



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Υλοποίηση συστήματος ελέγχου παροχής οξυγόνου μέσω ανίχνευσης της επιδερμικής επαφής μάσκας προσώπου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΠΑΝΙΚΗΤΑΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

Επιβλέπων: Δημήτριος Κουτσούρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Υλοποίηση συστήματος ελέγχου παροχής
οξυγόνου μέσω ανίχνευσης της επιδερμικής
επαφής μάσκας προσώπου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΠΑΝΙΚΗΤΑΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

Επιβλέπων: Δημήτριος Κουτσούρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή την 4^η Ιουλίου 2017

.....
Δ. Κουτσούρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Π. Τσανάκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γ. Ματσόπουλος
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2017

.....

Παπανικήτας Αθανάσιος

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

Copyright © Παπανικήτας Αθανάσιος

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 ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια των σπουδών μου στη σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Κουτσούρη Δημητρίου και την καθοδήγηση των Τουμπανιάρη Πέτρου και Κατρακάζα Παναγιώτη του Εργαστηρίου Βιοϊατρικής Τεχνολογίας, τους οποίους και θα ήθελα να ευχαριστήσω για τις συμβουλές και την υπομονή τους.

Επιπλέον, ευχαριστώ όλους τους δικούς μου ανθρώπους, που με στήριξαν και συνεχίζουν να με στηρίζουν στην επίτευξη των στόχων μου, δείχνοντας κατανόηση και παραμένοντας δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία μελετάται η υλοποίηση ενός συστήματος για την αποφυγή ανάφλεξης οξυγόνου κατά τη λήψη οξυγονοθεραπείας, καθώς έχουν σημειωθεί ανάλογα περιστατικά με αποτέλεσμα την πρόκληση εγκαυμάτων ή ακόμη και πυρκαγιών.

Η προσέγγιση που ακολουθείται σχετίζεται με τον έλεγχο επαφής συγκεκριμένων σημείων της μάσκας με το δέρμα του ασθενούς, και ανάλογα επιτρέπεται ή διακόπτεται η ροή του οξυγόνου προς αυτήν. Είναι προφανές ότι η μέθοδος θα αποφέρει και εξοικονόμηση του αποθέματος οξυγόνου σε ορισμένα συστήματα.

Στα σημεία ελέγχου της μάσκας τοποθετήθηκαν ηλεκτρόδια συνδεδεμένα με έναν αισθητήρα ανίχνευσης αφής μέσω χωρητικότητας. Η διαφορά της χωρητικότητας που μετράται στις περιπτώσεις που ένα ηλεκτρόδιο είτε είναι ελεύθερο ή βρίσκεται σε επαφή με το δέρμα δίνει την ικανότητα στο σύστημα να αποφανθεί για την κατάστασή του. Ο συνδυασμός πολλών τέτοιων ηλεκτροδίων, τοποθετημένων σε κατάλληλες θέσεις, φροντίζει για την εκτίμηση της επαφής ή μη, της μάσκας.

Η τεχνολογία ανίχνευσης αφής μέσω χωρητικότητας επιλέχθηκε κυρίως για την ταχύτητα απόκρισης που μπορεί να επιτύχει, λόγος πολύ σημαντικός για ένα σύστημα ασφάλειας. Επίσης, επιτρέπει τη διατήρηση του αναλώσιμου χαρακτήρα της μάσκας και φυσικά είναι συμβατή με την εφαρμογή που αναπτύσσεται.

Ο τελικός έλεγχος γίνεται από έναν μικροελεγκτή προγραμματισμένο έτσι ώστε να ρυθμίζει τις λειτουργίες του αισθητήρα βάσει των επιθυμητών παραμέτρων, να λαμβάνει τα απαραίτητα δεδομένα από αυτόν, και σύμφωνα με τον αλγόριθμο ελέγχου που εκτελεί, να αποφασίζει εάν η μάσκα είναι ασφαλώς τοποθετημένη στο πρόσωπο του ασθενή.

Λέξεις κλειδιά: Οξυγονοθεραπεία, Μάσκα οξυγόνου, Έλεγχος παροχής οξυγόνου, Σύστημα ελέγχου, Ανάφλεξη οξυγόνου, Τεχνολογία ανίχνευσης αφής, Σχεδιασμός και υλοποίηση συστήματος.

Abstract

In the current diploma thesis the development of a system to prevent oxygen ignition when receiving oxygen therapy is studied. Such type of incidents have been constantly recorded, ending up in serious burns or even fire breakouts.

