κώδικα και για τον προγραμματισμό του. [26]



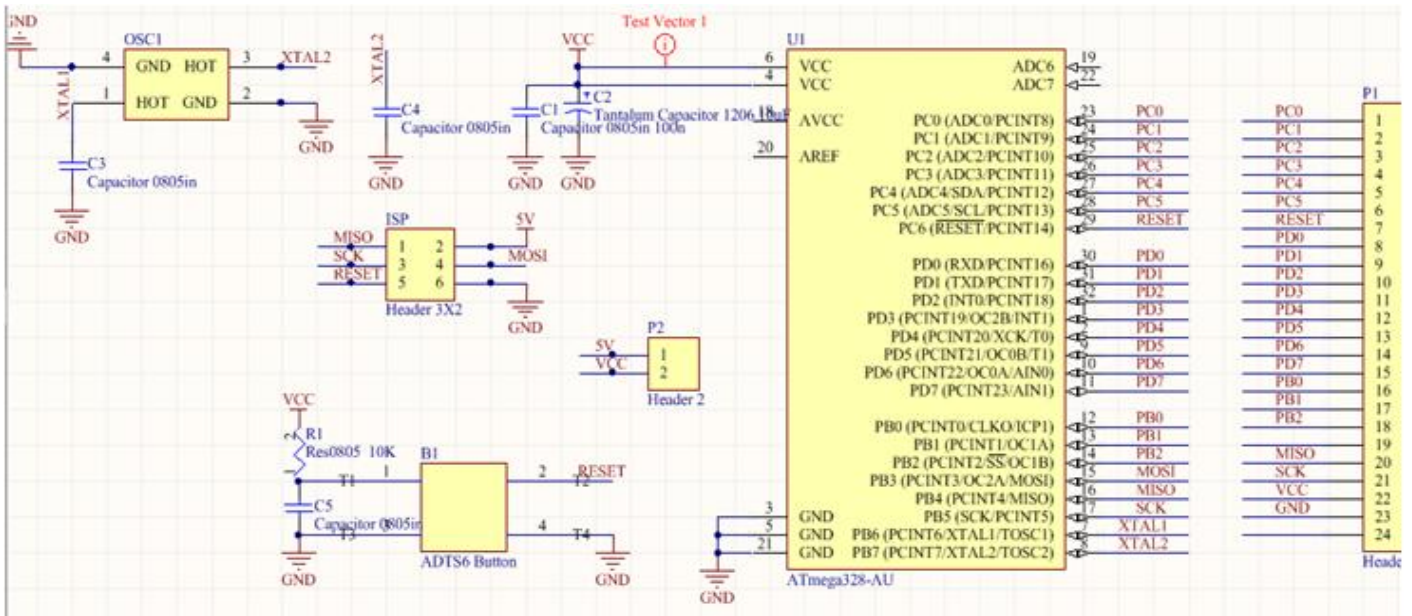
Σχήμα 19: Κυκλωματικό διάγραμμα προγραμματιστή rocket AVR.

Δεύτερο σημαντικό βήμα είναι ο χρονισμός του ολοκληρωμένου κυκλώματος atmega 328pu, με έναν εξωτερικό κρύσταλλο (external crystal) ούτως ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή συχνότητα ρολογιού για ταχύτερη εναλλαγή ψηφιακών σημάτων και κατά συνέπεια μετρήσεων. Επιλέγεται ένας κρύσταλλος συχνότητας 16MHz, και συγκεκριμένα ο Kyocera CX3225SB. [27] Αυτός ο κρύσταλλος διαθέτει 4 pads, 2 διαγώνια μεταξύ τους HOT που συνδέονται στα XTAL1 και XTAL2 πινάκια του μικροελεγκτή ώστε να τον χρονίζουν, και τα άλλα 2 διαγώνια μεταξύ τους που συνδέονται στη γείωση. Ανάμεσα σε κάθε σήμα XTAL και τη γείωση συνδέεται και ένας κεραμικός multilayer πυκνωτής 12pF, για να πραγματοποιείται το η σωστή απόξευξη στους παλμούς του ρολογιού. Για να λειτουργήσει ωστόσο σωστά ο κρύσταλλος αυτός και να αλληλεπιδράσει με τον μικροελεγκτή θα πρέπει να ρυθμιστεί κατάλληλα ο ίδιος ο μικροελεγκτής ώστε να μην χρησιμοποιεί το default ρολόι των 8MHz αλλά τον εξωτερικό κρύσταλλο που τοποθετούμε στη διάταξη. Αυτή η ρύθμιση πραγματοποιείται με μια διαδικασία που ονομάζεται fuse burning, όπου ρυθμίζονται κάποιοι καταχωρητές του μικροελεγκτή με τα κατάλληλα bits, μέσω του λογισμικού avrdude. Τα bit καταχωρητή CKSEL πρέπει να τεθούν στην τιμή 0000. [25]

Πέρα από αυτά απαιτείται η τοποθέτηση ενός ειδικού reset button στο κύκλωμα για να μπορεί να πραγματοποιείται επανεκκίνηση της λειτουργίας του μικροελεγκτή χειροκίνητα ανά πάσα στιγμή. Συγκεκριμένα, ο μικροελεγκτής διαθέτει ένα reset pin (RESET'), το οποίο είναι active low: όταν το resetσήμα συνδέεται στην τροφοδοσία, το συμπλήρωμά του είναι γειωμένο και ο μικροελεγκτής συνεχίζει να εκτελεί κανονικά τη διεργασία για την οποία έχει προγραμματιστεί. Όταν το κουμπί πατηθεί, τότε στιγμιαία το resetγειώνεται, και το συμπλήρωμά του αντιστοιχεί στο ψηφιακό 1 που σημαίνει ότι η λειτουργία του atmega 328pu επανεκκινείται. Να σημειωθεί επίσης ότι μεταξύ του reset και της τροφοδοσίας έχει τοποθετηθεί μια αντίσταση 10kΩ ούτως ώστε όταν πατιέται το κουμπί και το resetγειώνεται, να μην βραχυκυκλώνονται η τροφοδοσία των 5Volt με τη γείωση. Επίσης τοποθετείται μεταξύ του resetκαι της γείωσης ένας κεραμικός πυκνωτής 100nF για decoupling.

Ένα ακόμα σημαντικό ζήτημα είναι το decouplingτης ίδιας της τροφοδοσίας του κυκλώματος αυτού, που επιτυγχάνεται με την παράλληλη σύνδεση μεταξύ αυτής και της γείωσης ενός πυκνωτή 100nF κεραμικού και ενός πυκνωτή τανταλίου (με πολικότητα θετική προς το υψηλότερο δυναμικό δηλαδή το VCC) 10μF.

Τέλος κάθε ψηφιακή είσοδος/έξοδος που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να συνδέεται με το υπόλοιπο σύστημα, όπως επίσης και η γείωση (διότι πρέπει να υπάρχει κοινή τάση αναφοράς), ενώ η τροφοδοσία συνδέεται μόνο εάν επιθυμούμε κοινό σύστημα τροφοδοσίας της πλακέτας μικροελεγκτή και του υπόλοιπου συστήματος. Για το λόγο αυτό τοποθετείται με κατάλληλη γεωμετρική διάταξη ένας αρσενικός κοννέκτορας (header) 24 επαφών.

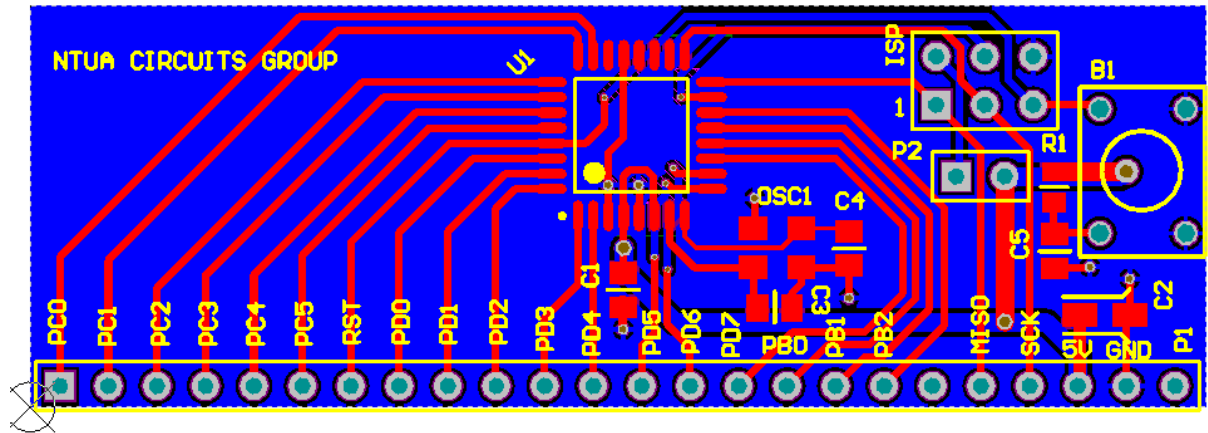


Σχήμα 20: Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος μικροελεγκτή

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η ταχύτητα ρολογιού των 16MHz είναι αρκετά μικρή για τις συνολικές απαιτήσεις του συστήματος. Ειδικότερα, αν συνοπολογιστούν οι ταχύτητες ανοιγοκλεισίματος των διακοπών των πολυπλεκτών και οι αντίστοιχες χρονικές καθυστερήσεις στους πολυπλέκτες και τον καταχωρητή, ^{[10],[11],[12]} καθώς και ένα μικρό χρονικό περιθώριο που απαιτείται για τη σταθεροποίηση της μετρούμενης τάσης, αντιστοιχεί συχνότητα εναλλαγής διακοπών περίπου 10 φορές μικρότερη της συχνότητας του ρολογιού του μικροελεγκτή, δηλαδή 1,6MHz, που σημαίνει ότι εφόσον λαμβάνονται συνολικά 4096 μετρήσεις θα απαιτηθούν 2,56ms μόνο για το ανοιγοκλείσιμο των διακοπών. Ωστόσο αν χρησιμοποιηθεί ο analog to digital converter του atmega 328pu, ο χρόνος λήψης και μετατροπής των μετρήσεων αυτών σε ψηφιακά δεδομένα, καθώς και αποστολής τους στο PC για περαιτέρω επεξεργασία καθίσταται απαγορευτικός για τις απαιτήσεις της εφαρμογής (όπου επιθυμούμαι απεικόνιση δεδομένων πραγματικού χρόνου). Επομένως ο μικροελεγκτής αυτός να μεν προγραμματίζεται με ικανοποιητική ταχύτητα τα ολοκληρωμένα του συστήματος, ωστόσο, θα πρέπει αν ευρεθεί μια άλλη μέθοδος για τη λήψη των μετρήσεων αυτών και την σωστή ταξινόμησή τους και αποστολή τους σε κατάλληλο χρόνο.

Με βάση το παραπάνω σχηματικό διάγραμμα σχεδιάστηκε το PCB layout της πλακέτας αυτής σε διαστάσεις 61.6x20.96mm. Η πλακέτα αυτή διαθέτει 2 επίπεδα σημάτων, ενώ όλα της τα στοιχεία βρίσκονται κολλημένα μόνο στη μπροστινή της όψη. Η πίσω όψη της που φιλοξενεί το bottom signal layer, χρησιμοποιήθηκε ως

επίπεδο γείωσης ώστε να διευκολύνει την αποτροπή παρασιτικών χωρητικών και επαγωγικών φαινομένων κατά μήκος των σημάτων .



Σχήμα 21: 2D σχέδιο του PCB layout της πλακέτας μικροελεγκτή



Εικόνα 18: 2D σχέδιο του PCB layout της πλακέτας μικροελεγκτή

8.4. Τροφοδοσία (Power Supply)

Όπως είναι προφανές, κάθε ολοκληρωμένο κύκλωμα πρέπει να τροφοδοτείται με κατάλληλα επίπεδα τάσεων, τα οποία είναι πολύ συγκεκριμένα, ανάλογα με τις προδιαγραφές του εκάστοτε ολοκληρωμένου, και φυσικά καθορίζουν και το εύρος λειτουργίας τους σε επίπεδα πλάτους αναλογικών ή ψηφιακών σημάτων. Ένας προφανής τρόπος τροφοδοσίας είναι φυσικά η σύνδεση κάθε αγωγού dc τάσης τροφοδοσίας με κάποιο κανάλι τροφοδοτικού το οποίο θα ρυθμίζεται ώστε να δίνει την απαιτούμενη τάση. Η ιδέα αυτή ωστόσο είναι ικανοποιητική μόνο για τις πρώτες δοκιμές του εκάστοτε κυκλώματος και δεν αποτελεί μόνιμη λύση. Πρώτα από όλα η χρήση ενός ή και περισσότερων εργαστηριακών οργάνων τροφοδοσίας κάθε φορά που χρησιμοποιείται μια διάταξη για πειραματικές μετρήσεις, και πολύ περισσότερο ως συσκευή σε επιστημονικές ή βιομηχανικές εφαρμογές, κάθε άλλο παρά

οικονομικά και υλικά αποδοτική θα ήταν. Επομένως κατά την κατασκευή κάθε κυκλωματικής διάταξης, ένα πολύ σημαντικό κομμάτι αποτελεί η σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός υποσυστήματος που θα διαδραματίζει αποκλειστικά το ρόλο της τροφοδοσίας. Ουσιαστικά αυτό θα πρέπει να λαμβάνει εξωτερική τάση είτε από το ίδιο το δίκτυο, είτε από κάποιο άλλο βύσμα είτε από κάποια μπαταρία (το τελευταίο συμβάλλει στη φορητότητα του συστήματος), και ως έξοδο να δίνει τις επιθυμητές τιμές τροφοδοσίας για όλα τα ολοκληρωμένα κυκλώματα της συνολικής διάταξης.

Σημαντικό επίσης εδώ είναι η ακρίβεια των τιμών της τροφοδοσίας που δίνονται στις εξόδους, όπου κάθε παρασιτικό φαινόμενο (με πιο χαρακτηριστικό το ripple) να ελαχιστοποιείται, κάτι το οποίο φυσικά καθίσταται σχετικά απλό εφόσον μελετάμε dc τάσεις. Ακόμα, οι τάσεις εξόδου επιβάλλεται να είναι σταθερές και ανεξάρτητες οιαδήποτε φορτίου, κάτι το οποίο απαιτεί τη χρήση εξειδικευμένων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων-μετατροπέων dc to dc και linear voltage regulators. Τέλος, ένα σημαντικό ζήτημα που προκύπτει είναι το ρεύμα τροφοδοσίας να επαρκεί να τροφοδοτήσει όλα τα ολοκληρωμένα της διάταξης.

Στη διάταξή μας ενδιαφερόμαστε για την σταθερή τροφοδοσία του μικροελεγκτή atmega328pu (5Volts), των πολυπλεκτών adg1406 και adg1404, με +/-15Volts και των καταχωρητών SN74LV574 με 5Volts. Όλα αυτά τα ολοκληρωμένα φυσικά θα έχουν ως κοινή αναφορά τη γείωση. Επιλέγουμε σε ότι αφορά στην πηγή του κυκλώματος τροφοδοσία στα πλαίσια της παρούσας εργασίας να προέρχεται από την τροφοδοσία USB καλωδίου (5 Volts). Αυτά τα 5Volt θα πρέπει με κάποιο τρόπο να μετασχηματίζονται σε +/-15Volts. Προηγουμένως αναφέραμε ότι χρησιμοποιούνται 16 ad1406 και 4 adg1404 πολυπλέκτες που τροφοδοτούνται με αυτή την τάση. Τυπικά, όταν όλες οι ψηφιακές τους εισοδοί τίθενται ταυτόχρονα στα 5Volts, στους 25 βαθμούς το ρεύμα τροφοδοσίας των adg1404 είναι 170μΑ, ενώ των adg1406 280μΑ. Συνολικά λοιπόν θα απορροφούν $4 \cdot 170 + 16 \cdot 280 = 5160 \mu\text{A}$.^{[10],[11],[12]} Σε θερμοκρασιακό εύρος -40 ως 125 βαθμών κελσίου, τα ρεύματα αυτά είναι 285μΑ και 475μΑ αντίστοιχα (μέγιστες τιμές), που σημαίνει στη δυσχερέστερη περίπτωση το μέγιστο απορροφούμενο ρεύμα του συστήματος των πολυπλεκτών θα είναι $4 \cdot 285 + 16 \cdot 475 = 8740 \mu\text{A}$. Επομένως θα πρέπει να εξασφαλιστεί ότι το συνολικό ρεύμα παροχής σε αυτά τα δυο δυναμικά εξόδου της πλακέτας τροφοδοσίας θα υπερβαίνει σημαντικά τις ενεργειακές αυτές απαιτήσεις.

Για σταθερές τροφοδοσίες ± 15 Volts ιδανικοί είναι οι linear voltage regulators (LDO), LM2940 και LM2990S, αντίστοιχα. Ωστόσο, οι LDO αυτοί πρέπει να λαμβάνουν ως είσοδο τάσεις εύρους, του οποίου τα 5Volt βρίσκονται εκτός. Συγκεκριμένα, ο LM2940 ^[28] έχει input range 6-26Volts, ενώ ο LM2990S ^[29], input range -26 ως -6Volts. Απαιτείται επομένως προηγούμενα, ένας DC to DC converter που λαμβάνει ως τάση εισόδου τα 5Volt και βγάζει τόσο μια θετική όσο και μια αρνητική τάση που βρίσκονται στα αντίστοιχα εύρη τάσεων εισόδου των LM2940 και LM2990S.

Μια επιλογή αποτελεί ο R1D0524 της Recom. ^[30] Η έξοδος του είναι στα ± 24 Volt με ρεύμα ± 21 mA, ικανό να τροφοδοτήσει τους πολυπλέκτες των οποίων οι απαιτήσεις δεν είναι δυνατό να υπερβούν τα 8,74 mA, όπως αποδείχθηκε παραπάνω. Το ripple του τυπικά βρίσκεται στα 50m Vp-p ενώ η μέγιστη τιμή του δεν υπερβαίνει τα 100m Vp-p. Αυτός ο DC to DC converter απαιτεί ορισμένα περιφερειακά εξαρτήματα για τη βέλτιστη λειτουργία του, τα οποία αναφέρονται στο φύλλο προδιαγραφών του. Έτσι, χρησιμοποιήθηκε στην είσοδό του ένα πηνίο 4.7uH, το οποίο απουσία θορύβου είναι βραχυκύκλωμα, ένας πυκνωτής κεραμικός 2.2uF μεταξύ της τάσης εισόδου και της γης πριν το πηνίο για την απόζευξη και ένας πυκνωτής 470pF through hole και αντοχής 6kV (υψηλής ισχύος) μεταξύ εισόδου και του common signal (γης) μετά το πηνίο για την απόζευξη. Η τροφοδοσία του converter είναι δυνατό να παράγεται από ένα USB καλώδιο, καθώς προσφέρει την απαιτούμενη είσοδο των 5Volts. Εδώ επιλέχθηκε κοινέκτορας τύπου USBB. Το USB μπορεί να δώσει ρεύμα μέχρι και 0.5A, το οποίο είναι αρκετό για την παρούσα εφαρμογή. Τοποθετείται κατάλληλη ασφάλεια (fuse) που δεν επιτρέπει την εμφάνιση μεγαλύτερων ρευμάτων, καθώς σε περίπτωση που το ρεύμα υπερβεί αυτή την τιμή η ασφάλεια ανοίγει και λειτουργεί ως ανοιχτοκύκλωμα.

Εδώ σχετικά με το γενικό ζήτημα της τροφοδοσίας, πρέπει να αναφερθεί ότι δεδομένου ότι ο μικροελεγκτής προγραμματίζεται μέσω ενός rocket programmer, το οποίο επίσης τροφοδοτείται μέσω USB, η τροφοδοσία του όλου συστήματος επιτυγχάνεται είτε μέσω του ενός USB κοινέκτορα είτε μέσω του προγραμματιστή. Αν γίνεται ταυτόχρονη τροφοδοσία τότε μπορεί να προκληθεί σημαντική ζημιά σε όλη τη διάταξη. Γι αυτό το λόγο στο κύκλωμα του μικροελεγκτή υπάρχει ειδικός header-επιλογέας 2 pads για το αν θα περνάει η τροφοδοσία 5 Volt του programmer στο κύκλωμα (με την τοποθέτηση jumper) ή όχι (χωρίς τοποθέτηση

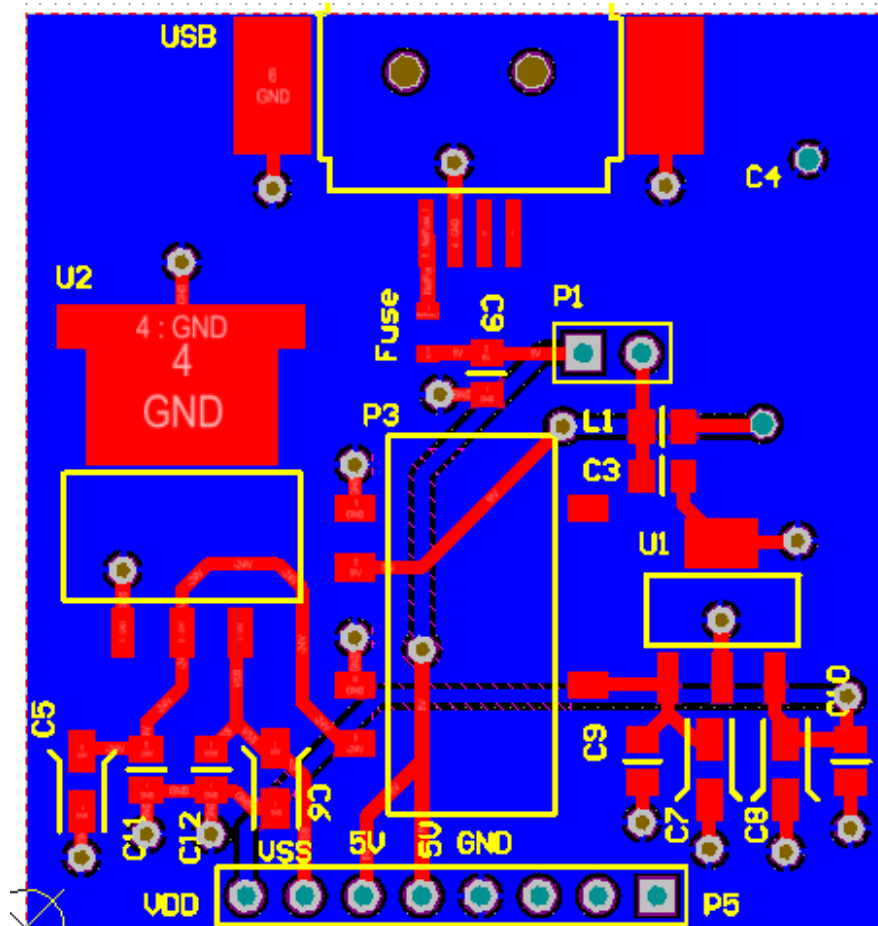
jumper). Αντίστοιχος επιλογέας υπάρχει φυσικά και στο AVR rocket programmer. Η ύπαρξη των χειροκίνητων αυτών διακοπών επιτρέπει τον προγραμματισμό του συστήματος ακόμη και αν αυτό τροφοδοτείται μέσω του USB στο κύκλωμα τροφοδοσίας, ενώ σε περίπτωση που το σύστημα έχει προγραμματιστεί και καλείται προς χρήση και εφαρμογή, η ύπαρξη USB κοννέκτορα στο κύκλωμα τροφοδοσίας οδηγεί στην απουσία ανάγκης μόνιμης χρήσης AVR rocket programmer για την τροφοδοσία.