The approach followed in this thesis is to check specific contact points of a mask attached to a patient's skin, with a control system allowing to permit or interrupt the flow of oxygen. It is obvious that the method followed here will also result in savings in the oxygen reserves in several systems.

At the control points of the mask, electrodes were placed, connected to a capacitive touch sensor. The difference in capacity measured when an electrode is either free or in contact with the skin, gives the system the ability to self-decide on its condition. The combination of many similar electrodes and their suitable positioning, ensures the approximation of the mask being or not in contact.

Capacitive touch sensor technology has been chosen primarily for the response times it can achieve, which is a very important factor for such a security system. It also preserves the mask's expendable design and is by all means compatible with the application that is being developed.

The final check is performed by a micro-controller, programmed a) to configure the sensor's functions based on the desired parameters, b) to obtain the necessary data from it, and c) according to the control algorithm it executes, to decide whether the mask is securely positioned on the patient's face.

Key words: Oxygen therapy, Oxygen mask, Oxygen supply control, Control system, Oxygen Ignition, Touch sensing technology, System design and development.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή	1
1.1 – Οξυγονοθεραπεία	2
1.2 – Κύρια νοσήματα που επωφελούνται από την οξυγονοθεραπεία	3
1.3 – Τεχνικές παροχής οξυγόνου	4
1.3.1 – Συστήματα παροχής οξυγόνου σε οξεία κατάσταση	4
1.3.2 – Συστήματα παροχής οξυγόνου μακράς διάρκειας	8
1.3.3 – Χορήγηση οξυγόνου σε ειδικές καταστάσεις	9
1.4 – Τοξικότητα του οξυγόνου	10
1.5 – Ο κίνδυνος ανάφλεξης	10
1.5.1 – Γενικά	10
1.5.2 – Παραδειγματικά περιστατικά	11
1.6 – Σκοπός της διπλωματικής εργασίας	12
Κεφάλαιο 2 – Αναζήτηση τεχνολογιών	13
2.1 – Δημοσιεύσεις	14
2.2 – Τεχνολογίες αισθητήρων	16
Κεφάλαιο 3 – Ο αισθητήρας αφής MPR121	21
3.1 – Γενικά	22
3.2 – Στοιχεία λειτουργίας	23
3.3 – Περιγραφή καταχωρητών	28
3.4 – Διαστάσεις συσκευής	36
Κεφάλαιο 4 – Η υλοποίηση του συστήματος	37
4.1 – Τα ηλεκτρόδια ελέγχου	38
4.2 – Το ηλεκτρόδιο αναφοράς	50
4.3 – Το κύκλωμα του αισθητήρα	50
4.4 – Κύκλωμα μετατροπέα επιπέδου τάσης	51
4.5 – Έλεγχοι και νέες μετρήσεις	53
4.6 – Επιλογή θέσεων των ηλεκτροδίων	54
4.7 – Προδιαγραφές κατασκευής της μάσκας	57
4.8 – Η μάσκα	58

4.9 – Επιλογή ρυθμίσεων ηλεκτροδίων	59
4.10 – Ο αλγόριθμος ελέγχου	61
4.11 – Επιλογή μικροελεγκτή	62
4.12 – Ο προγραμματισμός του αισθητήρα και του μικροελεγκτή	64
Κεφάλαιο 5 – Συμπεράσματα και βελτιώσεις	73
5.1 – Συμπεράσματα	74
5.2 – Βελτιώσεις	75
Παράρτημα Α	79
A.1 – Arduino Uno και Arduino IDE	80
A.2 – Ο μικροελεγκτής AVR ATtiny85	82
A.3 – Προγραμματιστής AVR, USBtinyISP	84
Παράρτημα Β – Το πρωτόκολλο επικοινωνίας I²C	85
B.1 – Γενικά	86
B.2 – Συνθήκες εκκίνησης και λήξης	86
B.3 – Μετάδοση bit	86
B.4 – Η διεύθυνση slave και τα bit R/ \overline{W}	87
B.5 – Αναγνώριση	87
B.6 – Διάταξη εγγραφής	88
B.7 – Διάταξη ανάγνωσης	89
Παράρτημα Γ – Μετρήσεις ηλεκτροδίων της μάσκας	90
Παράρτημα Δ – Προγράμματα ελέγχων και λήψης μετρήσεων	112
Δ.1 – Πρόγραμμα λήψης μετρήσεων ενός ηλεκτροδίου για κάθε συνδυασμό τιμών ρεύματος και χρόνου φόρτισης	113
Δ.2 – Πρόγραμμα ελέγχου λειτουργίας και συνδέσεων του κυκλώματος του αισθητήρα	114
Δ.3 – Πρόγραμμα λειτουργίας της μάσκας δειγματοληψίας	115
Δ.4 – Πρόγραμμα λήψης μετρήσεων όλων των ηλεκτροδίων για κάθε συνδυασμό τιμών ρεύματος και χρόνου φόρτισης	116
Δ.5 – Πρόγραμμα ελέγχου της ανίχνευσης αφής με τις επιλεγμένες ρυθμίσεις	117
Βιβλιογραφία	120