Οι εξόδοι των +/-24 Volts πρέπει να περάσουν μέσα από αντίστοιχους LDO voltage regulators για να λάβουν τις επιθυμητές για την τροφοδοσία των πολυπλεκτών τιμές των +/-15Volts. Στην παρούσα περίπτωση, η χρήση των LM2940 και LM2990S για τα + και -15 Volts αντίστοιχα είναι αρκετά καλή επιλογή. Πέρα από τον ελάχιστο θόρυβο στην τάση εξόδου τους (75dB ripple rejection σε dc λειτουργία), το ρεύμα εξόδου είναι προσαρμοσμένο ανάλογα με το ρεύμα εισόδου, και μπορεί να φτάσει και το 1A. Το ρεύμα εξόδου του προηγούμενου dc to dc converter αναφέρθηκε στα 21mA, ανά κανάλι. Αυτό το ρεύμα εισέρχεται στις εισόδους των 2 παραπάνω LDO. Ένα μέρος αυτού του ρεύματος ωστόσο επιστρέφει στη γη (ρεύμα ηρεμίας-quiescent current) ενώ το υπόλοιπο εξέρχεται από την έξοδο. Για τους πολυπλέκτες το μέγιστο (θεωρητικά, καθώς πρακτικά αναμένουμε αρκετά λιγότερο) ρεύμα τροφοδοσίας είναι στα 8,74mA. Ο LM2940CX που θα χρησιμοποιήσουμε στη διάταξη για είσοδο 21mA έχει ρεύμα ηρεμίας περίπου 10-12mA, με έξοδο επομένως στα 9-11mA, ρεύμα οριακό αλλά επαρκές σε όλες τις περιπτώσεις λειτουργίας των πολυπλεκτών. Ο LM2990S έχει ρεύμα ηρεμίας 1mA μόλις οπότε επαρκεί για την αρνητική τροφοδοσία των πολυπλεκτών.

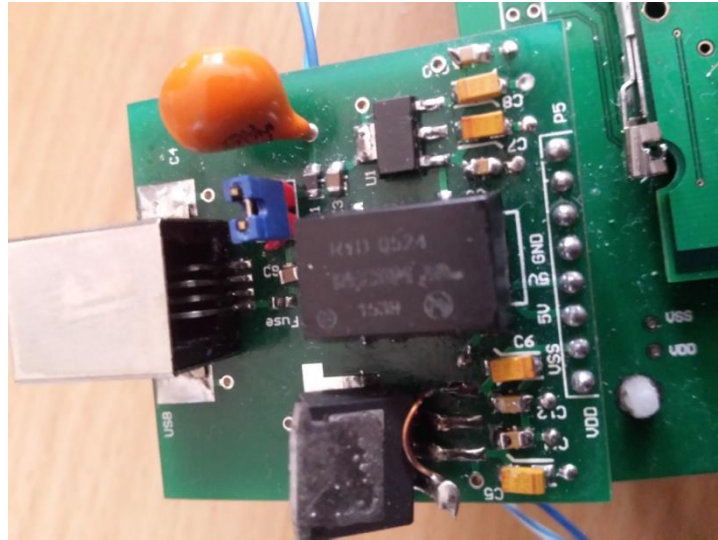
Καθένα από αυτά τα 2 LDO chip απαιτεί isolation και decoupling για τη σταθεροποίηση της λειτουργίας του. Για το λόγο αυτό, τόσο μεταξύ της τάσης εισόδου και της γείωσης όσο και της τάσης εξόδου και της γείωσης τοποθετούνται εν παραλλήλω 2 πυκνωτές. Ο ένας είναι κεραμικός 100nF και ο άλλος τανταλίου 1uF. Ο πολικός πυκνωτής (τανταλίου) είναι απαραίτητο να τοποθετηθεί με τη σωστή φορά, δηλαδή με το + (στη μεριά του εξαρτήματος που υπάρχει μια σκούρα γραμμή) προς τα ανώτερα δυναμικά. Στην περίπτωση του 2940 δηλαδή προς τα θετικά δυναμικά, ενώ στην περίπτωση του 2990S προς τη γη.

Τέλος, στο κύκλωμα προσαρτάται κατάλληλος header ώστε να εφαρμόζει στη μητρική πλακέτα και οι τάσεις αυτές να περνούν στο υπόλοιπο σύστημα. Οι εισοδοί

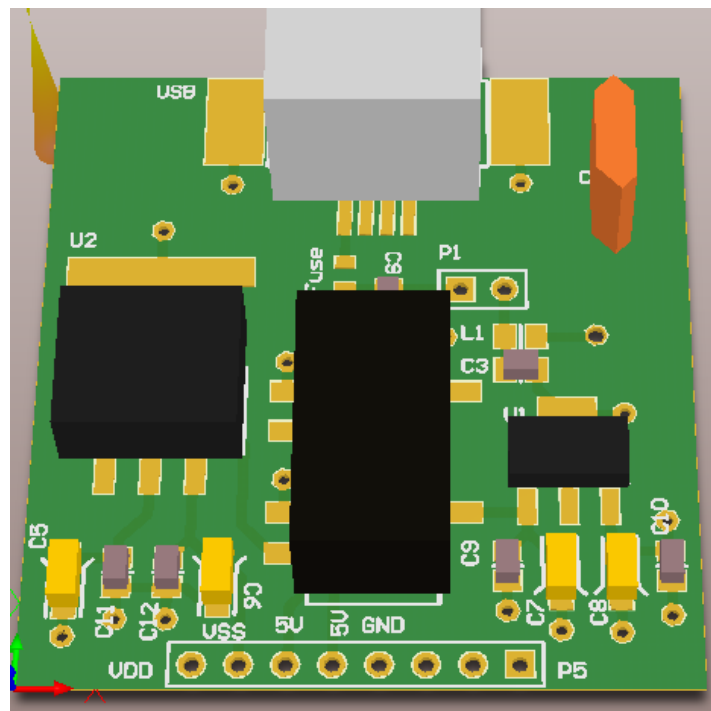
είναι 5V, και GROUND από το USB connector ενώ οι έξοδοι είναι VDD (+15V), VSS (-15V), 5V (2 φορές) και GROUND ώστε να υπάρχει κοινή αναφορά. Η pcb πλακέτα σχεδιάστηκε σε 2 επίπεδα, με όλα τα εξαρτήματα στο top layer, ενώ το bottom layer, όπως και στην πλακέτα του μικροελεγκτή, χρησιμοποιήθηκε κυρίως ως επίπεδο γείωσης (ground pour).



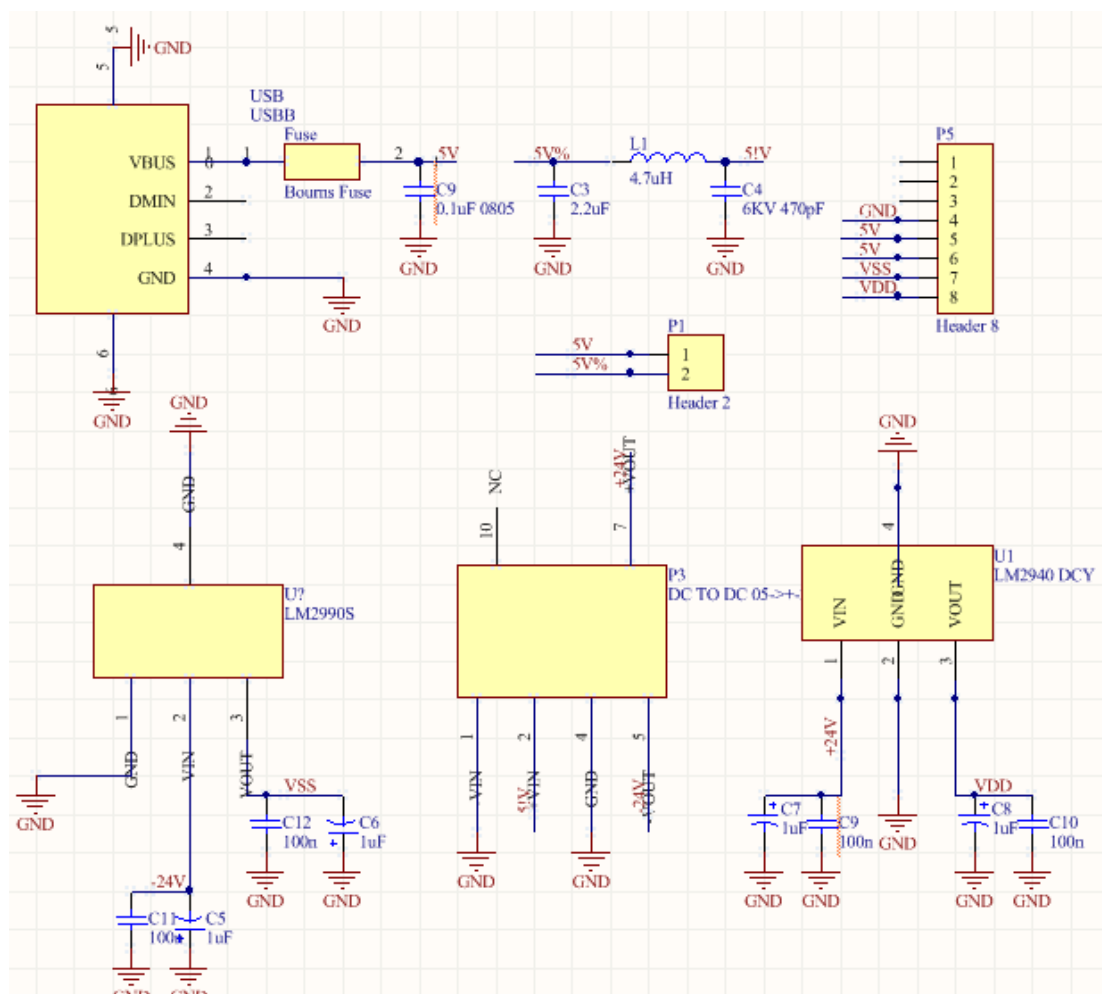
Σχήμα 22: 2D σχέδιο του PCB layout της πλακέτας Power Supply



Εικόνα 19: Η πλακέτα τροφοδοσίας



Σχήμα 23: 3D αναπαράσταση της ίδιας πλακέτας



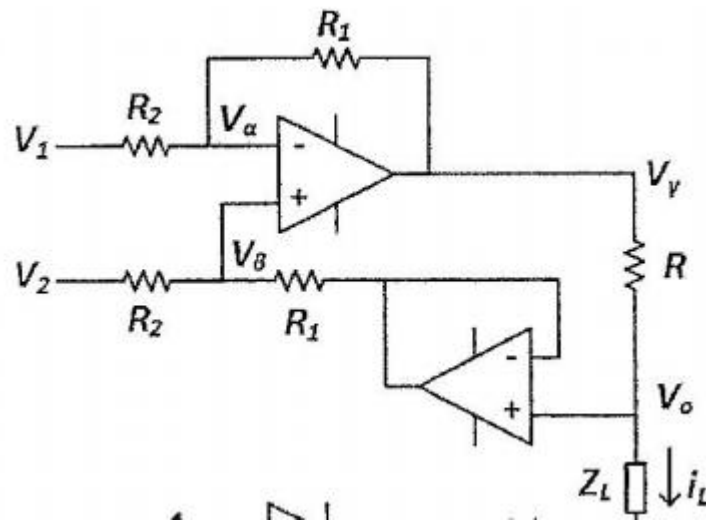
Σχήμα 24: Σχηματικό διάγραμμα της πλακέτας τροφοδοσίας

8.5. Η πηγή ρεύματος (Current Source)

Η δημιουργία του κατάλληλου αναλογικού σήματος εισόδου στην διάταξη της παρούσας εργασίας είναι από τα πλέον σημαντικά ζητήματα που προκύπτουν κατά την εκπόνησή της. Όπως αναφέραμε προηγουμένως, απαιτείται ένα ημιτονικό ρεύμα εισόδου στον 1ο προς 64 πολυπλέκτη, ενώ ο 2ος πολυπλέκτης θα διαδραματίζει το ρόλο της επιστροφής του ρεύματος αυτού. Δυο είναι τα θέματα που προκύπτουν εδώ. Το ένα αφορά στην σταθερότητα της πηγής ρεύματος και την ανεξαρτησία της από οποιοδήποτε τυχόν φορτίο εξόδου (που εδώ είναι το μοντέλο phantom της πειραματικής διάταξής μας, ενώ σε πρακτικές εφαρμογές είναι ο ίδιος ο ασθενής), ενώ το άλλο αφορά στην τιμή (peak to peak) του ρεύματος που παράγεται. Σε ότι αφορά στο 1ο σχεδιάζουμε μια διάταξη όπου αποδεικνύουμε μαθηματικά και έπειτα με χρήση κατάλληλης προσομοίωσης την ανεξαρτησία της εξόδου από το φορτίο, προτού προχωρήσουμε στην υλοποίησή της. Σε ό,τι αφορά στο 2ο, μετράμε τις μέγιστες αντιστάσεις που μπορούν να προκύψουν στο phantom μοντέλο, ώστε

δεδομένου του σταθερού και ανεξάρτητου ρεύματος από το φορτίο που παρέχεται, μέσω του νόμου του Ohm, να υπολογίζουμε τις τάσεις που αναπτύσσονται. Αυτές οι τάσεις δεν θα πρέπει να υπερβαίνουν τα +/-15Volts που είναι η τροφοδοσία των αναλογικών ολοκληρωμένων του συστήματος, διαφορετικά οδηγούμαστε σε ψαλιδισμό. Μπορούμε επίσης στο σημείο αυτό, εφαρμόζοντας την ίδια την πηγή ρεύματος κατευθείαν αντιδιαμετρικά του δοχείου να μετρούμε τις τάσεις που αναπτύσσονται, χωρίς ενδιάμεσο υπολογισμό αντίστασης.

Η ιδέα της δημιουργίας της πηγής ρεύματος στηρίζεται σε ένα σχετικά απλό κύκλωμα το οποίο θεωρητικά υλοποιεί πράγματι μια διάταξη που δίνει έξοδο ανεξάρτητη τυχόντων φορτίων εξόδου και είναι το ακόλουθο: ^[31]



Σχήμα 25: Κυκλωματικό διάγραμμα απλής πηγής ρεύματος

Καλούμαστε να υπολογίσουμε το ρεύμα I_L , συναρτήσει της εισόδου. Από διαίρεση τάσης, εάν θεωρήσουμε ιδανικούς τους τελεστικούς ενισχυτές έτσι ώστε να μην εισέρχεται ρεύμα στους ακροδέκτες τους, είναι προφανές ότι $V_a - V_\gamma = (V_1 - V_\gamma) \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ από όπου επιλύοντας ως προς V_a έχουμε

$$V_a = \frac{V_1 R_1 + R_2 V_\gamma}{R_1 + R_2}.$$

Εντελώς παρόμοια (από συμμετρία) για τον κάτω κλάδο ισχύει

$$V_\beta = \frac{V_2 R_2 + R_1 V_\gamma}{R_1 + R_2}.$$

Λόγω ιδανικότητας των τελεστικών ενισχυτών οι τάσεις V_a και V_b είναι ίσες (κατ ουσία βραχυκύκλωμα) ώστε εξισώνοντας τις σχέσεις που βρέθηκαν και σε συνδυασμό με την (από νόμο Ohm) σχέση $V_o = V_g - I_L R$ βρίσκουμε ότι

$$i_L = \frac{R_1}{R \cdot R_2} (V_2 - V_1)$$

Σημειώνουμε ότι το ρεύμα φορτίου i_L , διασχίζει ολόκληρο την αντίσταση R , καθώς δεν εισέρχεται καθόλου ρεύμα στον τελεστικό ενισχυτή, κάτι το οποίο καθιστά την τιμή του ρεύματος αυτού ανεξάρτητη του φορτίου Z_L , όπως βρέθηκε και προηγούμενα. Στην εφαρμογή μας, το φορτίο αυτό είναι κυρίως ο εξεταζόμενος ιστός (πειραματικά το περιεχόμενο του κουβιά) και πολύ λιγότερο οι αντιστάσεις γραμμών και των πολυπλεκτών που είναι αμελητέες σε σχέση με το εξεταζόμενο φορτίο. Επίσης, δεδομένου ότι θα έχουμε και μια επιστροφή ρεύματος, θα πρέπει να κατασκευαστεί και μια ακόμα πηγή ρεύματος συμμετρική με αντίθετη τιμή εξόδου.

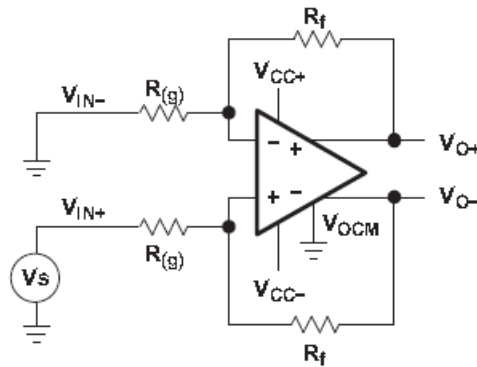
Στην πράξη, φυσικά θα πρέπει να ληφθούν υπόψη σημαντικοί παράγοντες, όπως η μη ιδανικότητα των τελεστικών ενισχυτών, ο παραγόμενος θόρυβος, όπως επίσης και το εύρος ζώνης των ολοκληρωμένων που θα χρησιμοποιηθούν, που πρέπει να ανταποκρίνεται στη συχνότητα των σημάτων που χρησιμοποιούμε. Τα σήματα τάσης εισόδου (άρα και ρεύματος εξόδου που είναι είσοδος στο σύστημα EIT) θα έχουν συχνότητες από 10kHz ως και 2MHz περίπου, συχνότητες στις οποίες μπορούν να εξεταστούν οι σημαντικές ηλεκτρικές ιδιότητες των ιστών.

Το ολοκληρωμένο κύκλωμα AD8674^[32] περιέχει ουσιαστικά 4 τελεστικούς ενισχυτές, ακριβώς όσους χρειαζόμαστε συνολικά για τις 2 πηγές ρεύματος. Χαρακτηριστικό του ολοκληρωμένου αυτού είναι ο πολύ χαμηλός θόρυβος (2.8 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$, 77 nV p-p), το ικανοποιητικά μεγάλο για την περίπτωσή μας εύρος ζώνης 10MHz, και η δυνατότητα τάσης τροφοδοσίας +/-15Volts, που όπως περιγράψαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο είναι απαραίτητη για να αποφευχθεί ο ψαλιδισμός των σημάτων.

Όλες οι αντιστάσεις επιλέγονται με τιμές 1k Ω , εκτός από την αντίσταση R που είναι 100 Ω , έτσι το ρεύμα εξόδου θα είναι $1/100(V_2 - V_1)$. Θέτοντας V_2 γειωμένο και V_1 θετικό στη μια πηγή και αρνητικό στην άλλη πηγή λαμβάνουμε τα 2 επιθυμητά ρεύματα αντίθετης φοράς. Επίσης, στις τροφοδοσίες του AD8674 τοποθετούμε πυκνωτές 100nF κεραμικούς και 10 μF πολικούς παράλληλα μεταξύ τους για το isolation, όπως και σε όλα τα ολοκληρωμένα της εφαρμογής.

Σημαντικό όμως ζήτημα είναι η παροχή των δυο αντίθετων τάσεων εισόδου στις 2 πηγές ρεύματος. Αυτό το ρόλο αναλαμβάνει το ολοκληρωμένο THS413X, το οποίο λαμβάνει ουσιαστικά μια τάση εισόδου V_{IN} και μια τάση αναφοράς V_R (στην περίπτωση εδώ γείωση) και δίνει ως έξοδο τις τάσεις $V_{IN}-V_R$ και V_R-V_{IN} . Στην παρούσα εφαρμογή θα δίνει την ίδια την τάση εισόδου και την αντίθετή της ώστε να εισέλθουν στο AD8674. Το THS413X ^[33] διαθέτει εύρος ζώνης 150MHz, τροφοδοτείται όπως πρέπει στα ± 15 Volts, με θόρυβο στην είσοδο $1.3 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$.

Για βέλτιστη λειτουργία της διάταξης ως διαφορικός ενισχυτής θα πρέπει να τοποθετηθούν κατάλληλες αντιστάσεις τόσο στους ακροδέκτες εισόδου όσο και στις αναδράσεις του ολοκληρωμένου:



Σχήμα26: Η κυκλωματική διάταξη του διαφορικού με 2 εξόδους ενισχυτή THS413X

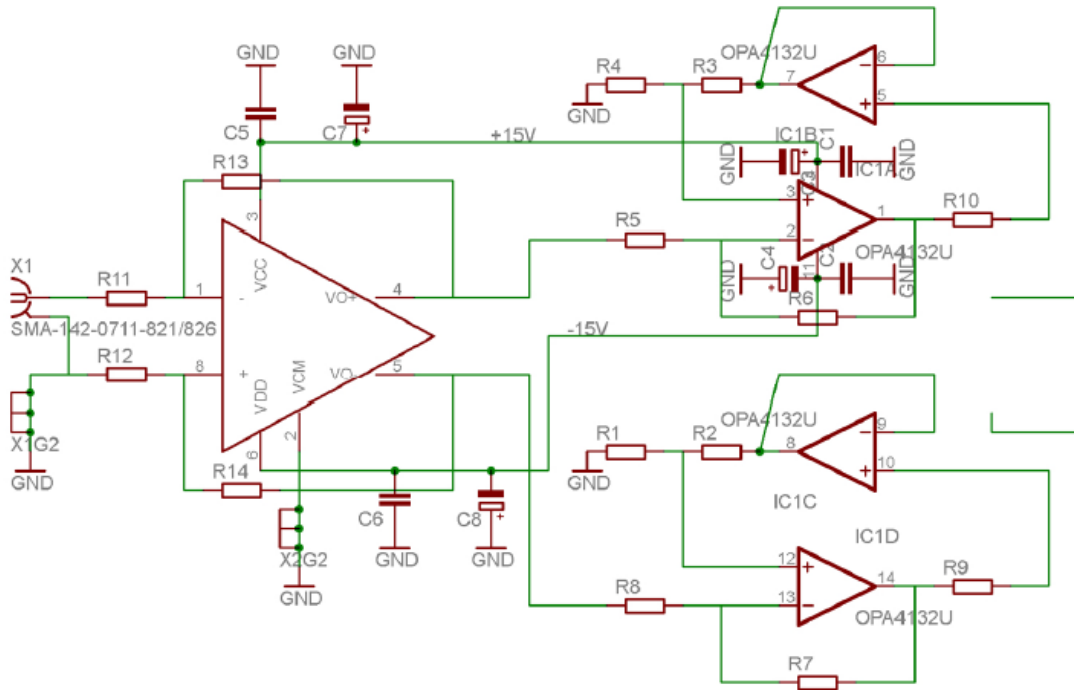
Ανάλογα με τις τιμές των αντιστάσεων αυτών ρυθμίζεται και το κέρδος κλειστού βρόχου του ενισχυτή:

Πίνακας 2: Προτεινόμενες τιμές αντιστάσεων

ΚΕΡΔΟΣ	$R(g) \Omega$	$R_f \Omega$
1	390	390
2	374	750
5	402	2010
10	402	4020

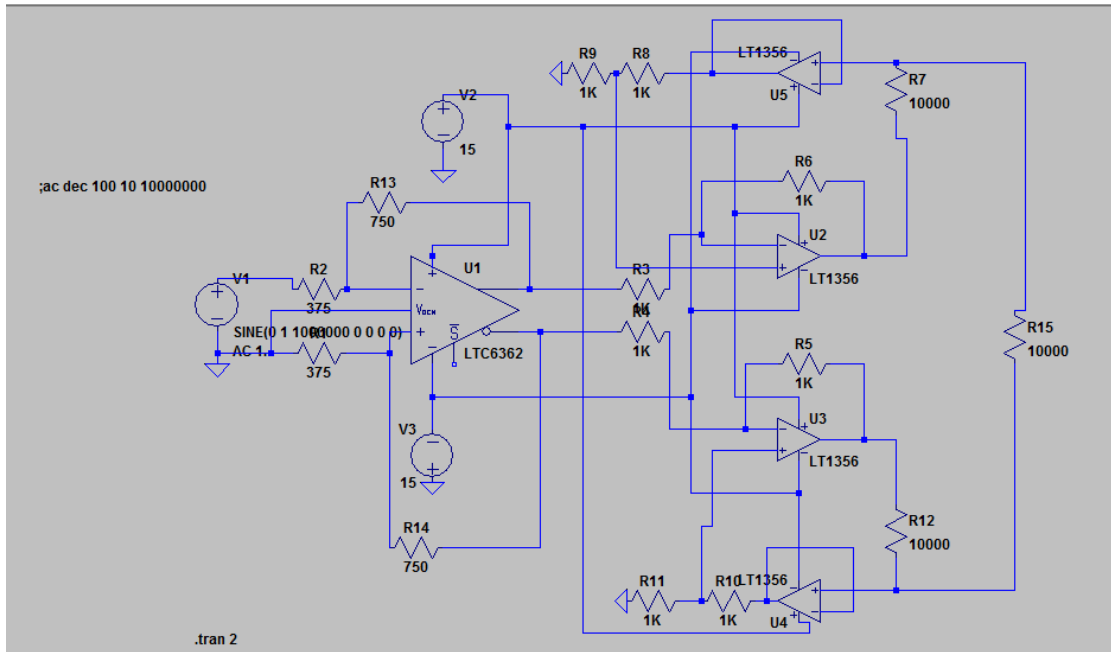
Επιλέγουμε κέρδος ίσο με 1, άρα δεν εφαρμόζεται καμία αντίσταση. Επίσης, τοποθετούμε πυκνωτές 100nF και 10μF, για το isolation όπως ακριβώς και προηγουμένως στην τροφοδοσία.

Το συνολικό σχηματικό της πηγής ρεύματος είναι το ακόλουθο:



Σχήμα 27: Σχηματικό κυκλωματικό διάγραμμα συνολικής διάταξης πηγής ρεύματος

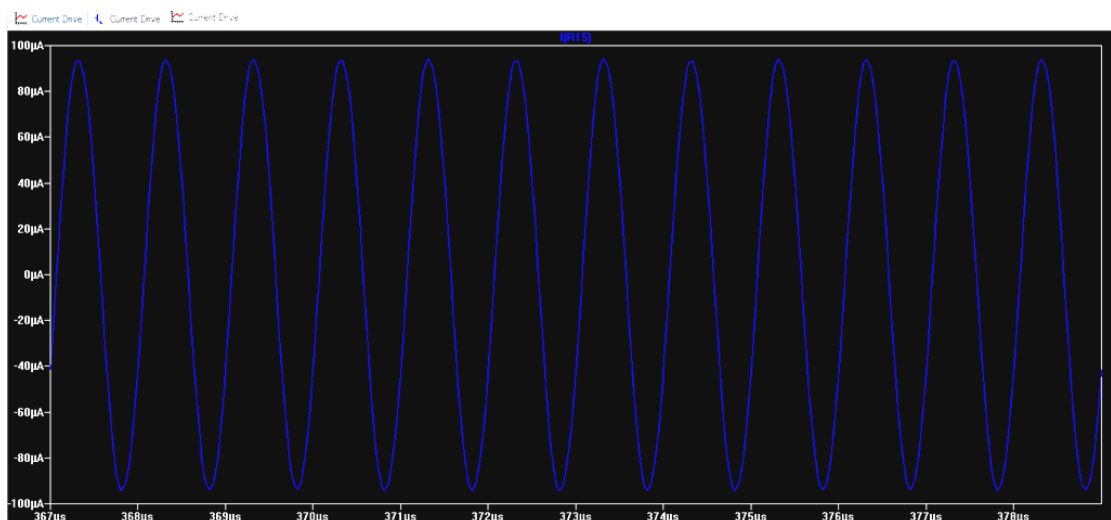
Για την επαλήθευση της σωστής λειτουργίας του κυκλώματος πριν την πρακτική του υλοποίηση εκτελέστηκε μια προσομοίωση στο λογισμικό LT-Spice για διάφορες τιμές συχνοτήτων σήματος εισόδου, και διαφορετικά φορτία, ώστε να αποδειχτεί η ανεξαρτησία του πλάτους του ρεύματος που διαρρέει το φορτίο από την τιμή του φορτίου. Το κύκλωμα που σχεδιάστηκε είναι το ακόλουθο:



Σχήμα 28: Το σχηματικό διάγραμμα πηγής ρεύματος σχεδιασμένο στο LTSpice

Η R15 είναι το φορτίο που συναντά το ρεύμα και προσομοιώνει το σώμα προς εξέταση.

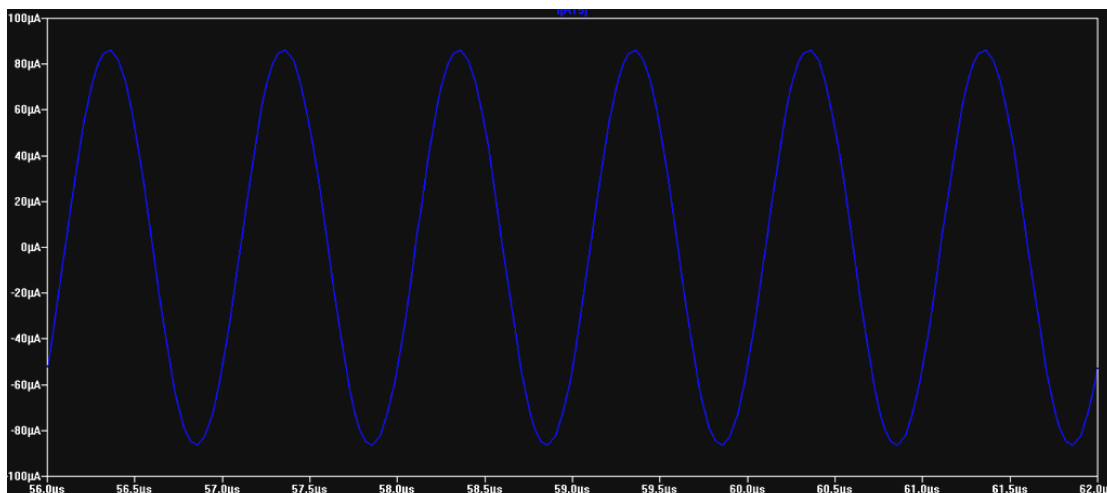
Για $V_{1p-p}=2\text{Volts}$ και $f=1\text{MHz}$, με φορτίο $10\text{k}\Omega$ το ρεύμα εξόδου είναι το ακόλουθο:



Διάγραμμα 4: Ρεύμα εξόδου για $V_{pp}=2\text{V}$, $f=1\text{MHz}$, $R_L=10\text{k}\Omega$

Το πλάτος του ρεύματος είναι $94\mu\text{A}$ περίπου ενώ έχει ημιτονική συμπεριφορά

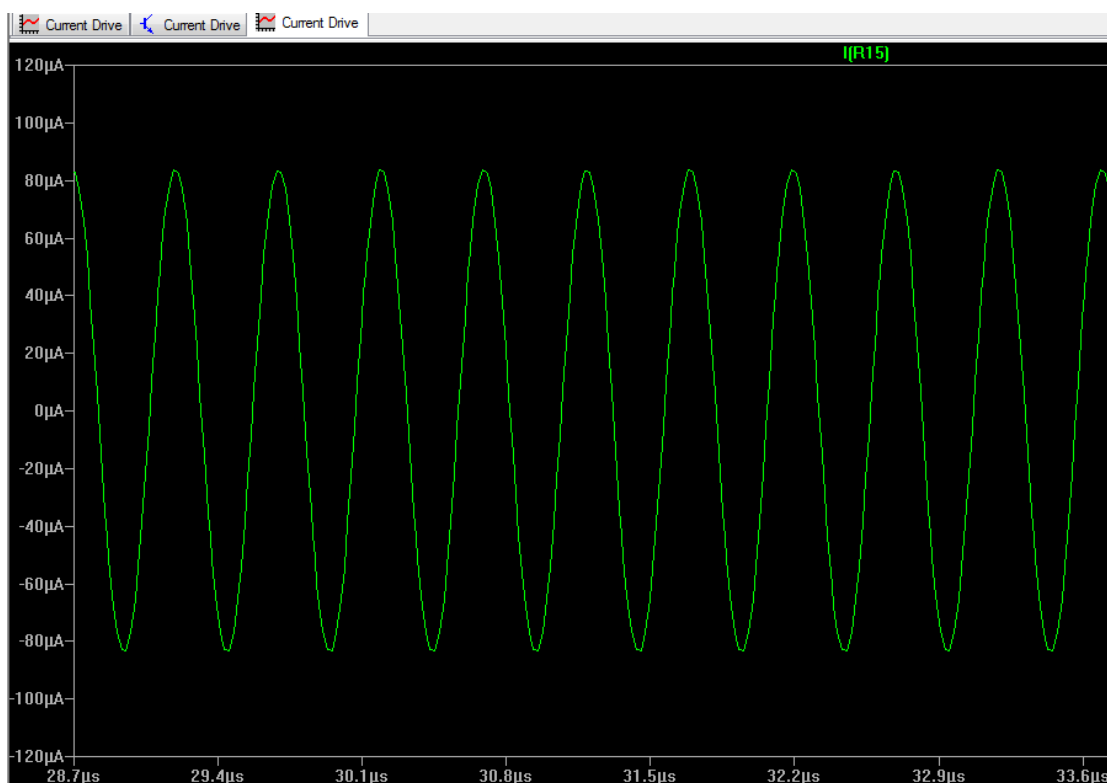
Για ίδιο πλάτος, ίδια συχνότητα και διπλάσιο φορτίο, δηλαδή $20\text{k}\Omega$, το πλάτος είναι το ακόλουθο:



Διάγραμμα 5: Ρεύμα εξόδου για $V_{pp}=2V$, $f=1MHz$, $R_L=20K\Omega$

Δηλαδή περίπου $86\mu A$, μικρή η μείωση από το προηγούμενο.

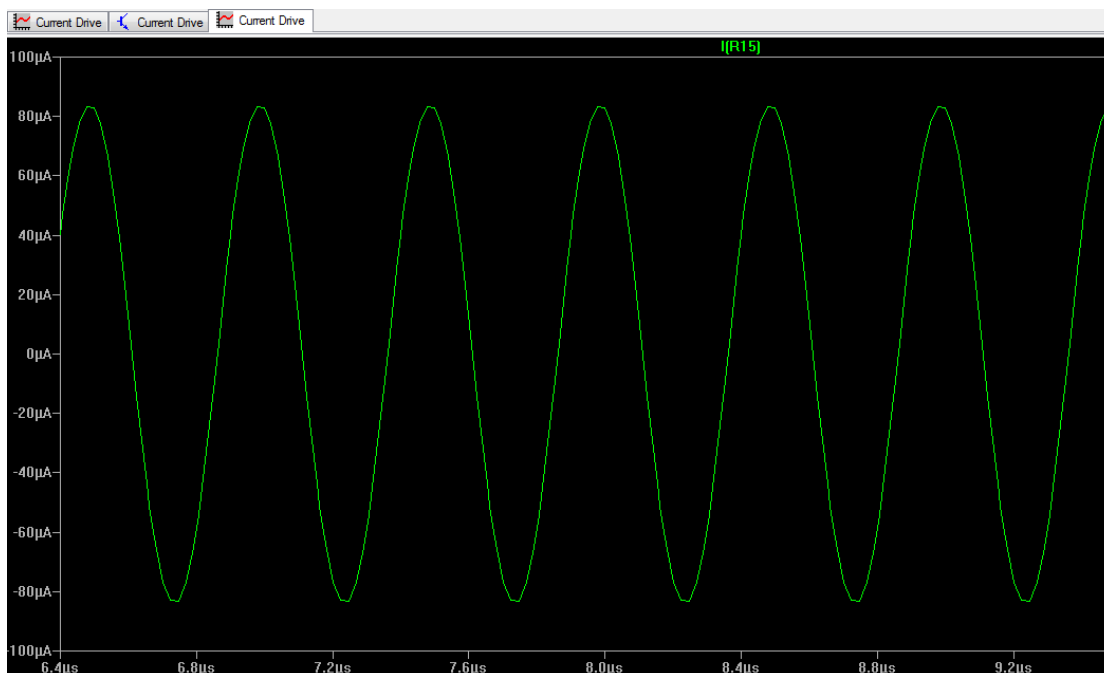
Για $2V_{p-p}$ συχνότητα $2MHz$ και φορτίο $10k\Omega$, έχουμε την εξής απόκριση:



Διάγραμμα 6: Ρεύμα εξόδου για $V_{pp}=2V$, $f=2MHz$, $R_L=10K\Omega$

Το πλάτος είναι $84\mu A$

Για διπλασιασμό φορτίου στο ίδιο πλάτος και συχνότητα έχουμε:

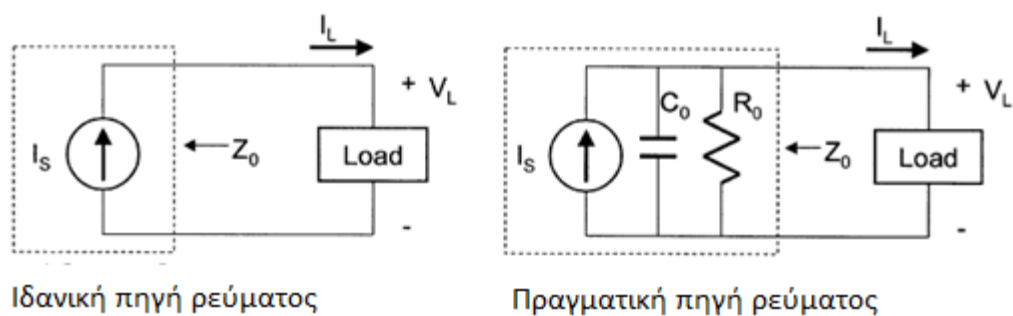


Διάγραμμα 7: Ρεύμα εξόδου για $V_{pp}=2V$, $f=2MHz$, $R_L=20K\Omega$

Το πλάτος παραμένει στα $83,4\mu A$, ανεπαίσθητη είναι η μείωσή του.

Οι μικρές μεταβολές πλάτους συναρτήσει του φορτίου οφείλονται στη μη ιδανικότητα των τελεστικών ενισχυτών ειδικά των AD8674, όπου εισέρχεται ρεύμα κάποιων nA στους ακροδέκτες του με αποτέλεσμα να μην περνάει ακριβώς το ίδιο ρεύμα ακριβώς από τις αντιστάσεις R7 και R12 στο φορτίο, ώστε το τελευταίο διαδραματίζει έναν πολύ μικρό ρόλο στην έξοδο. Ωστόσο το πλάτος του ρεύματος έχει πολύ στενό εύρος με αποτέλεσμα να μπορεί να θεωρηθεί η διάταξη υπό προϋποθέσεις ως μια σταθερή πηγή ρεύματος.

Είναι ωστόσο σημαντικό να αναφερθεί πως η εφαρμογή της πηγής ρεύματος στη διάταξη, βγάζει στην επιφάνεια πολλές μη ιδανικότητες της πηγής ρεύματος. Μια ιδανική πηγή ρεύματος απλά "βλέπει" το φορτίο στο οποίο διοχετεύεται, ωστόσο στην πραγματικότητα, αυτή συναντά τόσο ωμικές όσο και χωρητικές παρασιτικές συνιστώσες, οι οποίες παραμορφώνουν το σήμα που επιθυμούμε να οδηγήσουμε στο φορτίο. [34]



Σχήμα 29: Αριστερά: ιδανική πηγή ρεύματος, Δεξιά: Πραγματική πηγή ρεύματος

8.6. Στάδιο εξόδου

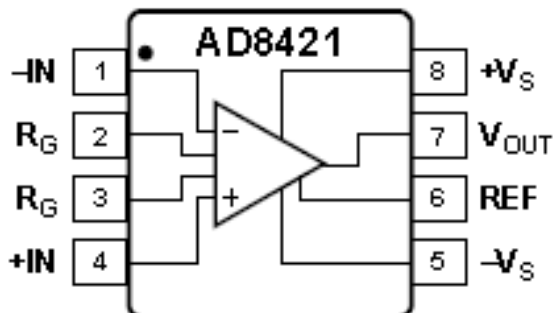
Σε μια πειραματική διάταξη είναι σημαντικό να οδηγούμε το σήμα στην έξοδο με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να είναι δυνατή όσο περισσότερο γίνεται η άμεση μέτρησή της. Συχνά χρησιμοποιούνται ολοκληρωμένα κυκλώματα που καλούνται instrumentation amplifiers, λαμβάνοντας μια διαφορική τάση και ενισχύοντάς την σε συγκεκριμένη κλίμακα που να εξυπηρετεί τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής.

Στην διάταξη της εργασίας αυτής λαμβάνονται δυο τάσεις εξόδου (διαφορικές τάσεις), από δυο αντίστοιχους πολυπλέκτες 64 προς 1. Αυτές οι τάσεις αντιπροσωπεύουν τις τιμές που λαμβάνονται από δυο διαδοχικά ηλεκτρόδια που βρίσκονται πάνω στην πειραματική διάταξη (δοχείο). Η κοινή τάση αναφοράς είναι η γείωση. Ωστόσο είναι σκόπιμο να μετρηθούν οι διαφορές δυναμικού μεταξύ όλων των γειτονικών ηλεκτροδίων για όλες τις πιθανές θέσεις της πηγής ρεύματος.