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες έχουν περιγραφεί με ακρίβεια οι βασικές αρχές της οξυγονοθεραπείας. Οξυγονοθεραπεία δεν είναι απλώς η τοποθέτηση μιας μάσκας οξυγόνου σε έναν ασθενή με δυσφορία. Απαιτούνται η γνώση της διαταραχής, ο κατάλληλος εμπλουτισμός σε οξυγόνο και η σωστή συσκευή για τη χρήση του. [1]

Παρόλα αυτά, η οξυγονοθεραπεία σήμερα είναι μία ευρέως διαδεδομένη μέθοδος αντιμετώπισης διαφόρων ασθενειών εφαρμοζόμενη είτε σε νοσοκομειακούς και κλινικούς χώρους είτε για θεραπεία στο σπίτι.

Στο εισαγωγικό αυτό κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των βασικών αρχών της οξυγονοθεραπείας, του κινδύνου της ανάφλεξης του οξυγόνου και τελικά του σκοπού αυτής της διπλωματικής εργασίας.

1.1 – Οξυγονοθεραπεία

Ακολουθώντας την ανακάλυψη του Joseph Priestley για το μοριακό οξυγόνο και την επίδειξη που ακολούθησε από τον Lavoisier για την ανταλλαγή των αναπνεόμενων αερίων, η χρήση εισπνεόμενου οξυγόνου στην αντιμετώπιση διαφόρων κλινικών διαταραχών αναπτύχθηκε ταχέως στα τέλη του δέκατου όγδοου αιώνα. Παρ' όλα αυτά, δημιουργήθηκε ένας αντίλογος καθώς μελέτες έδειξαν ότι, κάτω από φυσιολογικές συνθήκες, η δυνατότητα μεταφοράς οξυγόνου από το αρτηριακό αίμα ήταν σχεδόν μέγιστη, και επιπλέον αύξηση του εισπνεόμενου O_2 δεν παρείχε αξιόλογα πλεονεκτήματα. Επιπλέον, το 1899, ο Lorrain Smith επιβεβαίωσε τις αρχικές υποψίες των Priestley, Lavoisier και άλλων για την πιθανή τοξικότητα του εισπνεόμενου οξυγόνου, περιγράφοντας παθολογικές πνευμονικές αλλαγές που σχετιζόνταν με την υπερβολική έκθεση σε οξυγόνο. Ως αποτέλεσμα σε αυτές τις παρατηρήσεις, από την αρχή του εικοστού αιώνα, η χρήση οξυγόνου ως τυπική θεραπεία έπαψε να συνίσταται.

Στις αρχές τις δεκαετίας του 1920 η εισπνοή συμπληρώματος οξυγόνου επαναξιολογήθηκε έντονα. Μέσα από πρωτοποριακές προσπάθειες των Meakins, Baruch, και άλλων καθιερώθηκε η έννοια της θεραπείας μέσω εισπνοής οξυγόνου. Πολλοί ανεξάρτητοι μελετητές έδειξαν ότι η μείωση στη διαθεσιμότητα του οξυγόνου υπέφερε σοβαρές συνέπειες στην φυσιολογία του ατόμου, και ότι σε παθολογικές καταστάσεις, οι επιβλαβείς συνέπειες της υποξίας (hypoxia) μπορούσαν συχνά να αντιμετωπισθούν με την παροχή οξυγόνου. Έτσι, η θεραπεία εισπνεόμενου οξυγόνου έγινε ξανά ευρέως χρησιμοποιούμενη, αλλά ως επικουρική φροντίδα για συγκεκριμένα καρδιακά και πνευμονικά νοσήματα που παρουσίαζαν υποξαιμία (hypoxemia) και υποξία.