Για το σκοπό αυτό τοποθετείται στο κύκλωμα ένας instrumentation amplifier AD8421, ^[35] με ρυθμιζόμενο κέρδος, χαμηλό θόρυβο μέτρησης και bandwidth 10MHz για κέρδος ανοικτού βρόχου $G=1$. Η τροφοδοσία του μπορεί να ρυθμιστεί σε διαφορικό mode από ± 2.5 ως ± 18 Volts, και για συμφωνία με τα προηγούμενα αναλογικά ολοκληρωμένα (και για να μην υπάρχει ψαλιδισμός), ρυθμίζεται στα ± 15 Volts. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται ο θόρυβος στο 1kHz συναρτήσει της αντίστασης πηγής (που εδώ ισούται με την αντίσταση που καλούμαστε να μετρήσουμε):

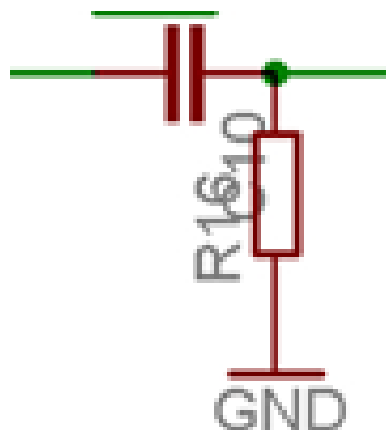


Διάγραμμα 8: Πυκνότητα θορύβου VS αντίσταση πηγής



Σχήμα 30: Σχηματικό διάγραμμα του AD8421

Δεδομένου ωστόσο του ότι κινούμαστε σε συχνότητες σημάτων 10-1700kHz, ο θόρυβος που παρουσιάζεται είναι πολύ μεγαλύτερος. Στη διάταξη μας θεωρούμε για λόγους αποφυγής κορεσμού $G=1$, οπότε μεταξύ των ακροδεκτών R_G δεν τοποθετούμε καμία αντίσταση. Για καλύτερο φιλτράρισμα και την αποκοπή dc offsets, στην καθεμία από τις δυο εισόδους (ακροδέκτες) του ενισχυτή τοποθετείται φίλτρο της ακόλουθης μορφής:

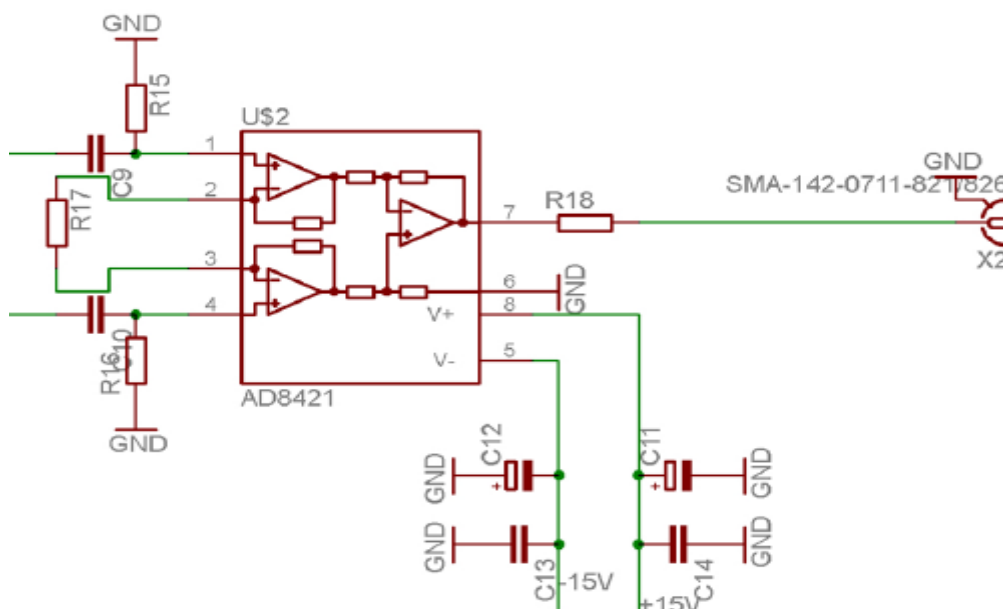


Σχήμα 31: Κύκλωμα υπεραποφίλτρου στην είσοδο του AD8421

Ο πυκνωτής ορίζεται σε 100nF ενώ οι αντιστάσεις 4,7MΩms. Η απόκριση του φίλτρου είναι προφανές ότι θα είναι $\frac{RCs}{1+RCs}$, πρόκειται για υπεραποφίλτρου που αποκόπτει χαμηλές (κοντά σε dc) τυχόν ανεπιθύμητες παρασιτικές συχνότητες.

Όπως και σε όλες τις τροφοδοσίες +/-15Voltτων αναλογικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, έτσι και εδώ τοποθετούνται πυκνωτές 100nF (κεραμικός) και 10μF (πολικός) για το decoupling.

Η διάταξη εξόδου έχει το ακόλουθο σχηματικό:



Σχήμα 32: Σχηματικό διάγραμμα της διάταξης εξόδου

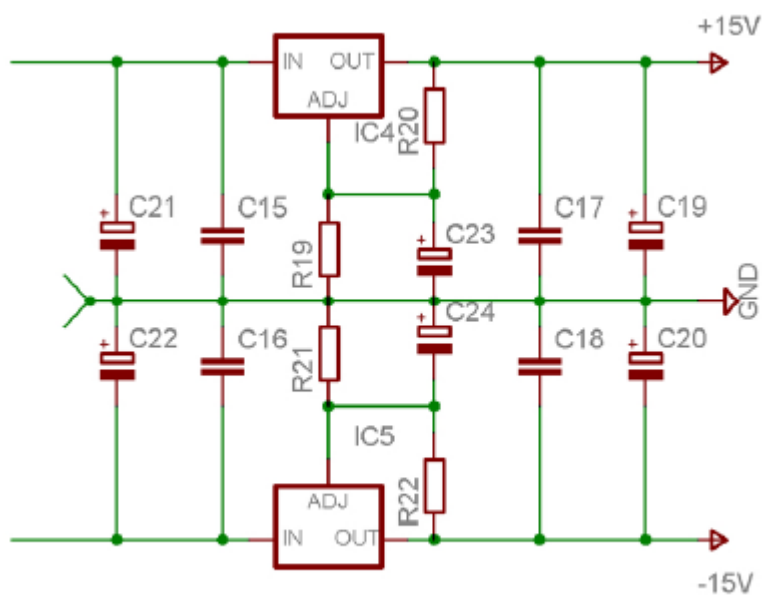
8.7. Τροφοδοσία πηγής ρεύματος και AD8421

Σε ό,τι αφορά στην ίδια την τροφοδοσία των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων της πηγής ρεύματος καθώς και του σταδίου εξόδου, είναι χαρακτηριστικό ότι αυτή απαιτεί σχετικά μεγάλες ποσότητες ισχύος. Συγκεκριμένα, ο ίδιος ο AD8674 απαιτεί 3mA για κάθε ενισχυτή, δηλαδή $4 \cdot 3 = 12\text{mA}$, ο AD8421 2,3mA, ενώ ο THS413X 860μA. Η προηγούμενη τροφοδοσία των πολυπλεκτών επομένως δεν επαρκεί για τις ενεργειακές ανάγκες και αυτών εδώ των κυκλωμάτων. Επομένως, αποφασίστηκε η δημιουργία μιας μικρής ανεξάρτητης τροφοδοσίας, σε κοινή πλακέτα, για τις 2 τελευταίες διατάξεις.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται τα ολοκληρωμένα LM317TS και LM337TS. Η συνδεσμολογία πραγματοποιείται όπως στο παρακάτω σχηματικό διάγραμμα. Το πρώτο λαμβάνει μια τάση της τάξης των 25Volts (από τροφοδοσία οργάνου) και με κατάλληλες τιμές των αντιστάσεων R19 και R20 ρυθμίζεται η έξοδος στα +15Volts.

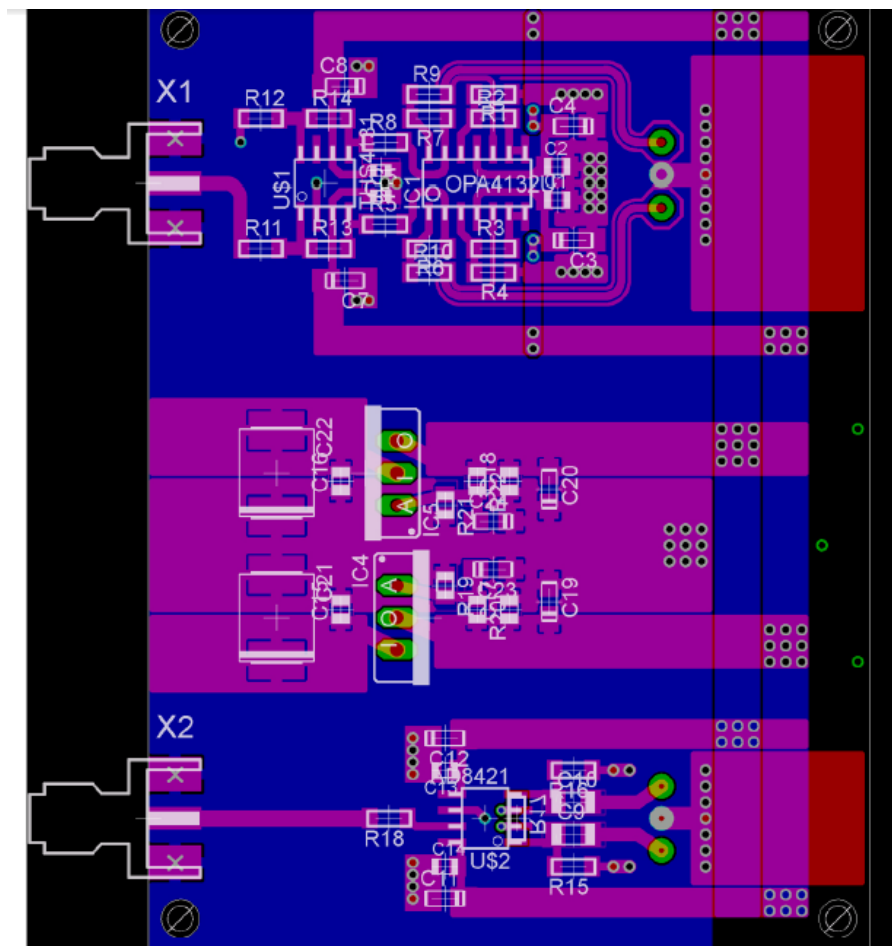
Με ρύθμιση των αντιστάσεων R21 και R22 το LM337TS δίνει στην έξοδό του -15Volts. Ως R19 και R21 τοποθετούνται αντιστάσεις 2,2kΩ, ενώ ως R20 και R22, αντιστάσεις 200Ω.

Οι πυκνωτές τοποθετούνται για προφανείς λόγους, όπως ακριβώς περιγράφηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια.



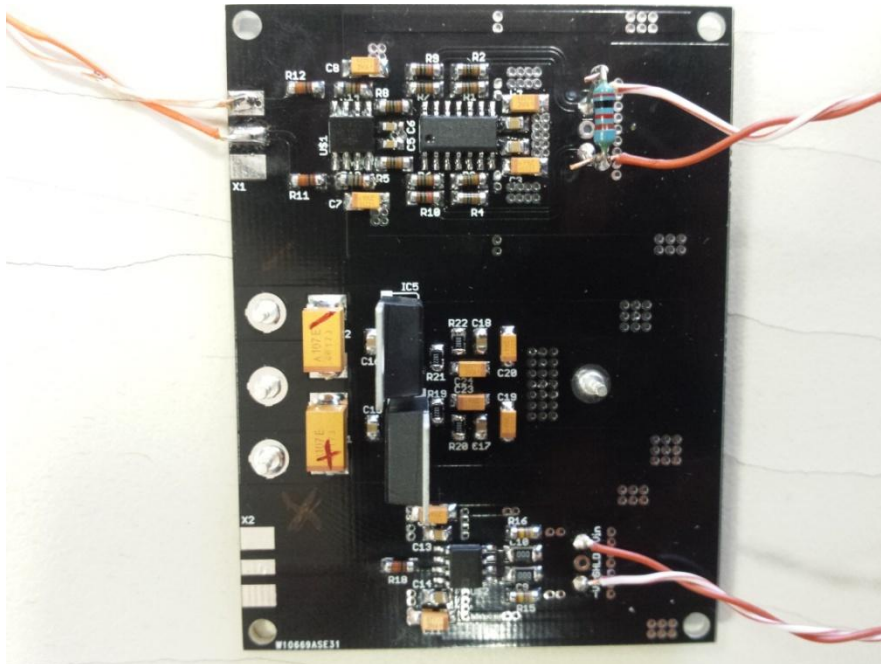
Σχήμα 33: Κυκλωματικό διάγραμμα τροφοδοσίας

Τα στάδια της πηγής ρεύματος, εξόδου και τροφοδοσίας τους τοποθετούνται σε μια ενιαία πλακέτα, που συνδέεται με το υπόλοιπο σύστημα μέσω βυσμάτων SMA. Αξίζει να σημειωθεί ότι η πλακέτα αυτή σχεδιάστηκε σε 2 επίπεδα σήματος. Το PCBσχέδιο είναι το ακόλουθο:



Σχήμα 34: Σχήμα PCB πλακέτας πηγής ρεύματος, σταδίου εξόδου και τροφοδοσίας τους

Η τελική πλακέτα είναι η εξής:



Εικόνα 20: Η πλακέτα πηγής ρεύματος, σταδίου εξόδου και της τροφοδοσίας τους

8.8. Η Μητρική πλακέτα (motherboard)

Μέχρι στιγμής απαριθμήσαμε και περιγράψαμε όλα τα απαραίτητα μέρη για να λειτουργήσει σωστά η διάταξη EIT που σχεδιάζεται και υλοποιείται στην εργασία αυτή. Ωστόσο, επειδή όλα αυτά τα μέρη, ή καλύτερα, υποδιατάξεις, δεν βρίσκονται σε κοινό κύκλωμα, αλλά είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, είναι προφανής η αναγκαιότητα της σωστής σύνδεσης μεταξύ τους. Η σύνδεση αυτή πρέπει να πραγματοποιηθεί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε και τα σήματα (ιδίως τα αναλογικά) να μην σημειώνουν απώλειες λόγω ασταθών συνδέσεων (όπως συχνά συμβαίνει στην περίπτωση πειραματισμών σε breadboards, ή άλλες περίπλοκες πρωτότυπες διατάξεις) και φυσικά η όλη διάταξη να διακρίνεται από κάποια σταθερότητα και από μηχανικής άποψης.

Για τους παραπάνω λόγους, και λόγω του πολύ μεγάλου πλήθους τόσο των αναλογικών όσο και των ψηφιακών σημάτων που διατρέχουν το σύνολο του συστήματος, σχεδιάζεται και υλοποιείται μια ειδική πλακέτα η οποία καλείται μητρική, εφόσον θα "στεγάσει" όλες τις υπόλοιπες. Ήδη αναφέρθηκε στο κεφάλαιο των πολυπλεκτών, ότι η μητρική πλακέτα θα διαθέτει 4 κοννέκτορες τύπου DDR3 SO-DIMM για την υποδοχή των 4 αντίστοιχων κυκλωμάτων πολυπλεκτών 64x1. Στο

κεφάλαιο των ηλεκτροδίων επίσης αναφέρθηκε η χρήση κοινέκτορα τύπου DXM για τη σύνδεση των αναλογικών σημάτων της πλακέτας με τα καλώδια των ηλεκτροδίων.

Είναι προφανές ότι τόσο τα αναλογικά σήματα όσο και τα ψηφιακά είναι απαραίτητο να ακολουθούν τις συντομότερες δυνατών διαδρομές και να αποφεύγονται παρεμβολές αναλογικών-ψηφιακών σημάτων. Για το λόγο αυτό ένα μέρος της μητρικής πλακέτας χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για ψηφιακά σήματα ενώ ένα άλλο μεγαλύτερο για τα αναλογικά. Μεταξύ τους παρεμβάλλεται ένα μεγάλο routing. Για επίσης παρεμβάλλεται μεταξύ οιονδήποτε 2 αναλογικών σημάτων ώστε να ελαχιστοποιούνται χωρητικά παρασιτικά φαινόμενα μεταξύ τους (crosstalk). Λόγω επίσης της περιπλοκότητας που παρουσιάζει το μεγάλο πλήθος των σημάτων, ειδικότερα των αναλογικών, η μητρική έχει σχεδιαστεί σε 4 επίπεδα σημάτων. Ο σχεδιασμός σε 4 επίπεδα από τη μια πλευρά διευκολύνει σημαντικά το σχεδιασμό και το routing των σημάτων, καθώς επίσης και την αποφυγή έντονων παρασιτικών φαινομένων, αλλά από την άλλη πλευρά αυξάνει πολύ σημαντικά το κόστος κατασκευής. Ωστόσο σε περίπλοκα mixed-signals διατάξεις είναι σχεδόν επιβεβλημένη λύση.^[36]

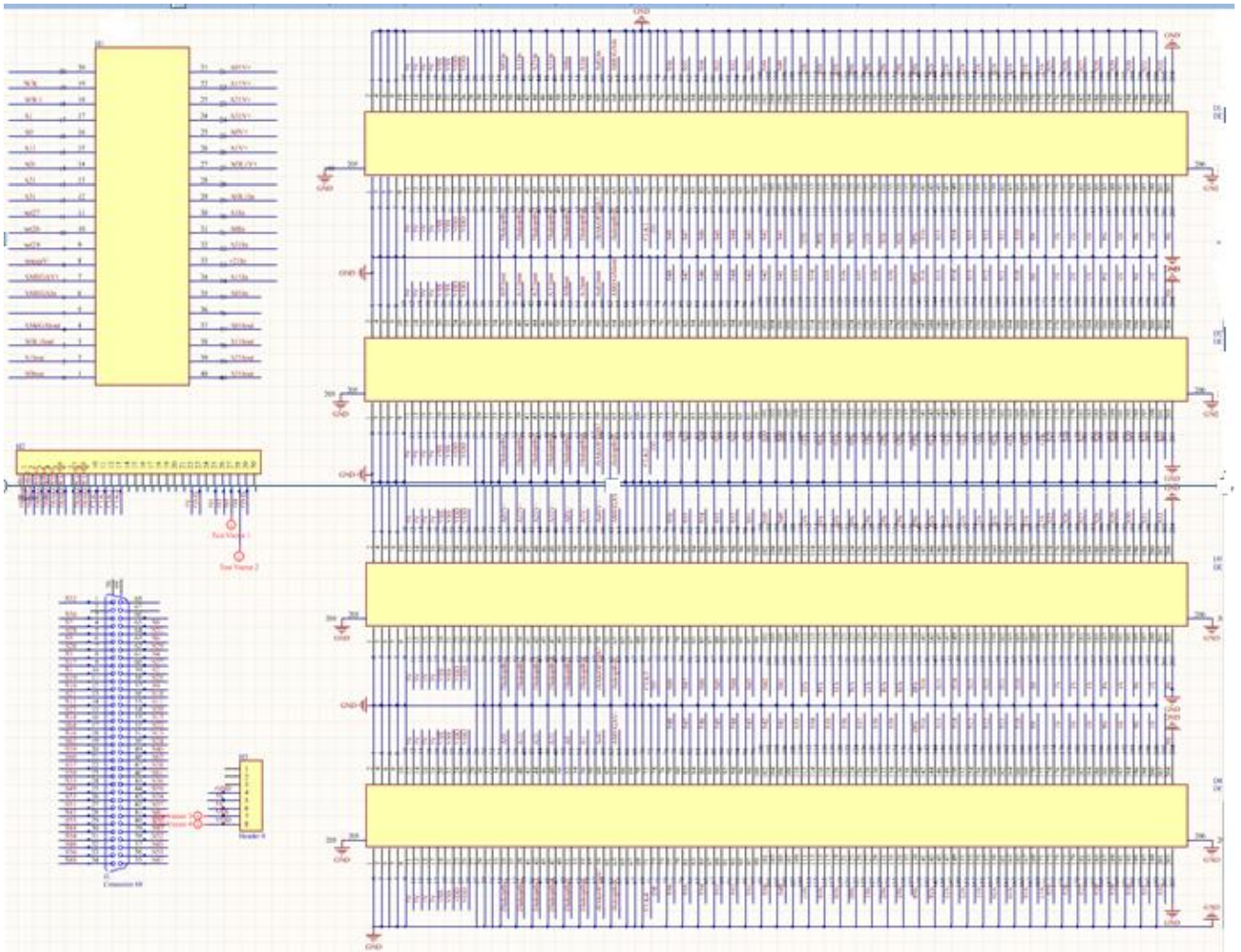
Σχεδιαστικά, η μητρική πλακέτα διαθέτει 2 SO-DIMM Memory connectors εμπρός και άλλους 2 πίσω, ευθυγραμμισμένους μεταξύ τους για να αποφεύγεται η εμπλοκή των κοινών αναλογικών σημάτων των πολυπλεκτών. Οι κοινέκτορες αυτοί είναι τύπου R, δηλαδή το voltage key τους βρίσκεται στην αριστερή πλευρά τους όπως τους παρατηρεί κανείς από την μπροστινή όψη τους. Τα αναλογικά σήματα των πολυπλεκτών, διέρχονται και από τους 4 πολυπλέκτες 64x1 (δηλαδή μπαίνουν/βγαίνουν σε κάθε SO-DIMM), και καταλήγουν στον DXM κοινέκτορα της μητρικής πλακέτας, ώστε να συνδεθούν με τα ηλεκτρόδια μέσω κατάλληλης καλωδιοταινίας (ribbon cable). Τα αναλογικά σήματα απαριθμούνται με συγκεκριμένο τρόπο στη μητρική πλακέτα από το 1 ως το 64. Για τη βέλτιστη σύνδεση των so-dimm πολυπλεκτών όμως, έχουμε διαφορετικό mapping ανά δυο πολυπλέκτες. Δηλαδή, για παράδειγμα, στις πλακέτες των πολυπλεκτών του ρεύματος εισόδου και της 1ης διαφορικής τάσης εξόδου, το αναλογικό σήμα S1 ταυτίζεται με το αναλογικό σήμα S1 της μητρικής πλακέτας, τη στιγμή που το αναλογικό σήμα S1 στις πλακέτες πολυπλεκτών ρεύματος επιστροφής και 2ης διαφορικής τάσης εξόδου ταυτίζεται με το αναλογικό σήμα S25 της μητρικής πλακέτας. Υπάρχει επομένως ένας "χάρτης" αντιστοίχισης μεταξύ σημάτων στις πλακέτες πολυπλεκτών και

σημάτων στη μητρική πλακέτα, κάτι το οποίο καθορίζει σημαντικά τον τρόπο προγραμματισμού του συστήματος.