Τα τελευταία 90 χρόνια, με την ανάπτυξη βελτιωμένων συστημάτων παροχής οξυγόνου, μηχανικού αερισμού, της μοντέρνας μονάδας εντατικής φροντίδας, και την μακρόχρονη κατ' οίκον οξυγονοθεραπεία, το οξυγόνο έγινε ευρέως διαθέσιμο και συχνά συνταγογραφούμενο. Όμως, παρά της αυξανόμενης κλινικής εμπειρίας, πολλές αβεβαιότητες εμποδίζουν τη λογική χρήση συμπληρώματος οξυγόνου. Όπως με κάθε φάρμακο, υπάρχουν τόσο ενδείξεις όσο και αντενδείξεις για τη χρήση του. Συνέδρια συναίνεσης και πολυάριθμες μελέτες έχουν συντελέσει στην εγκαθίδρυση κατευθυντήριων κανόνων που ορίζουν τα κλινικά κριτήρια για τη σωστή χρήση συμπληρώματος οξυγόνου. Δυστυχώς, στην πράξη, η οξυγονοθεραπεία συχνά παρέχεται χωρίς προσεκτική εκτίμηση των πιθανών πλεονεκτημάτων και παρενεργειών και χωρίς την απαραίτητη επίβλεψη. Σε μία μελέτη που πραγματοποιήθηκε σε 90 διαδοχικούς νοσηλευμένους ασθενείς, η οξυγονοθεραπεία είχε χορηγηθεί απρεπώς σε ποσοστό 21%· η παρακολούθηση ήταν ανεπαρκής σε ποσοστό 85%· και η καταγραφή των φυσιολογικών κριτηρίων για τον τερματισμό της θεραπείας ήταν ελλιπής στο 88% όλων των περιπτώσεων. Επίσης, δεδομένα που έχουν συλλεχθεί δείχνουν ότι λιγότερο από το 50% των ασθενών στους οποίους έχει χορηγηθεί οξυγόνο το λαμβάνουν στην δόση και ροή που έχουν ορισθεί. [2]

1.2 – Κύρια νοσήματα που επωφελούνται από την οξυγονοθεραπεία

A. Οξεία αναπνευστική ανεπάρκεια

1. Νευρολογικές διαταραχές – όγκος ή έμφρακτο του εγκεφάλου τα οποία επηρεάζουν τα αναπνευστικά κέντρα· υπερδοσολογία φαρμάκων, υψηλή τραυματική διατομή της αυχενικής σπονδυλικής στήλης, περιφερειακή νευροπάθεια, πολιομυελίτις.
2. Μυϊκή νόσος – μυοπάθεια, βαριά μυασθένεια.
3. Κάκωση του θώρακος – διαταραχή του θώρακος από κατάγματα πλευρών, πνευμονοθώρακας, shock lung από θλάση ή από πίεση του πνεύμονος.
4. Νόσος του πνεύμονος – υπεροξεία λοίμωξη όπως είναι η πνευμονία, στραγγαλισμός, πνιγμός (φρέσκο ή θαλασσινό νερό), ασθματική κατάσταση, εισρόφηση ξένου σώματος, πνευμονικό οίδημα, πνευμοθώρακας υπό τάσιν.

B. Χρόνια αναπνευστική ανεπάρκεια

1. Αποφρακτική νόσος των αεραγωγών – χρόνια βρογχίτις και εμφύσημα, χρόνιο βρογχικό άσθμα.
2. Νόσος του διαμέσου πνευμονικού ιστού.
 - α) Πνευμονική ίνωση – επαγγελματική, φλεγμονώδης, κυψελιδίτις, αυτοάνοση νόσος.
 - β) Διηθήσεις όπως είναι το σαρκοειδές, η κοκκιωμάτωση.
3. Δυσμορφία του θωρακικού κλωβού – κυφοσκολίωση, χειρουργική εκτομή του πνεύμονος, θωρακοπλαστική.
4. Πρωτοπαθείς διαταραχές του αναπνευστικού κέντρου – υποαερισμός από παχυσαρκία, αγγειακή νόσος της μυελώδους ουσίας.
5. Διαταραχές του ύπνου.
6. Απόφραξη των ανωτέρων αεραγωγών στα παιδιά.
7. Μακρόχρονη μυϊκή ή νευρολογική διαταραχή – δυστροφίες, μυοπάθειες, πολιομυελίτις, περιφερικές νευροπάθειες και τραύμα τελικού σταδίου.