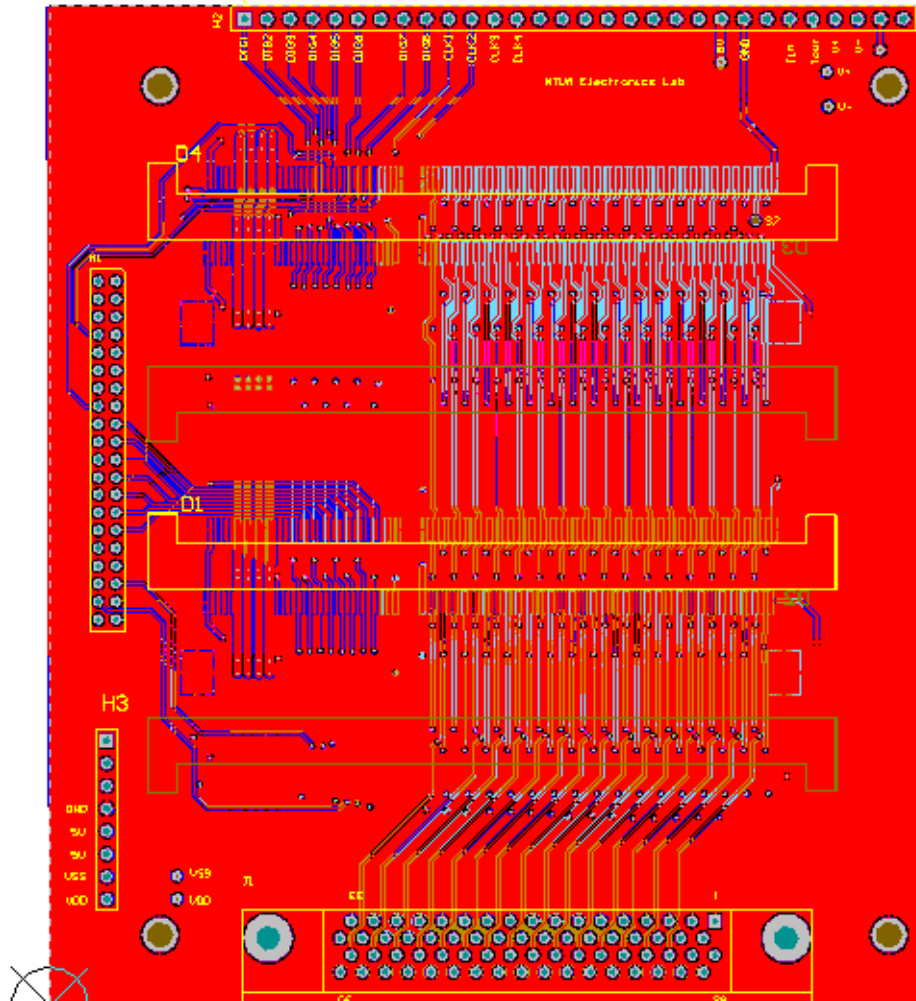
Εκτός από τα αναλογικά και τα ψηφιακά σήματα, στους κοννέκτορες so-dimm πρέπει να καταλήγουν οι τροφοδοσίες των περιεχόμενων ολοκληρωμένων, των καταχωρητών και των πολυπλεκτών δηλαδή, που έχουν τροφοδοσία 5V και +/-15V, αντίστοιχα. Σε αντίθεση με τα traces των σημάτων που δεν μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες ρεύματος, τα traces των τροφοδοσιών πρέπει να έχουν σημαντικά μεγαλύτερο πλάτος για να μπορούν να μεταφέρουν όλο το απαιτούμενο ρεύμα. Για το λόγο αυτό, πέρα από το πλάτος, χρησιμοποιούνται 2 συνεχόμενα pins των κοννεκτόρων για κάθε τροφοδοσία.

Πέρα από τα χαρακτηριστικά αυτά, η μητρική πλακέτα διαθέτει υποδοχή για αναπτυξιακή πλακέτα μικροελεγκτή (MCU) που προσφέρει πολλές δυνατότητες για τον προγραμματισμό της, καθώς και υποδοχή για την τροφοδοσία των πολυπλεκτών. Ωστόσο, δεν διαθέτει header για σταθερή υποδοχή της πλακέτας πηγής ρεύματος/σταδίου εξόδου, λόγω απουσίας χώρου, καθώς η τελευταία διαθέτει αρκετά μεγάλες διαστάσεις.

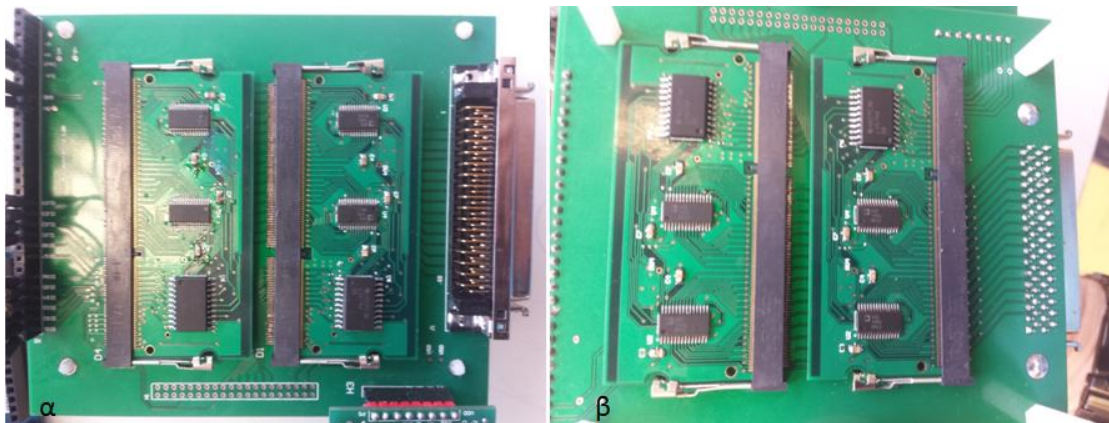
Στις επόμενες σελίδες παρατίθενται στο σχηματικό διάγραμμα της πλακέτας αυτής, το μοντέλο pcb στο πρόγραμμα σχεδίασης και φωτογραφία της ίδιας της πλακέτας από τις 2 όψεις της. Από την ίδια τη φύση του σχηματικού διαγράμματος γίνεται εύκολα αντιληπτή η περιπλοκότητα της διασύνδεσης των σημάτων, αναλογικών και ψηφιακών.



Σχήμα 35: Σχηματικό διάγραμμα της μητρικής πλακέτας (motherboard). Διακρίνεται ο τρόπος με τον οποίο έχει πραγματοποιηθεί η απαρίθμηση των αναλογικών σημάτων, καθώς και η ανά 2 DIMM διαφορετική χαρτογράφησή τους



Σχήμα 36: Σχέδιο PCB μητρικής πλακέτας-εμπρόσθια όψη



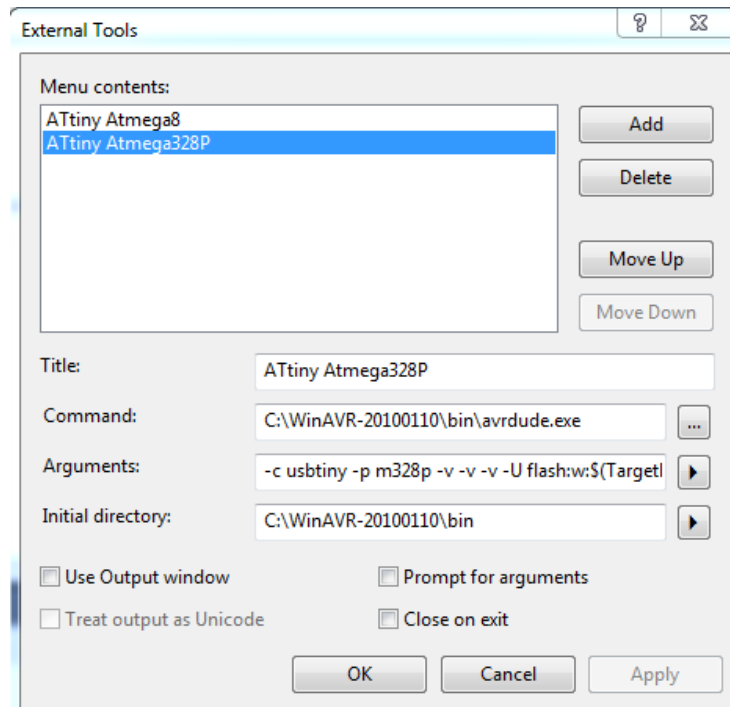
Εικόνα 21: Η μητρική πλακέτα, με τις πλακέτες πολυπλεκτών τοποθετημένες α) εμπρόσθια όψη, β) πίσω όψη

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

9. Προγραμματισμός του συστήματος

Κάθε ηλεκτρονικό σύστημα που περιλαμβάνει ψηφιακά σήματα είναι απαραίτητο με κάποιο τρόπο να προγραμματιστεί, και όπως ήδη αναφέρθηκε υπάρχουν αρκετοί τρόποι για να πραγματοποιηθεί αυτό. Ο προγραμματισμός ενός συστήματος το οποίο χρησιμοποιείται για τη μέτρηση κάποιων φυσικών ή ηλεκτρικών μεγεθών περιλαμβάνει δυο βασικά σκέλη: αφενός την οδήγηση των ψηφιακών σημάτων στα κατάλληλα ολοκληρωμένα, στην περίπτωσή μας τους πολυπλέκτες και τους καταχωρητές, και αφετέρου την "ανάγνωση" (read) των μεγεθών που καλούμαστε να μετρήσουμε, ούτως ώστε οι μετρήσεις να πραγματοποιούνται όσο το δυνατόν με πιο αυτοματοποιημένο τρόπο. Στη συγκεκριμένη διάταξη, αυτό μπορεί να υλοποιηθεί μεταξύ άλλων, και με την πλακέτα μικροελεγκτή at328p της οποίας ο σχεδιασμός προηγήθηκε. Μπορεί ωστόσο, λόγω της ιδιαίτερης κατασκευής της μητρικής πλακέτας, να συνδεθεί με αυτήν οποιαδήποτε σχεδόν αναπτυξιακή πλακέτα μικροελεγκτή και φυσικά να την προγραμματίσει.

Οπρογραμματισμός των πολυπλεκτών με χρήση της πλακέτας μικροελεγκτή atmega328pu μπορεί εύκολα να πραγματοποιηθεί με χρήση του συντάκτη atmel studio 7.0 που παρέχεται από την ίδια την Atmel, με κατάλληλες ρυθμίσεις, ώστε να οριστεί προγραμματιστής ο AVR pocket programmer (μέσω του μενού external tools, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα):



Εικόνα 22: ρυθμίσεις προγραμματιστή AVR pocket για επικοινωνία με τον atmega 328

Στην ετικέτα arguments γράφουμε

-cusbtiny -pm328p -v -v -v -Uflash:w:\$(TargetDir)\$(TargetName).hex:i ,

εντολή η οποία εναλλακτικά μπορεί να γραφεί στο command window, ορίζοντας όμως πρώτα ως διεύθυνση την θέση του avrdude.

Σε κάθε περίπτωση, αυτό είναι το σημαντικό προαπαιτούμενο έτσι ώστε να μπορεί ο μικροελεγκτής AVR να προγραμματιστεί με κώδικα γραμμένο σε C/C++.

Ο κώδικας που γράφουμε για τον σκοπό αυτό είναι ο ακόλουθος:

```
#define F_CPU 16000000UL
#include <avr/io.h>

int i, k, j, D[7], CLK[5];
int MAP[67]=

{25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 1, 2, 3, 4
, 5, 6, 7, 8, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 4
8, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 25, 26, 27};

int main(void)
{
```

```
DDRC=(1<<0)|(1<<1)|(1<<2)|(1<<3)|(1<<4)|(1<<5);
DDR0=(1<<0)|(1<<1)|(1<<2)|(1<<3)|(1<<4)|(1<<5);

/* Replace with your application code */
while(1)
{
    for(i=0;i<64;i++)//s=i+1
    {
        if(i<16)
        {
            D[5]=0;D[6]=0;
        }
        else if(i<32)
        {
            D[5]=1;D[6]=0;
        }
        else if(i<48)
        {
            D[5]=0;D[6]=1;
        }
        else
        {
            D[5]=1;D[6]=1;
        }
        if(i%16<8)
        {
            D[4]=0;
        }
        else
        {
```



```
        D[4]=1;
    }
    if(i%8<4)
    {
        D[3]=0;
    }
    else
    {
        D[3]=1;
    }
    if(i%4<2)
    {
        D[2]=0;
    }
    else
    {
        D[2]=1;
    }
    if(i%2<1)
    {
        D[1]=0;
    }
    else
    {
        D[1]=1;
    }

    PORTD=(0<<2);

    PORTC=(D[1]<<0)|(D[2]<<1)|(D[3]<<2)|(D[4]<<3)|(D[5]<<4)|(D[6]<<5);
    PORTD=(1<<2); //set CLK1==1 for register
```

```
1      if((MAP[i+1]-1)<16)//MAP[i+1]=siout exetazoume to j=siout-
      {
          D[5]=0;D[6]=0;
      }
      else if((MAP[i+1]-1)<32)
      {
          D[5]=1;D[6]=0;
      }
      else if((MAP[i+1]-1)<48)
      {
          D[5]=0;D[6]=1;
      }
      else
      {
          D[5]=1;D[6]=1;
      }
      if((MAP[i+1]-1)%16<8)
      {
          D[4]=0;
      }
      else
      {
          D[4]=1;
      }
      if((MAP[i+1]-1)%8<4)
      {
          D[3]=0;
      }
      else
      {
```

```
        D[3]=1;
    }
    if((MAP[i+1]-1)%4<2)
    {
        D[2]=0;
    }
    else
    {
        D[2]=1;
    }
    if((MAP[i+1]-1)%2<1)
    {
        D[1]=0;
    }
    else
    {
        D[1]=1;
    }
    PORTD=(0<<2);

    PORTC=(D[1]<<0)|(D[2]<<1)|(D[3]<<2)|(D[4]<<3)|(D[5]<<4)|(D[6]<<5);
    PORTD=(1<<3); //set CLK2==1 for register
    for(j=0;j<=61;j++)
    {
        k=i;
        if(((k+2)<16)||((k+2)>63))
        {
            D[5]=0;D[6]=0;
        }
        else if((k+2)<32)
        {
```

```
        D[5]=1;D[6]=0;
    }
    else if((k+2)<48)
    {
        D[5]=0;D[6]=1;
    }
    else
    {
        D[5]=1;D[6]=1;
    }
    if((k+2)%16<8)
    {
        D[4]=0;
    }
    else
    {
        D[4]=1;
    }
    if((k+2)%8<4)
    {
        D[3]=0;
    }
    else
    {
        D[3]=1;
    }
    if((k+2)%4<2)
    {
        D[2]=0;
    }
    else
```

```

    {
        D[2]=1;
    }
    if((k+2)%2<1)
    {
        D[1]=0;
    }
    else
    {
        D[1]=1;
    }
    PORTD=(0<<2);

    PORTC=(D[1]<<0)|(D[2]<<1)|(D[3]<<2)|(D[4]<<3)|(D[5]<<4)|(D[6]<<5);

    PORTD=(1<<4); //set CLK3==1 for register
    if(((MAP[k+3]-1)<16)||((MAP[k+3]-1)>63))
    {
        D[5]=0;D[6]=0;
    }
    else if((MAP[k+3]-1)<32)
    {
        D[5]=1;D[6]=0;
    }
    else if((MAP[k+3]-1)<48)
    {
        D[5]=0;D[6]=1;
    }
    else
    {
        D[5]=1;D[6]=1;
    }
}

```

```
if((MAP[k+3]-1)%16<8)
{
    D[4]=0;
}
else
{
    D[4]=1;
}
if((MAP[k+3]-1)%8<4)
{
    D[3]=0;
}
else
{
    D[3]=1;
}
if((MAP[k+3]-1)%4<2)
```

```
{
    D[2]=0;
}
else
{
    D[2]=1;
}
if((MAP[k+3]-1)%2<1)
{
    D[1]=0;
}
else
{
    D[1]=1;
```

```

        }
        k+=1;
        PORTD=(0<<2);

        PORTC=(D[1]<<0)|(D[2]<<1)|(D[3]<<2)|(D[4]<<3)|(D[5]<<4)|(D[6]<<5);

        PORTD=(1<<5); //set CLK4==1 for register
    }
}
}
}
}

```

Αρχικά, καθορίζεται η συχνότητα λειτουργίας του ρολογιού του μικροελεγκτή (μέσω fuse burn και εξωτερικού κρυστάλλου στα 16MHz). Στη συνέχεια ορίζονται οι μεταβλητές και φυσικά ο πίνακας map, του οποίου η i-οστή θέση υποδεικνύει σε ποιον διακόπτη του 2ου ή του 4ου πολυπλέκτη αντιστοιχεί ο i-στός διακόπτης του 1ου και 3ου πολυπλέκτη 64x1. Στη συνέχεια εντός πλέον της κύριας συνάρτησης main(θα μπορούσε όμως και μέσω υπορουτίνας), ορίζεται το είδος των pins του μικροελεγκτή. Δεδομένου ότι εδώ χρειαζόμαστε ψηφιακά πινάκια για τους πολυπλέκτες και τους καταχωρητές, ορίζουμε όλο το PORTC ως ψηφιακή έξοδο (που θα το χρησιμοποιήσουμε για τους πολυπλέκτες), και όλο το PORTD επίσης ως ψηφιακή έξοδο που όμως θα χρησιμοποιηθεί για τα ρολόγια του κάθε καταχωρητή. Αυτός ο διαχωρισμός έχει μια σημαντική σκοπιμότητα, καθώς είναι σημαντικό τη στιγμή της αλλαγής των ρολογιών των καταχωρητών να μην αλλάζει καμία άλλη ψηφιακή πληροφορία προερχόμενη από το μικροελεγκτή.

Εν συνεχεία, μέσω μιας επαναληπτικής δομής for, ανοίγουμε διαδοχικά όλους τους διακόπτες του πολυπλέκτη του οποίου η είσοδος είναι συνδεδεμένη με την έξοδο της πηγής ρεύματος, ώστε να εισέλθει το ρεύμα στην πειραματική μας διάταξη μέσω των καλωδίων. Αντιστοίχως, στην ίδια επαναληπτική δομή, ανοίγει ο επόμενος κάθε φορά διακόπτης του 2ου πολυπλέκτη, ούτως ώστε να επιστρέψει το ρεύμα που εισέρχεται και έτσι να κλείσει το κύκλωμα.

Για κάθε διακόπτη των 2 πρώτων πολυπλεκτών που ανοίγει, δηλαδή για καθεμία θέση της πηγής ρεύματος στη διάταξη, ανοίγει μια δεύτερη επαναληπτική δομή for, μέσω της οποίας, ανοίγουν οι κατάλληλοι, διαδοχικοί διακόπτες του 3ου και 4ου πολυπλέκτη, ώστε να μετρηθεί η διαφορική τάση εξόδου και να οδηγηθεί στον

instrumentation amplifier που αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Φυσικά αυτή η διαδικασία ακολουθεί πιστά τον παρακείμενο αλγόριθμο μέτρησης των τάσεων των ηλεκτροδίων (adjacent method), κάτι το οποίο είναι άμεσα συνδεδεμένο και με τον τρόπο με τον οποίο σε επόμενο στάδιο πρόκειται να ανακατασκευαστεί η εικόνα που απεικονίζει το "σώμα" που εξετάζει η πειραματική αυτή διάταξη.

Ο παραπάνω αποτελεί σαφώς ένα τρόπο προγραμματισμού των πολυπλεκτών, ωστόσο σκοπός μας είναι να λάβουμε σχετικά γρήγορες μετρήσεις, κάτι το οποίο απαιτεί αφενός τουλάχιστον μια αναλογική είσοδο για το μικροελεγκτή και αφετέρου αρκετά καλή συχνότητα ανάγνωσής της, εφόσον η τιμή της πρέπει να αλλάζει όσο το δυνατόν γρηγορότερα για να ληφθεί ένας κύκλος 3904 μετρήσεων σε ένα λογικό χρονικό διάστημα. Τα πράγματα είναι ακόμα πιο απαιτητικά εάν επιδιώκεται απεικόνιση πραγματικού χρόνου (real-time imaging) που προϋποθέτει την ταχύτητα, σε μόνο μερικά ms ολοκλήρωση κάθε κύκλου μετρήσεων. Ο atmega328pu απαιτεί τουλάχιστον 100μs για την ανάγνωση μιας αναλογικής της εισόδου, και αυτό προϋποθέτει ότι ήδη η τιμή που μετράται θα πρέπει να έχει περιέλθει σε μια μόνιμη κατάσταση. Προστιθεμένων και των χρόνων ανοιγοκλεισίματος των διακοπών των πολυπλεκτών, της παραγωγής και διάδοσης των ψηφιακών σημάτων καθώς και το χρόνο απόκρισης των καταχωρητών, αναφερόμαστε πλέον σε αρκετά ms που αντιστοιχούν αντικειμενικά σε κάθε μέτρηση. Άλλο ένα σημαντικό εμπόδιο που δεν υπερβαίνει ο atmega 328pu, αποτελεί η ελαττωμένη ακρίβεια μέτρησης, καθώς ο adc του είναι αρκετά χαμηλής ανάλυσης για τα δεδομένα και της απαιτήσεις της παρούσας εργασίας (10bit, δηλαδή 1024 κβαντισμένα επίπεδα τάσεων από 0 ως 5Volts). Δεδομένου ότι οι εξεταζόμενες διαφορικές τάσεις εξόδου (η διαφορά τους) θα είναι μόλις μερικά mV (ακόμα και με ενίσχυση του σταδίου εξόδου, η οποία όμως προσθέτει θόρυβο), η διάταξη χρειάζεται έναν analog to digital converter με αρκετά μεγαλύτερη ανάλυση.

Οι παραπάνω προϋποθέσεις δεν είναι δυνατό να ικανοποιηθούν από κάποιο απλό στην υλοποίηση και τον προγραμματισμό του AVR, που σημαίνει ότι απαιτείται είτε ξεχωριστός analog to digital converter, μια λύση ακριβή και ασύμβατη με την παρούσα διάταξη, είτε μια αναπτυξιακή πλακέτα που να τις ικανοποιεί. Η απλούστερη λύση, σε πρώιμο πάντα στάδιο όμως, είναι ο προγραμματισμός με arduino due. Το arduino due αποτελεί τη μοναδική αναπτυξιακή πλακέτα arduino που διαθέτει ARM μικροελεγκτή υψηλών δυνατοτήτων αντί ενός απλού 8bit AVR που

διαθέτουν οι υπόλοιπες. Ο ARM (ATSAM3X8E) αυτός διαθέτει μια πληθώρα ψηφιακών εξόδων (54) εκ των οποίων όμως χρησιμοποιούμε μόνο τις 10, ενώ χρησιμοποιούμε και μια αναλογική είσοδο, που οδηγεί το αναλογικό σήμα εξόδου της διάταξης να διαβαστεί από έναν ενσωματωμένο στον ARM 12bit (4096 επίπεδα) Analog to digital converter. Είναι σημαντικό ωστόσο να σημειωθεί ότι ο ATSAM3X8E τροφοδοτείται όχι στα 5Volts όπως είθισται οι 8bit AVR (σε κατάσταση υψηλής κατανάλωσης) αλλά στα 3.3Volts. Αυτό σημαίνει ότι τα ψηφιακά σήματα εξόδου που προγραμματίζουν τα ολοκληρωμένα των κυκλωμάτων θα είναι και αυτά στα 3.3Volts, κάτι το οποίο δεν εμποδίζει τη λειτουργία τους, αντιθέτως συμβάλλει στη μικρότερη κατανάλωση ρεύματος από τα ολοκληρωμένα αυτά. Φυσικά, και η αναλογική είσοδος θα πρέπει να βρίσκεται μεταξύ 0 και 3.3Volts, που σημαίνει ότι η έξοδος, η οποία με την ενίσχυση που πρόκειται να υποστεί έχει εύρος τάσεων από -15 ως 15Volts, θα πρέπει να κλιμακωθεί στο εύρος εισόδου του ARM, προτού διαβαστεί από τον ADC του, διαφορετικά ο μικροελεγκτής θα μπορούσε να υποστεί σημαντική μόνιμη ζημιά. Ο ADC του ARM εφόσον διαβάζει 4096 επίπεδα, αντιστοιχούν σε $3.3/4096=0.8\text{mV}$ εισόδου στο analog pin του Arduino. ^[37]

Οκώδικας που χρησιμοποιήθηκε, είναι ο ακόλουθος:

```
int i, k, j, CLK[5], m, n, kk;

int MAP[67] = {25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 17, 18, 19, 20,
              21, 22, 23, 24, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8,
              57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 41, 42,
              43, 44, 45, 46, 47, 48, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 25, 26, 27
              };

int DIG1 = 22; int DIG2 = 23; int DIG3 = 24; int DIG4 = 25; int DIG5 = 26;

int DIG6 = 27;

int MEASURE = A0; int A[64][64]; double val;

void setup() {

    // put your setup code here, to run once:

    Serial.begin(115200);

    CLK[1] = 28; CLK[2] = 29; CLK[3] = 30; CLK[4] = 31;
```

```
pinMode(DIG1, OUTPUT);
pinMode(DIG2, OUTPUT);
pinMode(DIG3, OUTPUT);
pinMode(DIG4, OUTPUT);
pinMode(DIG5, OUTPUT);
pinMode(DIG6, OUTPUT);
pinMode(CLK[1], OUTPUT);
pinMode(CLK[2], OUTPUT);
pinMode(CLK[3], OUTPUT);
pinMode(CLK[4], OUTPUT);
pinMode(A0, INPUT);
for (i = 1; i <= 4; i++)
    digitalWrite(CLK[i], LOW);
analogReadResolution(12);
for (i = 0; i <= 63; i++)
{
    for (j = 0; j <= 63; j++)
    {
        A[i][j] = 2048;
    }
}

void MUX(int a, int b) {
    if (b < 16)
    {
```

```
    digitalWrite(DIG5, LOW); digitalWrite(DIG6, LOW);
}
else if (b < 32)
{
    digitalWrite(DIG5, HIGH); digitalWrite(DIG6, LOW);
}
else if (b < 48)
{
    digitalWrite(DIG5, LOW); digitalWrite(DIG6, HIGH);
}
else
{
    digitalWrite(DIG5, HIGH); digitalWrite(DIG6, HIGH);
}
if (b % 16 < 8)
{
    digitalWrite(DIG4, LOW);
}
else
{
    digitalWrite(DIG4, HIGH);
}
if (b % 8 < 4)
{
    digitalWrite(DIG3, LOW);
}
```

```
else
{
    digitalWrite(DIG3, HIGH);
}

if (b % 4 < 2)
{
    digitalWrite(DIG2, LOW);
}

else
{
    digitalWrite(DIG2, HIGH);
}

if (b % 2 < 1)
{
    digitalWrite(DIG1, LOW);
}

else
{
    digitalWrite(DIG1, HIGH);
}

digitalWrite(CLK[a], HIGH);
digitalWrite(CLK[a], LOW);
}

void Measurement()
{
```

```
delay(1);

A[i][(k + 2) % 64] = analogRead(MEASURE);

//Serial.print(i);

//Serial.print(" aaa ");

//Serial.print((k + 2) % 64);

//Serial.print(" aaa ");

//Serial.println(A[i][(k + 2) % 64]);

}

void Printer()

{

for (m = 0; m <= 63; m++)

{

for (n = 0; n <= 63; n++)

{

val = A[m][n];

Serial.print(val);

Serial.print(" ");

if (n == 63)

{

Serial.println("End of line");

}

}

}

if ((m == 64) && (n == 64))

{

Serial.println(" End of cycle");

}
```

```

    delay(5000);

}

}

void loop() {

    // put your main code here, to run repeatedly:

    for (i = 0; i < 64; i++) //s=i+1

    {

        MUX(1, i);

MUX(2, (MAP[i + 1] - 1));

        k = i;

        for (j = 0; j < 61; j++)

        {

            MUX(3, (k + 2) % 64);

            MUX(4, (MAP[(k + 3) % 64] - 1));

            Measurement();

            k++;

        }

        // delay(120000); //2mins 1st pair current inj

    }

    Printer();

}

```

Ουσιαστικά, πρόκειται για την ίδια διαδικασία που ακολουθείται στον προγραμματισμό της πλακέτας μικροελεγκτή Atmega328pu. Οι δυο πρώτοι πολυπλέκτες ρυθμίζονται ώστε να ανοίγουν κάθε φορά τους ακροδέκτες ρεύματος, ενώ οι υπόλοιποι 2 για τους ακροδέκτες μέτρησης, σύμφωνα με το adjacent

measurement protocol. Η υπορουτίνα Measurement() έχει ως βασικό ρόλο το διάβασμα των τιμών εξόδου (που αποτελούν τη διαφορά δυο διαδοχικών τάσεων ηλεκτροδίων), την μαθηματική προσαρμογή τους στην κλίμακα μέτρησης του ADC του atsam3x8e, και φυσικά την προβολή τους στο arduino serial, αλλά σε οργανωμένη μορφή, ώστε να είναι αντιληπτό ποια μέτρηση αντιστοιχεί σε ποιο ζεύγος ηλεκτροδίων και για ποια θέση της πηγής ρεύματος. Με αυτό τον τρόπο, τα δεδομένα μπορούν να συλλεχθούν εύκολα και να μεταφερθούν στο matlab ούτως ώστε να υποστούν την κατάλληλη επεξεργασία και να εξαχθούν οι κατάλληλες απεικονιστικές πληροφορίες.

Η ίδια διαδικασία μέτρησης και απεικόνισης θα μπορούσε να είχε ανατεθεί και στον atmega328pu της προηγούμενης πλακέτας, ωστόσο θα ήτο ιδιαίτερα χρονοβόρα και θα στερούνταν ακριβείας, λόγω της ανεπάρκειας του adc του atmega328. Μια ακόμα εναλλακτική επιλογή θα αποτελούσε η χρήση NI-Daq οργάνου λήψης μετρήσεων υψηλής ακρίβειας, κάτι το οποίο να μεν επιτρέπει τη χρήση σημάτων υψηλής συχνότητας και την ανάγνωση με μεγάλη ακρίβεια, ωστόσο το κόστος τέτοιων οργάνων υπερβαίνει τις μερικές εκατοντάδες ευρώ, και δε θα ήταν δόκιμο να χρησιμοποιηθούν στις πρώτες δοκιμές της διάταξης, ειδικά σε dc ή χαμηλές συχνότητες εισόδου.

10. Αποτελέσματα - σχολιασμός

Σε πρώτο επίπεδο, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί έλεγχος του υλικού (hardware) δηλαδή του συνόλου των κυκλωμάτων που συνδέονται μεταξύ τους στη διάταξη. Βασική προϋπόθεση σωστής λειτουργίας τους είναι εκτός από την απουσία σφαλμάτων υλικού και ο σωστός προγραμματισμός τους. Αρχικά πραγματοποιείται έλεγχος στις εξόδους των 4 πολυπλεκτών μια προς μια, δίνοντας ένα απλό dc σήμα εισόδου (πχ. 5Volt). Ο κάθε πολυπλέκτης προγραμματίζεται είτε από τον AVR 328pu είτε από το arduino due, με τέτοιο τρόπο ώστε το σήμα εισόδου να οδηγείται με τη σειρά στους διακόπτες s1 ως s64. Φυσικά η αλλαγή διακόπτη θα γίνεται με την ανύψωση του αντίστοιχου ρολογιού στον αντίστοιχο καταχωρητή του πολυπλέκτη. Σημαντικός επίσης είναι και ο έλεγχος τυχόν βραχυκυκλωμάτων μεταξύ όλων των διακοπών, καθώς και της αντίστασής τους (συνολικά αναμένουμε σε κάθε πολυπλέκτη 11.5Ω περίπου). Για αυτό το λόγο αυτό, σε κάθε ζεύγος πολυπλεκτών, ανοίγαμε κάθε φορά τον ίδιο διακόπτη και μετράγαμε τη συνολική αντίσταση που παρουσιαζόταν από το D του ενός ως το D του άλλου, (δηλαδή μεταξύ των δυο

καναλιών εισόδων τους). Αυτή ήταν για κάθε διακόπτη τους περίπου 22-22.5Ω, δηλαδή ακριβώς το διπλάσιο της τιμής των 11.5Ω, κάτι αναμενόμενο εφόσον το ρεύμα μέτρησης διασχίζει δυο πολυπλέκτες 64x1 κάθε φορά. Αντιστοίχως, για τα βραχυκυκλώματα, για κάθε πιθανό ζεύγος ανοίγαμε το διακόπτη του ενός και τον επόμενο διακόπτη του άλλου, και μετρούσαμε με πολύμετρο αντίσταση. Η αντίσταση αυτή, όπως αναμενόταν, έτεινε προς αρκετά ΜΩ, σχεδόν ανοιχτοκύκλωμα.

Πέρα από τους πολυπλέκτες, πραγματοποιήθηκε έλεγχος της πλακέτας πηγής ρεύματος/σταδίου εξόδου, με τοποθέτηση κατάλληλων αντιστάσεων στους ακροδέκτες πηγής ρεύματος και instrumentation amplifier, τους οποίους και ενώσαμε. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι για αύξηση κάθε 1V στην είσοδο της πλακέτας πηγής ρεύματος, το ρεύμα εξόδου αυξάνεται κατά περίπου 100μΑ, όπως υπέδειξε και η προσομοίωση στο spice. Εάν τοποθετήσουμε τον αρνητικό ακροδέκτη ρεύματος (ρεύμα επιστροφής) στη γείωση, τότε το ρεύμα αυτό είναι το μισό, δηλαδή 50μΑ/V. Η μέτρηση αυτή πραγματοποιήθηκε τόσο με αμπερόμετρο, όσο και με την τοποθέτηση κατάλληλης αντίστασης ανάμεσα στους κοινούς ακροδέκτες, μετρώντας την τάση στα άκρα της και εφαρμόζοντας το νόμο του Ohm.

Τέλος, για να δοκιμάσουμε το υλικό (hardware) στο σύνολό του, μετρήσαμε με ειδικό πολύμετρο την πραγματική αντίσταση μεταξύ κάποια ζεύγη ακροδεκτών πάνω στον πλαστικό κουβά, όταν αυτός ήταν γεμάτος με ελαφρώς αλατισμένο νερό (ομοιογενές μοντέλο). Οι αντιστάσεις μεταξύ τους ήταν περίπου ίσες με τιμές 1.2-1.45kΩ (σημειώνουμε ότι οι αποστάσεις των ακροδεκτών είναι 1.35cm περίπου από κέντρο σε κέντρο). Στη συνέχεια προγραμματίσαμε το κύκλωμα με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε οι πολυπλέκτες ρεύματος να μεταφέρουν το προερχόμενο από την πηγή ρεύμα στους ακροδέκτες αυτούς, σταθερά για κάποιο χρονικό διάστημα (χρήση συνάρτησης delay). Η είσοδος του κυκλώματος της πηγής ρεύματος ορίστηκε στο 1V, που σημαίνει ότι (με τοποθέτηση γείωσης στον αρνητικό ακροδέκτη ρεύματος) αναμένουμε ρεύμα εντάσεως 50μΑ. Με ειδικό βολτόμετρο μετρούσαμε τις τάσεις μεταξύ αυτών των ακροδεκτών (η μέτρηση των τάσεων από τους ακροδέκτες της πηγής ρεύματος δεν ορίζεται στο adjacent protocol καθώς οι τάσεις αυτές είναι πολύ σημαντικά υψηλότερες από τις μετρούμενες τάσεις στα υπόλοιπα ζεύγη με αποτέλεσμα να βρισκόμασταν συνέχεια στον κορεσμό). Οι τάσεις αυτές κυμάνθηκαν από 55-65mV, ενώ αυξάνονταν γραμμικά με γραμμική αύξηση της τάσης εισόδου. Ο νόμος του Ohm δίνει $1.25k\Omega/65mV=52.5\mu A$, που συμπίπτει με την ορισθείσα τιμή

των 50 μ A, ενώ η παρουσία ελαφρώς μικρότερων τιμών τάσεων που δίνει από νόμο του Ohm μικρότερα (όχι σημαντικά όμως) ρεύματα, σημαίνει ότι ένα μικρό μέρος του ρεύματος εισόδου εκχύεται (ανομοιόμορφα) σε γειτονικά ηλεκτρόδια με αποτέλεσμα παρουσία θορύβου στις αναμενόμενες μετρήσεις. Με κατάλληλο αντιστασιόμετρο επίσης μετρήσαμε την αντίσταση του κάθε ακροδέκτη πάνω στον κουβά με τον ακροδέκτη εισόδου του αντίστοιχου πολυπλέκτη ρεύματος. Οι αντιστάσεις αυτές βρέθηκαν 8.5-11.5 Ω , τιμές εντελώς αναμενόμενες, και σύμφωνες με τις αντιστάσεις διακοπών που ορίζονται στο datasheet των πολυπλεκτών. Αυτό υποδεικνύει ότι έχουν ανοίξει κάθε φορά οι κατάλληλοι διακόπτες των πολυπλεκτών, σύμφωνα με τον τρόπο με τον οποίο προγραμματίζονται.

Εκτός από αυτό, όμως πρέπει να ελέγχεται και η εγκυρότητα των μετρήσεων που λαμβάνονται. Για το σκοπό αυτό, εκτελέσαμε το πρόγραμμα με σκόπιμες καθυστερήσεις για συγκεκριμένες θέσεις πηγής ρεύματος και τάσης μέτρησης. Με ψηφιακό βολτόμετρο, διαπιστώσαμε ότι η ενδεικνυόμενη τάση ήταν σχεδόν ίδια με αυτή που "εκτύπωνε" ο arduino serial κάθε φορά.

Πλέον το επόμενο βήμα αποτελεί η λήψη ενός πλήρους σετ μετρήσεων, σε ομοιογενές δείγμα, δηλαδή σε κουβά γεμάτο με νερό πάνω από το επίπεδο του δακτυλίου των 64 ηλεκτροδίων, και σε ανομοιογενές δείγμα, δηλαδή δείγμα με διάφορα αντικείμενα μέσα. Εδώ πρέπει να τονιστεί η ιδιαίτερη σημασία της λήψης διαφορικών μετρήσεων και όχι μεταξύ ηλεκτροδίου και γείωσης. Η τεχνική αυτή είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη σε βιοϊατρικές και μη εφαρμογές και βασικός στόχος της αποτελεί η εξάλειψη θορύβων και φυσικά η ενίσχυση του σήματος σε κατάλληλα για μέτρηση επίπεδα.

Στην παρούσα εργασία λήφθηκαν μόνο dc μετρήσεις, δεδομένης της δυσκολίας που απαιτεί η λήψη πολλαπλών ac μετρήσεων σε μικρό χρονικό διάστημα. Η dcμέτρηση είναι πολύ πιο εύκολο να διαβαστεί από έναν analog to digital converter καθώς απαιτείται απλά η ανάγνωση μιας σταθερής τιμής με μηδενική συχνότητα εναλλαγής. Αντίθετα, η ανάγνωση ac τιμής απαιτεί αρκετά υψηλή συχνότητα ανάγνωσης και η απαιτητικότητα αυτή αυξάνεται όχι μόνο με το ρυθμό εναλλαγής των σημάτων από τους πολυπλέκτες αλλά και με τη συχνότητα του ίδιου του σήματος. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται ένας υψηλών επιδόσεων adc, με υψηλό δείκτη δειγματοληψίας (sampling rate), ο οποίος να ικανοποιεί τη συνθήκη Nyquist, δηλαδή να είναι τουλάχιστον διπλάσιος της συχνότητας του σήματος που δειγματοληπτείται

και ένας μικροελεγκτής με υψηλή σχετικά συχνότητα ρολογιού για τη λήψη ac μετρήσεων στη συγκεκριμένη διάταξη, σε κάτι το οποίο ένας απλός 8 bit AVR θα μπορούσε να αποβεί αρκετά προβληματικός και αργός.

Από την άλλη πλευρά, τα dc σήματα, όταν χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους διατάξεις, δεν μπορούν να δώσουν αποτελέσματα με τέτοιο βαθμό αξιοπιστίας έτσι ώστε να είναι δυνατή η άμεση ανακατασκευή τομογραφικής εικόνας εκ των αποτελεσμάτων. Οι βασικοί λόγοι που συμβαίνει αυτό είναι οι ακόλουθοι:

- Η διέλευση dc ρευμάτων από ασταθούς και μη γραμμικού χαρακτήρα αγωγιμότητες, όπως είναι το νερό έστω με υψηλό βαθμό αλατότητας, είτε αυτό περιέχει κάποια αντικείμενα μέσα είτε όχι, δεν είναι απαραίτητα ομοιόμορφη, και εξαρτάται από αρκετούς ηλεκτρικούς και υλικούς παράγοντες που είναι παρόντες στη διάταξη (περιεκτικότητα, πυκνότητα περιεχομένων, τυχόντα φορτία κλπ).
- Η παροχή dc διέγερσης στη διάταξη δεν αφήνει τα περιθώρια ανίχνευσης χωρητικών και επαγωγικών συμπεριφορών της, πέρα από τις καθαρά ωμικές κατανομές που παρουσιάζονται.
- Ένας πολύ βασικός λόγος για τον οποίο συνίσταται η αποφυγή χρήσης dc ρεύματος σε τέτοιες διατάξεις αποτελεί η ήδη ύπαρξη στατικών φορτίων εντός αυτής. Τα στατικά αυτά φορτία είναι ανομοιόμορφα κατανεμημένα στη διάταξη και αλλάζουν διαρκώς ανάλογα με τις φυσικές και ηλεκτρικές ιδιότητες του περιεχομένου της. Δημιουργούν δε αστάθμητα και ανεπιθύμητα offset στις μετρήσεις, αρκετές φορές σε τέτοιο βαθμό ούτως ώστε να είναι αδύνατη η εξαγωγή ασφαλούς συμπεράσματος για τις πραγματικές ιδιότητες του εξεταζόμενου περιεχομένου, καθώς η συνολική ανακατασκευασθείσα εικόνα αλλοιώνεται με τις στατικές συνιστώσες που παρουσιάζονται. Η χρήση ωστόσο ασημάτων μπορεί να εξαλείψει σε σημαντικό βαθμό αυτό το πρόβλημα, καθώς θα μετρώνται κάθε φορά οι peak to peak μεταβολές του εναλλασσόμενου σήματος εξόδου, με απαλοιφή των οιονδήποτε dc offsets που οφείλονται σε αναπτυσσόμενα ηλεκτροστατικά πεδία τόσο στα σύνορα όσο και στο εσωτερικό της διάταξης. Το αναμενόμενο τότε αποτέλεσμα θα είναι η ανακατασκευή μιας αρκετά ποιοτικότερης εικόνας από την οποία θα είναι

πράγματι προφανής η δομή του περιεχομένου της εξεταζόμενης πειραματικής διάταξης.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας ωστόσο εκπονήθηκαν μόνο δεμετρήσεις, λόγω της ιδιαίτερης πολυπλοκότητας που παρουσιάζει το ζήτημα της συλλογής μετρήσεων από εναλλασσόμενα σήματα. Γενικά, θεωρώντας ότι απουσιάζουν στατικά φορτία από τη διάταξη, η αναμενόμενη συμπεριφορά των σημάτων εξόδου είναι η ακόλουθη: για κάθε ζεύγος γειτονικών ηλεκτροδίων, όταν τα ηλεκτρόδια της πηγής ρεύματος πλησιάζουν από την πλευρά του ανώτερου δυναμικού τους, η τάση των ηλεκτροδίων μέτρησης τάσης αυξάνεται σημαντικά. Αντίθετα όταν "περάσει" η πηγή ρεύματος από το ζεύγος αυτό, και γειτνιάσει με τον ακροδέκτη χαμηλού δυναμικού της πηγής ρεύματος, η τιμή της τάσης μέτρησης περνάει σε αρνητικά επίπεδα. Όσο απομακρύνεται η πηγή ρεύματος από το ζεύγος μέτρησης τάσης, τόσο η τάση των ηλεκτροδίων μέτρησης τείνει να φτάσει στο 0, και για αρκετά απομακρυσμένες θέσεις η τιμή αυτή αναμένουμε να παραμείνει πράγματι στο 0. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στο γεγονός ότι το ρεύμα που διοχετεύει η πηγή ρεύματος στο πεδίο, διασπείρεται σχεδόν ακτινικά από τη θέση της πηγής, με αποτέλεσμα η πυκνότητά του να μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από την πηγή. ^{[38], [39], [40]}