Γ. Κυκλοφορική ανεπάρκεια

1. Καρδιακή ανεπάρκεια.
2. Shock – ελάττωση του όγκου του κυκλοφορούντος αίματος.

Δ. Αναιμία

1. Αιμορραγία
2. Εκτεταμένη καταστροφή του όγκου του κυκλοφορούντος αίματος.

Ε. Μεταβολές των συνθηκών του περιβάλλοντος

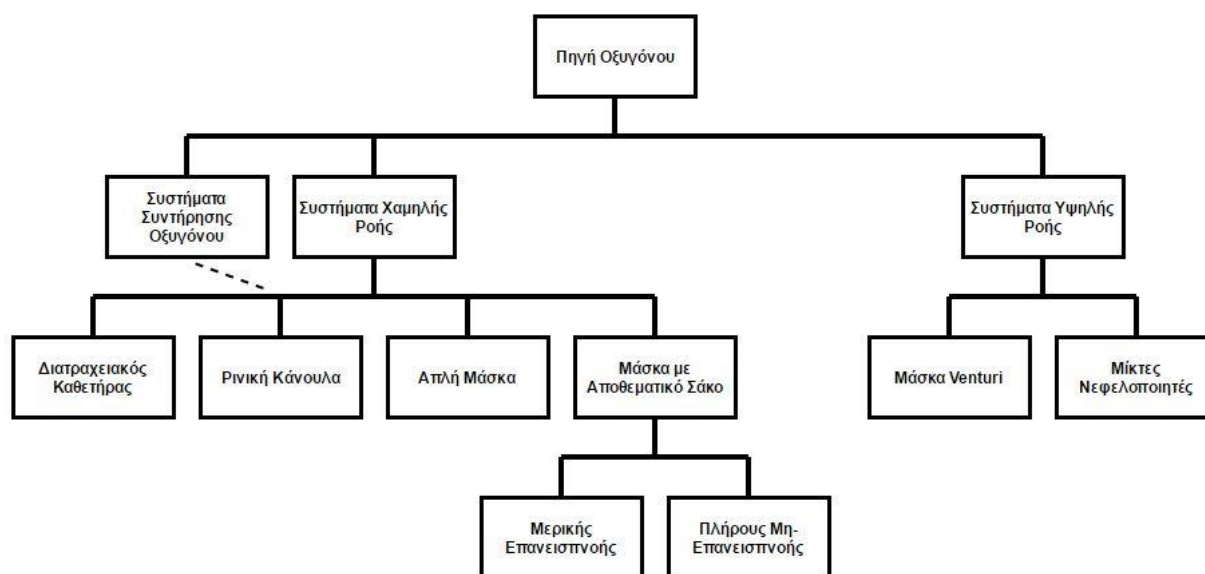
1. Βουνά, αερόπλοιοι.
2. Κατάδυση. [1]

1.3 – Τεχνικές παροχής οξυγόνου

Είτε σε οξεία είτε σε χρόνια κατάσταση, όταν υπάρξει ανάγκη για συμπληρωματικό οξυγόνο, μία από διάφορων τύπων συσκευές μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παράσχει στον ασθενή αέρα εμπλουτισμένο σε οξυγόνο. Η επιλογή του συστήματος βασίζεται σε διάφορα κριτήρια, συμπεριλαμβανομένων: (1) το βαθμό της υποξαιμίας, (2) την ανάγκη για ακρίβεια, (3) την άνεση του ασθενή και (4) το κόστος. Οι συσκευές που θα συζητηθούν στη συνέχεια χρησιμοποιούνται κυρίως σε ασθενείς που έχουν τις αισθήσεις τους. [2]

1.3.1 – Συστήματα παροχής οξυγόνου σε οξεία κατάσταση

Υπάρχει πλήθος διαθέσιμων συσκευών για παροχή οξυγόνου μικρής διάρκειας. Τα συστήματα διαφέρουν σε πολυπλοκότητα, κόστος, αποδοτικότητα και ακρίβεια στη παροχή οξυγόνου. Εκτός από τα αναπνευστικά κυκλώματα αναισθησίας, σχεδόν όλα τα συστήματα παροχής οξυγόνου δεν επιτρέπουν επανεισπνοή (πλήρως ή μερικώς). Σε τέτοια κυκλώματα,



Εικόνα 1.1 – Διάγραμμα κατάταξης των συνηθέστερων συστημάτων παροχής θεραπευτικού οξυγόνου [2]