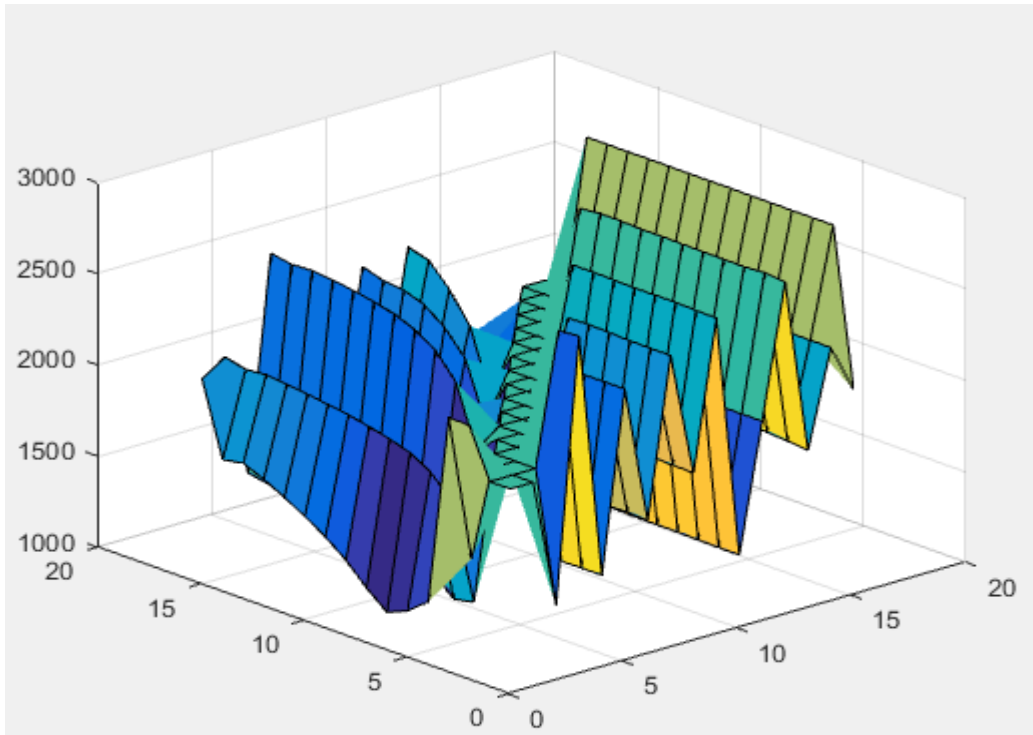
Παρόλα αυτά λόγω των στατικών φορτίων της διάταξης, οι δεαυτές μετρήσεις έχουν ένα προβληματικό χαρακτηριστικό. Αντί λοιπόν για απομακρυσμένες περιοχές από την πηγή ρεύματος οι μετρήσεις να τείνουν στο 0, αυτές βρίσκονται απλά σε μια μόνιμη κατάσταση μιας ακαθόριστης σταθερής τάσης. Παρόλα αυτά όταν "πλησιάζει" η πηγή ρεύματος στο ζεύγος μέτρησης οι τάσεις παρουσιάζουν μια αναμενόμενη αυξομείωση, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Αυτό σημαίνει πως πράγματι, σε ένα ομοιογενές δείγμα, η πηγή ρεύματος διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό του επιπέδου τάσης μέτρησης, ωστόσο λόγω στατικών φορτίων κυρίως, υπάρχουν ανεπιθύμητες συνιστώσες τάσης που επηρεάζουν σημαντικά τα επίπεδα των τιμών που μετρώνται.

Ο αλγόριθμος ανακατασκευής εικόνας, ακολουθεί το πρωτόκολλο παρακείμενης στρατηγικής που εφαρμόστηκε εδώ και κύρια ιδέα του αποτελεί σε πρώτη φάση η κατασκευή ενός παραμετρικού μοντέλου, με βάση τα χαρακτηριστικά της ίδιας της διάταξης (αριθμός ηλεκτροδίων, επίπεδα μέτρησης, αλγόριθμος μέτρησης). Στη συνέχεια λαμβάνονται οι μετρήσεις με συγκεκριμένη διάταξη (πίνακας διαστάσεων αριθμός ηλεκτροδίων/αριθμός ηλεκτροδίων με ταξινόμηση σε αύξουσα σειρά, με υπολειπόμενες τις μετρήσεις στους ακροδέκτες της εκάστοτε πηγής ρεύματος), και με

βάση τις τάσεις αυτές (συννοριακές τιμές της ηλεκτρικής πεδιακής διάταξης) επιλύεται αριθμητικά το αντίστροφο μοντέλο ώστε να βρεθεί η κατανομή των αγωγιμοτήτων στο χώρο. Οι συναρτήσεις που επιτελούν τις λειτουργίες αυτές βρίσκονται στο πακέτο λογισμικού `eidors` που είναι συμβατό με όλες τις πρόσφατες εκδόσεις του προγράμματος `matlab` και ορισμένες του `GNU octave`.

Οι μετρήσεις λήφθηκαν με τη χρήση του `serial` του `arduino due`. Έγιναν μετρήσεις τόσο με 16 όσο και με 64 ηλεκτρόδια, αρχικά σε ομοιογενές δείγμα "αναφοράς" (νερό ελαφρώς αλατισμένο) του οποίου οι τιμές κανονικοποιήθηκαν ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι παρασιτικές μετρήσεις καθώς και η επίδραση του ηλεκτροστατικού πεδίου. Να σημειωθεί ότι η μέτρηση πραγματοποιείται σε κλίμακα 0-4096 που αντιστοιχίζεται στο διάστημα $[0, 3.3V]$, το οποίο με τη σειρά του αντιστοιχίζεται στο διάστημα $[-15, 15V]$ μέτρησης, για 100 φορές ενισχυμένο διαφορικό σήμα. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε δείγμα με 1 μη αγωγίμο άδειο γυάλινο μπουκάλι στο δοχείο, καθώς και με 2 μη αγωγίμα μπουκάλια. Σημειώνεται ότι για να πραγματοποιηθούν μετρήσεις με 16 ηλεκτρόδια, χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος κώδικας με κατάλληλες τροποποιήσεις στο βήμα των επαναλήψεων και στις συνθήκες των επαναληπτικών δομών. Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν είναι τα ακόλουθα (παρατίθενται οι 3διάστατες γραφικές παραστάσεις και στη συνέχεια οι ανακατασκευασθείσες εικόνες με βάση τους αλγορίθμους του πακέτου `eidors` καθώς και τις κανονικοποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν ενδιάμεσα):

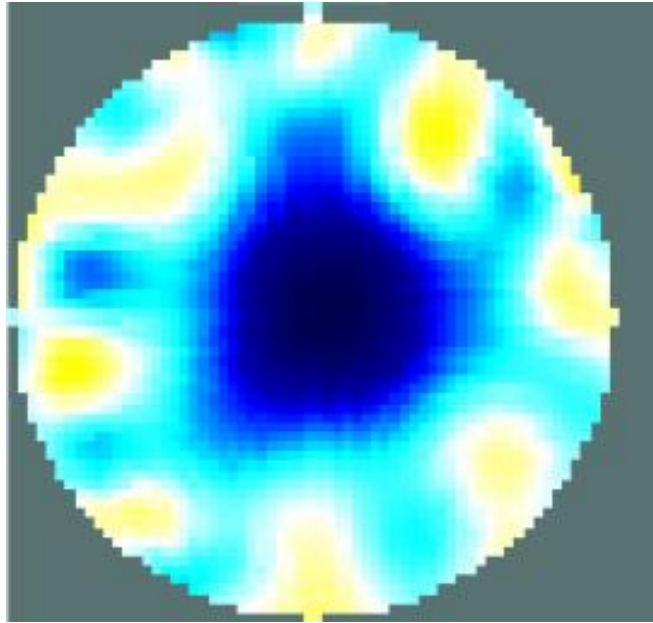
- Ομοιογενές δείγμα με 16 ηλεκτρόδια



Διάγραμμα 9:Κατανομή τιμών πίνακα μετρήσεων (16x16) σε ομοιογενές δείγμα 16 ηλεκτροδίων

Παρατήρηση: Η κύρια, μηδενισμένη διαγώνιος αντιστοιχεί στις θέσεις των μετρήσεων επί των ακροδεκτών της εκάστοτε πηγής ρεύματος. Οι θέσεις αυτές μηδενίστηκαν, καθώς δεν λαμβάνονται μετρήσεις από τους ακροδέκτες αυτούς. Παρατηρούμε κατά τα άλλα, μια απότομη μείωση, ή αύξηση αντίστοιχα από την κάθε πλευρά της διαγωνίου αυτής, που επαληθεύει την αναμενόμενη συμπεριφορά που περιγράφηκε προηγουμένως. Όσον αφορά στις τιμές που παρουσιάζονται στις τάσεις, όταν η πηγή ρεύματος απομακρύνεται, αυτή τείνει σε σταθερή τιμή, που ιδανικά θα θέλαμε να βρίσκεται στο μηδέν, ωστόσο αυτό όπως προβλέψαμε δε συμβαίνει, πιθανότατα για τους λόγους που περιγράφηκαν στις προηγούμενες σελίδες. Η χρήση ενός κατάλληλου adc για λήψη ac μετρήσεων θα επιλύσει αυτό το πρόβλημα σε σημαντικό βαθμό. Να τονιστεί επίσης ότι σε περίπτωση μη ομοιογενούς δείγματος, η συμπεριφορά αυτή αλλάζει τοπικά και εξαρτάται από τη γεωμετρία και την αντίσταση του περιεχομένου.

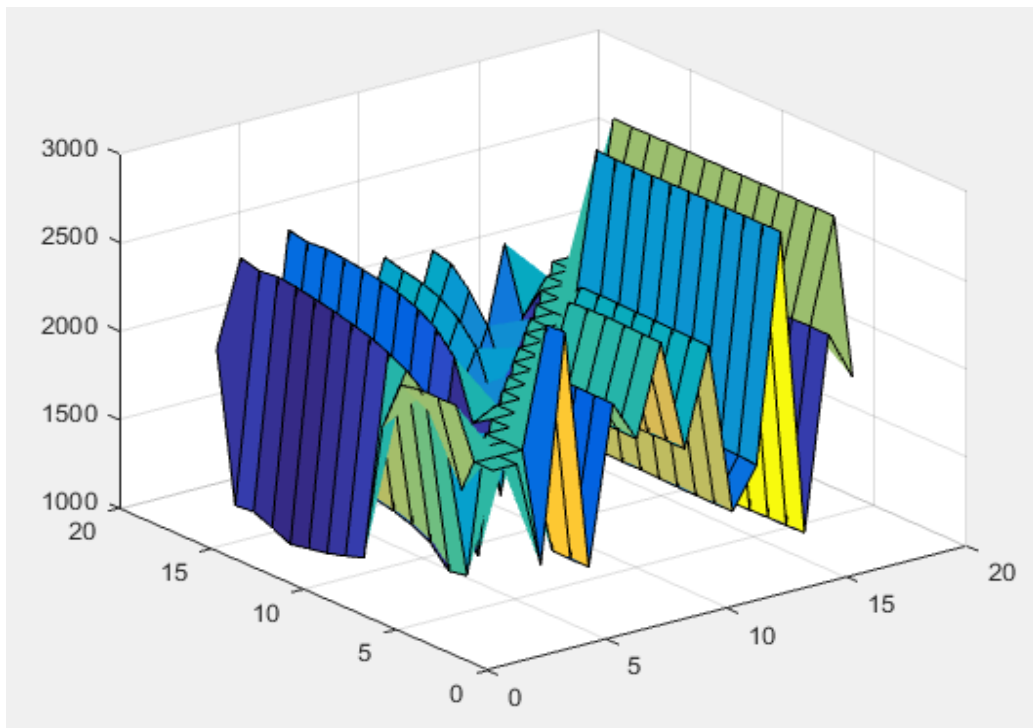
Με κατάλληλη κανονικοποίηση, η δισδιάστατη ανακατασκευασμένη εικόνα είναι η ακόλουθη:



Εικόνα 23: Ανακατασκευασμένη εικόνα για ομοιογενές δοχείο και 16 ηλεκτρόδια μέτρησης

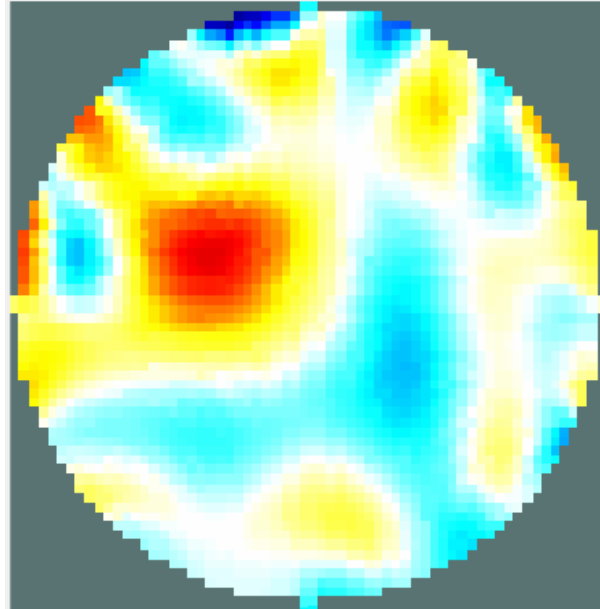
Σημειώνεται ότι μπλε χρώμα υποδηλώνει χαμηλότερες αντιστάσεις, δηλαδή υψηλότερες αγωγιμότητες, ενώ κόκκινο χρώμα υψηλότερες αντιστάσεις, δηλαδή χαμηλότερες αγωγιμότητες.

- Δείγμα με 16 ηλεκτρόδια και περιεχόμενο ένα γυάλινο μπουκάλι



Διάγραμμα 10: Κατανομή τιμών πίνακα μετρήσεων (16x16) σε δείγμα μέτρησης 16 ηλεκτροδίων με περιεχόμενο ένα γυάλινο μπουκάλι

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα 9 και 10, παρατηρούμε τοπικές αλλά σημαντικές διαφορές στα επίπεδα μετρούμενων τάσεων, που υποδεικνύουν ουσιαστικά την αλλαγή της κατανομής των αγωγιμοτήτων στο χώρο μέτρησης, λόγω της παρουσίας του περιεχομένου αντικειμένου (γυάλινο μπουκάλι). Αναμένουμε, προφανώς και την ανάλογη αλλαγή της εικόνας.

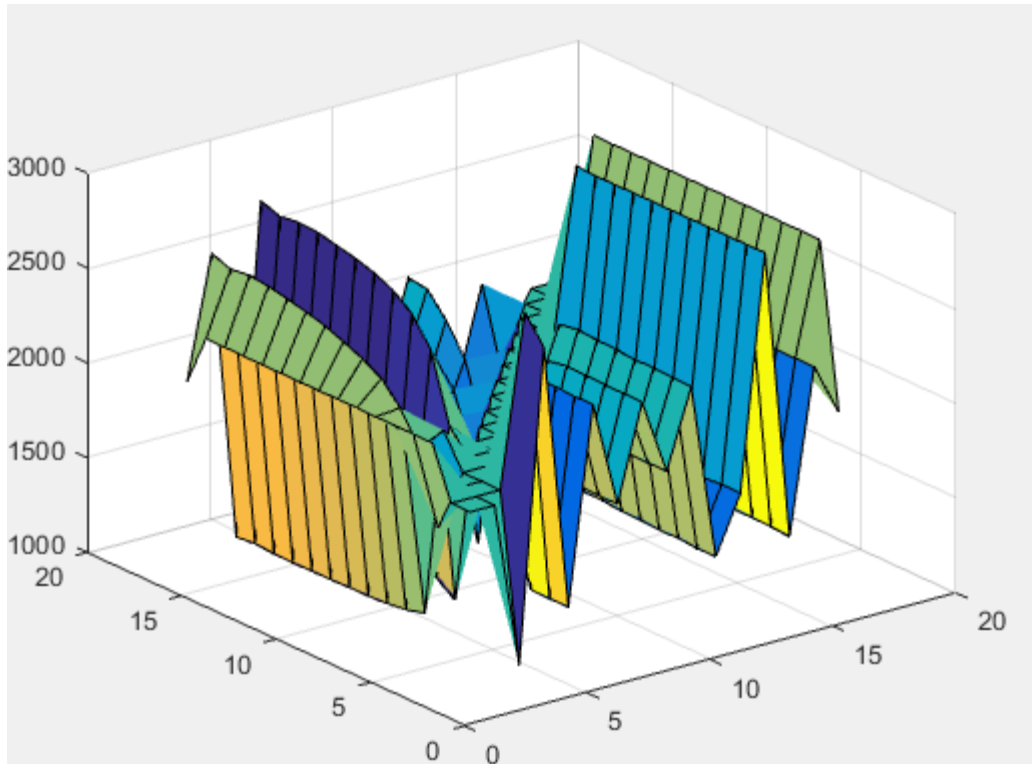


Εικόνα 24: Ανακατασκευασμένη εικόνα για δοχείο με περιεχόμενο γυάλινο μπουκάλι και 16 ηλεκτρόδια μέτρησης

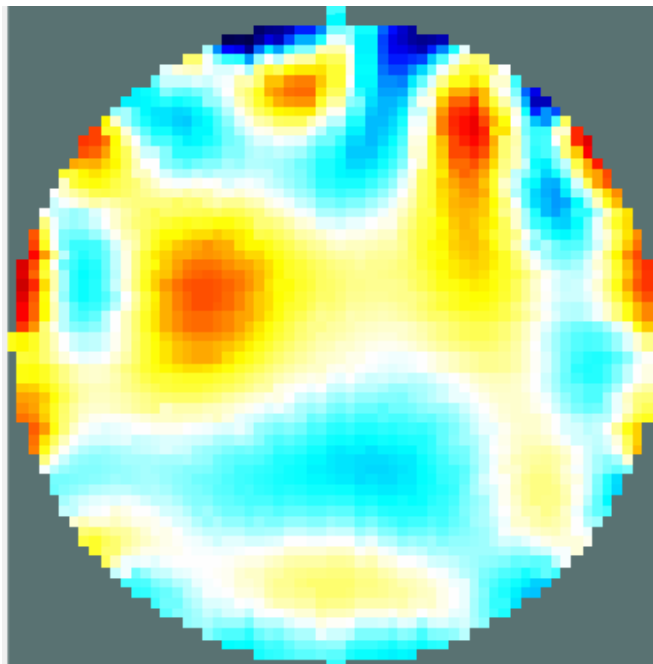
Παρατηρώντας την παραπάνω ανακατασκευασμένη εικόνα, εύκολα μπορούμε να διακρίνουμε την επίδραση του γυάλινου μπουκαλιού στην κατανομή των αγωγιμοτήτων της εξεταζόμενης περιοχής (εμφάνιση κόκκινης μεγάλης κηλίδας). Ιδανικά, το υπόλοιπο περιεχόμενο του δοχείου θα έπρεπε να μην εμφανίζει αυτή την ανομοιογένεια, ωστόσο αυτό δε συμβαίνει λόγω τόσο σφαλμάτων στις μετρήσεις και ατέλειες των αλγορίθμων που χρησιμοποιήθηκαν, όσο και των λόγων που αναφέρθηκαν ότι επηρεάζουν αρνητικά τις dc μετρήσεις.

- Δείγμα με 16 ηλεκτρόδια και περιεχόμενο 2 γυάλινα μπουκάλια

Οι μετρήσεις και η ανακατασκευασμένη εικόνα εικονίζονται ακολούθως:



Διάγραμμα 11: Κατανομή τιμών πίνακα μετρήσεων (16x16) σε δείγμα μέτρησης 16 ηλεκτροδίων με περιεχόμενα δυο γυάλινα μπουκάλια



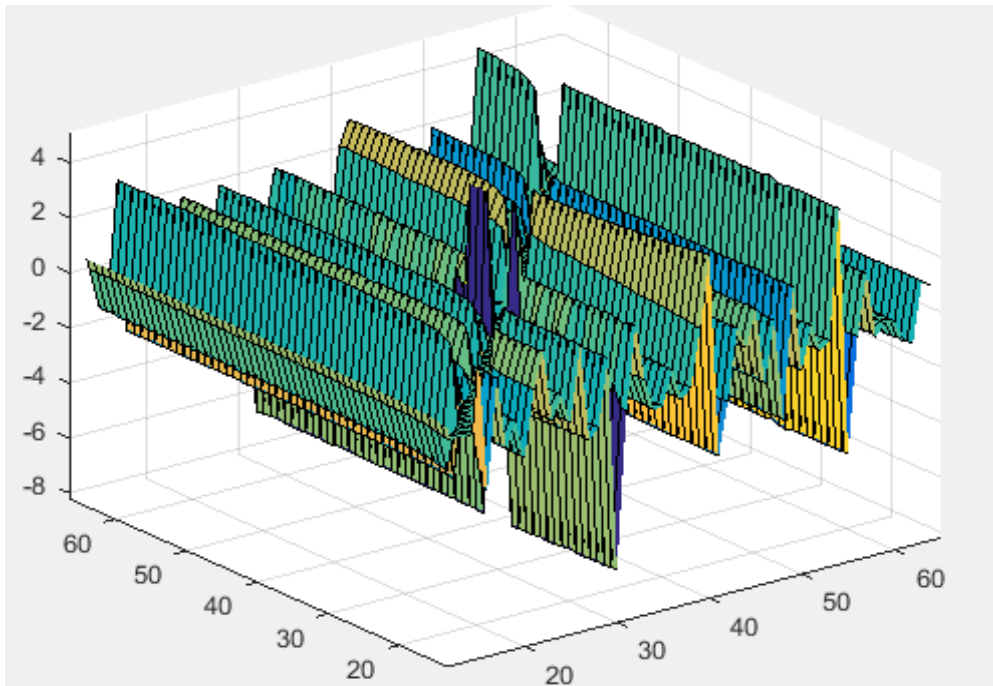
Εικόνα 25: Ανακατασκευασμένη εικόνα για δοχείο με περιεχόμενα δυο γυάλινα μπουκάλια και 16 ηλεκτρόδια μέτρησης

Εδώ υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση τόσο στις μετρήσεις όσο και στην εικόνα. Στην τελευταία, διακρίνονται οι 2 μεγάλες κόκκινες περιοχές στο εσωτερικό της διάταξης που υποδηλώνουν την παρουσία των 2 κενών με αέρα γυάλινων

μπουκαλιών. Η ανάλυση της εικόνας είναι σχετικά χαμηλή λόγω χρήσης 16 μόνο ηλεκτροδίων, ενώ υπάρχουν αρκετές παρασιτικές τάσεις, λόγω στατικών φορτίων και σφαλμάτων μέτρησης και ανακατασκευής.

- Ομοιογενές δείγμα με 64 ηλεκτρόδια

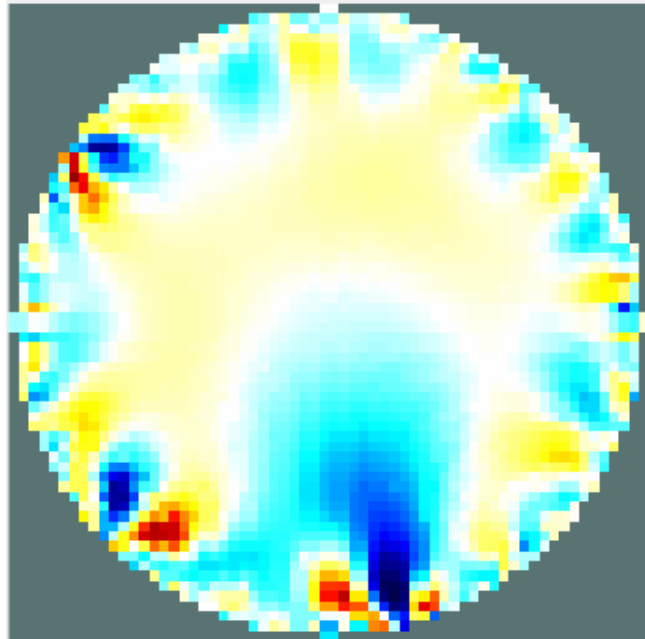
Το σύνολο των μετρήσεων (3904) το οποίο έχει χαρακτηριστική δυσκολία στο να παρασταθεί αριθμητικά σε μορφή πίνακα (64x64 συμπεριλαμβανομένων και των μηδενισμένων τιμών των τάσεων που δεν μετρούνται στους ακροδέκτες της πηγής ρεύματος), μπορεί να παρασταθεί στον 3σδιάστατο χώρο ακολούθως:



Διάγραμμα 12: Κατανομή τιμών πίνακα μετρήσεων (64x64) σε ομοιογενές δείγμα 64 ηλεκτροδίων

Η συμπεριφορά των μετρήσεων αυτών, είναι παρόμοια με αυτή του ομοιογενούς δείγματος που μετρήθηκε με τα 16 ηλεκτρόδια. Για κάθε ζεύγος μέτρησης τάσης, όταν η πηγή ρεύματος πλησιάσει, η μετρούμενη τάση μειώνεται σταδιακά, ενώ όταν απομακρυνθούν οι ακροδέκτες πηγής ρεύματος, τότε αυτή αυξάνεται για να φτάσει στην τιμή "μόνιμης κατάστασης", η οποία απουσία προϋπαρχόντων ηλεκτροστατικών πεδίων θα έπρεπε να τείνει στο μηδέν.

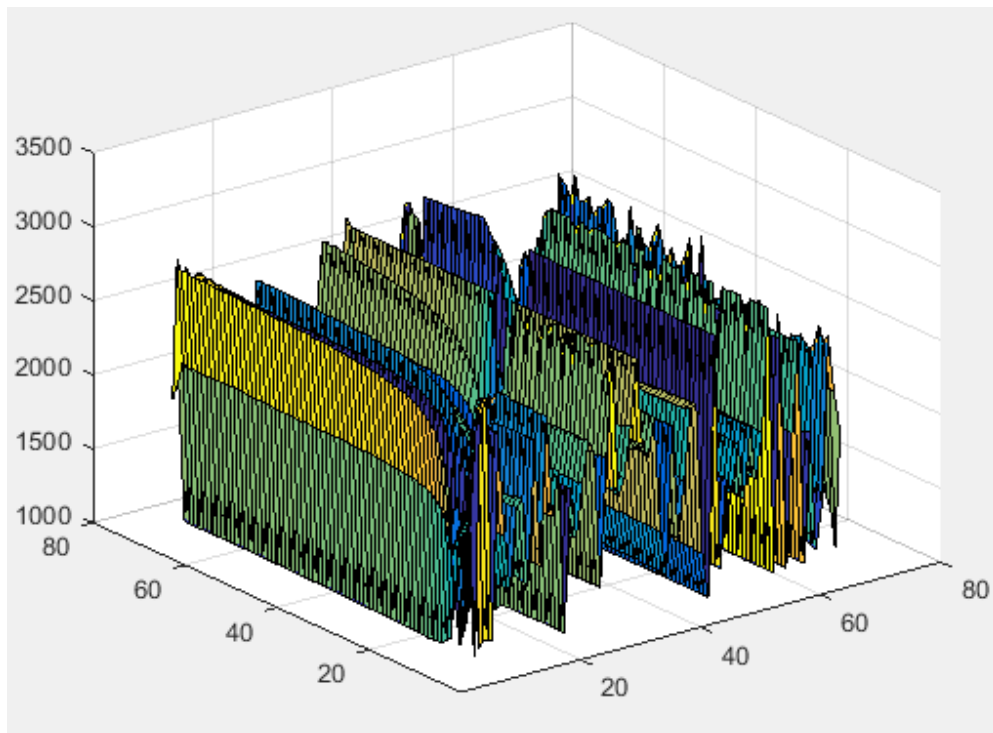
Η ανακατασκευασθείσα εικόνα (κανονικοποιημένη ούτως ώστε να αποτελεί ομοιογενές μοντέλο αναφοράς) είναι η ακόλουθη:



Εικόνα 26: εικόνα για ομοιογενές δοχείο και 64 ηλεκτρόδια μέτρησης

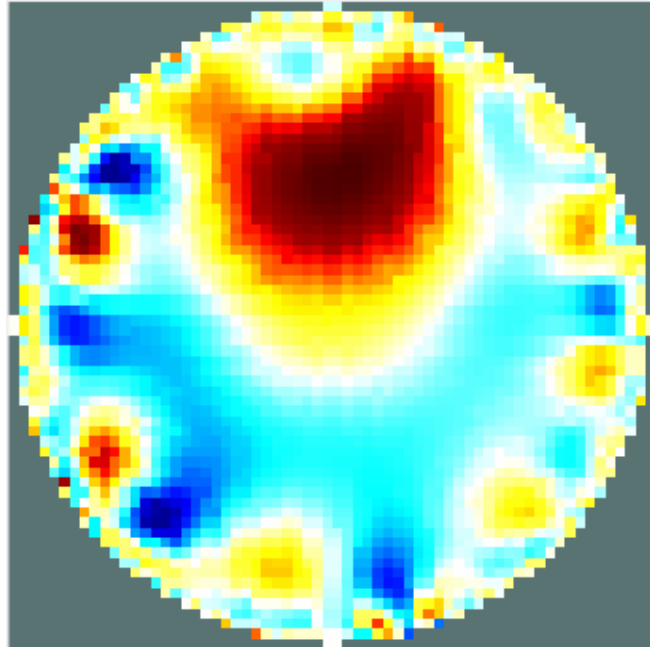
- Δείγμα με 64 ηλεκτρόδια και περιεχόμενο ένα γυάλινο μπουκάλι

Όμοια με προηγούμενως, λάβαμε σειριακά τις μετρήσεις και τις απεικονίσαμε στο παρακάτω διάγραμμα:



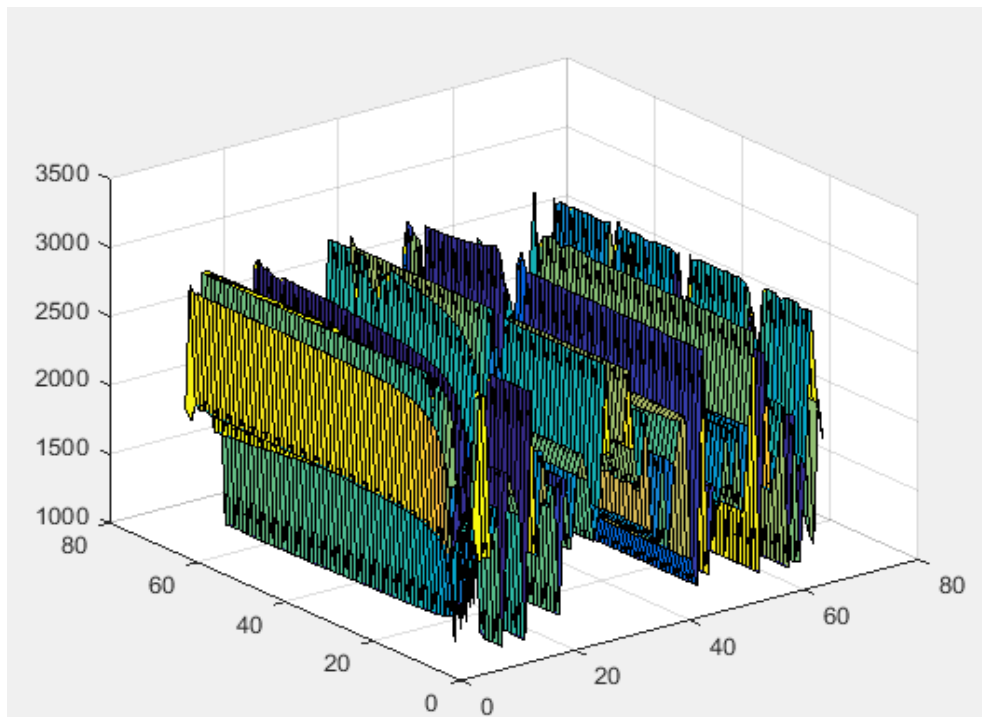
Διάγραμμα 13: Κατανομή τιμών πίνακα μετρήσεων (64x64) σε δείγμα μέτρησης 64 ηλεκτροδίων με περιεχόμενο ένα γυάλινο μπουκάλι

Η απεικόνιση που λήφθηκε από τον αλγόριθμο επεξεργασίας των μετρήσεων είναι η ακόλουθη:

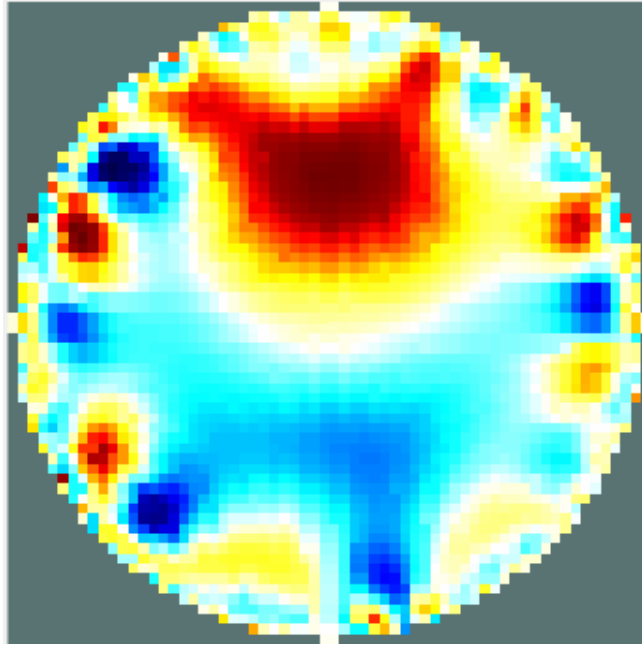


Εικόνα 27: Ανακατασκευασμένη εικόνα για δοχείο με περιεχόμενο γυάλινο μπουκάλι και 64 ηλεκτρόδια μέτρησης

- Δείγμα με 64 ηλεκτρόδια και περιεχόμενα δυο γυάλινα μπουκάλια



Διάγραμμα 14:: Κατανομή τιμών πίνακα μετρήσεων (64x64) σε δείγμα μέτρησης 64 ηλεκτροδίων με περιεχόμενα δυο γυάλινα μπουκάλια



Εικόνα 28: Ανακατασκευασμένη εικόνα για δοχείο με περιεχόμενα δυο γυάλινα μπουκάλια και 64 ηλεκτρόδια μέτρησης

Συγκρίνοντας τις εικόνες αυτές, για 16 και 64 ηλεκτρόδια, παρατηρούμε ότι ναι μεν λαμβάνοντας μετρήσεις με 64 ηλεκτρόδια η ανάλυση θα είναι σαφώς υψηλότερη, ωστόσο ο ανεπιθύμητος θόρυβος από ηλεκτροστατικά πεδία είναι μεγαλύτερος, με αποτέλεσμα το περιεχόμενο να είναι πιο δυσδιάκριτο, και κατά συνέπεια η απεικόνιση ανεπιτυχής. Αυτό αντιμετωπίζεται με τη λήψη μετρήσεων με έκχυση εναλλασσόμενου ρεύματος σε συχνότητες 5kHz-2MHz, που ουσιαστικά είναι το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας της συνολικής διάταξης.

11. Πιθανές επεκτάσεις-δυνατότητες

Όπως οποιαδήποτε ηλεκτρονική διάταξη, έτσι και μια διάταξη ηλεκτρικής τομογραφίας σύνθετης αντίστασης, είναι σημαντικό να είναι όσο το δυνατό πιο ενιαία από άποψη υλικού. Αυτό σημαίνει ότι όλα τα κυκλώματα που κατασκευάστηκαν θα πρέπει να είναι ενσωματωμένα σε μια ενιαία πλακέτα, κάτι το οποίο συντελεί στην ευχρηστία και τη φορητότητα του συστήματος. Ένα άλλο βασικό ζήτημα, το οποίο αναφέρεται ως βασικό πλεονέκτημα της απεικονιστικής αυτής μεθόδου, είναι η εύκολη δυνατότητα μεταφοράς της διάταξης και φυσικά η αυτονομία της, κάτι το οποίο επιβάλλει την ύπαρξη τροφοδοσίας (και) μέσω μπαταρίας, καθώς επίσης και τη δυνατότητα ασύρματης αποστολής δεδομένων (wifi). Όλα αυτά βέβαια προϋποθέτουν ένα ενσωματωμένο σύστημα μικροελεγκτή το οποίο

θα στέλνει τα δεδομένα από τις μετρήσεις τόσο σειριακά (UART) στον Η/Υ μέσω USB όσο και ασύρματα σε οποιαδήποτε συσκευή με δυνατότητα συνδεσιμότητας σε δίκτυο μέσω wifi. Παράλληλα, το σύστημα θα μπορούσε σχετικά εύκολα να επεκταθεί ώστε να συνδέεται με 128 ακόμα και με 256 για ευκρινείς τρισδιάστατες απεικονίσεις (αναβάθμιση πολυπλεκτών από 64 σε 1 σε 128 προς 1 ή 256 προς 1).

Πέρα όμως από το κομμάτι του υλικού, είναι σημαντικό να αναβαθμιστεί και το λογισμικό, έτσι ώστε αφενός να είναι συμβατό με τις υλικές αναβαθμίσεις, και αφετέρου να συμβάλλει στη βελτίωση της ποιότητας των αποτελεσμάτων. Είναι προφανές ότι τα εξεταζόμενα σήματα είναι απαραίτητο να είναι εναλλασσόμενα συχνοτήτων αρκετών δεκάδων kHz, κάτι το οποίο απαιτεί δειγματοληψία των σημάτων εξόδου με αρκετά υψηλό ρυθμό. Κατά συνέπεια, απαιτείται η χρήση ενός ικανού analog to digital converter ο οποίος θα στέλνει σειριακά τα δεδομένα, είτε προς τον Η/Υ είτε προς κάποια φορητή συσκευή. Οι αλγόριθμοι ανακατασκευής εικόνας αποτελούν επίσης ένα κομμάτι το οποίο έχει αρκετό πεδίο έρευνας και ανάπτυξης, με σκοπό την βέλτιστη δυνατή αξιοποίηση των μετρήσεων που λαμβάνονται για καλύτερη απεικόνιση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ Διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών "ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ" Μεταπτυχιακή εργασία του Γεωργίου Ν. Λυμπερόπουλου 2014
- [2] WIDE-BANDWIDTH, HIGH FRAME RATE ELECTRICAL IMPEDANCE TOMOGRAPHY / SPECTROSCOPY *A Code Division Multiplexing (CDM) Approach* A. L. McEwan, D. S. Holde J. Tapson A. van Schaik
- [3] Drager: Electrical Impedance Tomography: The realisation of regional ventilation monitoring 2nd edition Eckhard Teschner Michael Imhoff Steffen Leonhardt
- [4] Electrical Impedance Tomography (EIT) and Its Medical Applications: A Review R. Harikumar, R. Prabu, S. Raghavan International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE) ISSN: 2231-2307, Volume-3, Issue-4, September 2013

- [5] Dry-Contact and Noncontact Biopotential Electrodes: Methodological Review Yu Mike Chi, *Student Member, IEEE*, Tzyy-Ping Jung, *Senior Member, IEEE*, and Gert Cauwenberghs, *Senior Member, IEEE*
- [6] Research Electrical impedance tomography system: an open access circuit design Manuchehr Soleimani*
- [7] RESEARCH ARTICLE Electrical Impedance Tomography of Electrolysis Arie Meir^{1*}, Boris Rubinsky² Biophysics Graduate Program, University of California, Berkeley, California, United States of America,² Department of Mechanical Engineering, University of California, Berkeley, California, United States of America 2015
- [8] A FPGA-Based Broadband EIT System for Complex Bioimpedance Measurements—Design and Performance Estimation Roman Kusche^{1,2,*}, Ankit Malhotra^{1,3}, Martin Ryschka^{1,*}, Gunther Ardel⁴, Paula Klimach^{1,2} and Steffen Kaufmann^{1,3}
- [9] Analog Devices MT-088 TUTORIAL Analog Switches and Multiplexers Basics
- [10] Analog Devices ADG1404 datasheet
- [11] Analog Devices ADG1406 datasheet
- [12] Texas Instruments SN54LV574A, SN74LV574A OCTAL EDGE-TRIGGERED
- [13] SimmTester.com Common DIMM Memory Form Factors
- [14] JAE Electronics DIMM Connectors DDR3 SDRAM, REVERSE 204P CONNECTOR, 5.2mm datasheet
- [15] www.futureelectronics.com What is a Microcontroller?
- [16] The AVR microcontroller and Embedded system using assembly and c, Muhammad Ali Mazidi, Sarmad Naimi, Sepehr Naimi
- [17] <https://cs.stanford.edu/people/eroberts/courses/soco/projects/risc/riscisc/>
- [18] <http://www.learningaboutelectronics.com/Articles/Microcontroller-memory-types.php>
- [19] maxembedded.com AVR I/O PORTS
- [20] Hackaday development boards by James Munns

- [21] Sparkfun Serial Peripheral Interface (SPI)
- [22] Serial Peripheral Interface Bus
- [23]<http://whatis.techtarget.com/definition/UART-Universal-Asynchronous-Receiver-Transmitter>
- [24] AVR GCC Tutorial (Win AVR) Early before alpha Version 1.00 By takashi
- [25] Atmel ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P ATMEL 8-BIT MICROCONTROLLER WITH 4/8/16/32KBYTES IN-SYSTEM PROGRAMMABLE FLASH DATASHEET
- [26] AVR-Pocket-Programmer-v15 datasheet
- [27] Kyocera Crystal Units Surface Mount Type CX3225SB datasheet
- [28] Texas Instruments LM2940x 1-A Low Dropout Regulator datasheet
- [29] Texas Instruments LM2990 Negative Low-Dropout Regulator datasheet
- [30] Recom DC to DC Converter R1S_R1D datasheet
- [31] www.researchgate.net A Low Cost Electrical Impedance Tomography (EIT) for Pulmonary Disease Modelling and Diagnosis Natalie Walker
- [32] Analog Devices Precision, Very Low Noise, Low Input Bias Current Operational Amplifiers AD8671/AD8672/AD8674 Datasheet
- [33] Texas Instruments THS413x High-Speed, Low-Noise, Fully-Differential I/O Amplifiers Datasheet
- [34] ELECTRICAL IMPEDANCE TOMOGRAPHY Methods, History and Applications Edited by David S Holder Department of Medical Physics and Bioengineering University College London London
- [35] Analog Devices 3 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$, Low Power Instrumentation Amplifier AD8421 Datasheet
- [36] Signal Integrity Issues and Printed Circuit Board Design, Douglas Books, 2003
- [37] Arduino.cc- Arduino Due specifications
- [38] Electrical impedance tomography: algorithms and applications Chuan Li Yang
A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy University of Bath
Department of Electrical and Electronic Engineering September 2014
- [39] LabVIEW based Automatic Data acquisition system for Electrical Impedance Tomography Vidya Sarode¹, Hema Patil², Alice N. Cheeran³ *Research Scholar*,

*Xavier Institute of Engineering, Mumbai, India.2&3Electrical Department, VJTI,
Mumbai, India.*

[40] EIDORS: Electrical Impedance Tomography and Diffuse Optical Tomography Reconstruction Software EIDORS fwd_models Creating an FEM and solving a 3D forward problem