τα αέρια της εισπνοής δεν αποτελούνται κατά κανένα ποσοστό από εκείνα που εκπνέονται, και το μόνο CO₂ που εισπνέεται, είναι από τον ατμοσφαιρικό αέρα του δωματίου. Η επανεισπνοή αποφεύγεται μέσω βαλβίδων μίας κατεύθυνσης που χωρίζουν τα εισπνεόμενα από τα εκπνεόμενα αέρια. Επίσης, σε όλα αυτά τα συστήματα, το μίγμα των εισπνεόμενων αερίων πρέπει να παρέχεται σε ικανοποιητικό όγκο και ροή ώστε να καλύπτεται η υψηλή ανάγκη που συχνά εμφανίζεται σε ασθενείς σε επικίνδυνη κατάσταση.

Οι κύριοι τύποι συστημάτων παροχής οξυγόνου μπορούν να χωρισθούν σε χαμηλής και υψηλής ροής, όλα όμως μπορούν να αποδώσουν υγροποιημένα αέρια εισπνοής. Κάθε ένα έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του. [2]

Συσκευές οξυγόνου χαμηλής ροής

Τα συστήματα παροχής οξυγόνου χαμηλής ροής αποδίδουν ένα κλάσμα του αναπνευστικού όγκου που έχει ανάγκη ο ασθενής ως καθαρό οξυγόνο· το υπόλοιπο ποσοστό καλύπτεται από την προσθήκη κάποιου άλλου αερίου, συνήθως ατμοσφαιρικού αέρα. Η ροή που επιτυγχάνεται μέσω αυτών των συσκευών είναι χαμηλή (μικρότερη των 6 L/min), και δεν μπορούν να μεταφέρουν σταθερή συγκέντρωση εισπνεόμενου οξυγόνου, καθώς μικρές διακυμάνσεις στον όγκο της εισπνοής οδηγούν σε διαφοροποίηση του εισπνεόμενου ατμοσφαιρικού αέρα. Συνεπώς, σε ασθενείς με αφύσικο ρυθμό αναπνοής, είναι πιθανόν να υπάρχουν διακυμάνσεις στο ποσοστό του εισπνεόμενου οξυγόνου. Οι παράγοντες που οφείλονται στον ασθενή και επηρεάζουν τη συγκέντρωση του εισπνεόμενου οξυγόνου περιλαμβάνουν: (1) ρηχή αναπνοή, η οποία έχει αποτέλεσμα την εισροή λιγότερου ατμοσφαιρικού αέρα, και άρα, μεγαλύτερη συγκέντρωση οξυγόνου· (2) πολύ βαθιές αναπνοές, οι οποίες έχουν αποτέλεσμα της εισπνοής περισσότερου όγκου ατμοσφαιρικού αέρα· και (3) αλλαγές στη συχνότητα των αναπνοών, που επηρεάζουν το χρόνο εκπνοής και έτσι υπάρχουν διακυμάνσεις στο περιεχόμενο του αναπνευστικού αποθέματος της συσκευής. Όταν υπάρχει ανάγκη σταθερής συγκέντρωσης οξυγόνου (π.χ. σε ασθενείς με χρόνια κατακράτηση CO₂), συστήματα χαμηλής ροής δε θα πρέπει να χρησιμοποιούνται. [2]

Ρινική κάνουλα

Οι ρινικοί καθετήρες και κάνουλες είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες συσκευές παροχής οξυγόνου χαμηλής ροής. Είναι απλές, φθηνές, εύκολες στη χρήση και αρκετά ανεκτές. Όπως με όλα τα συστήματα χαμηλής ροής, το ποσοστό του εισπνεόμενου οξυγόνου (FiO₂), είναι πιθανόν να έχει μεγάλες διακυμάνσεις, ανάλογα με τη ροή του οξυγόνου ή τη ροή και τον όγκο της αναπνοής. Σε μία ρινική κάνουλα χαμηλής ροής ρυθμισμένη να παρέχει οξυγόνο στο ρινοφάρυγγα με ροή μεταξύ 1 και 6 L/min, η FiO₂ εκτείνεται μεταξύ 0,24 και 0,44. Ροή μεγαλύτερη των 6 L/min δεν αυξάνουν αρκετά την FiO₂ άνω του 44%· τέτοια υψηλή ροή μπορεί να προκαλέσει ξήρανση των βλεννοδών μεμβρανών. [2]



Εικόνα 1.2 – Ρινική κάνουλα ¹

Μάσκες οξυγόνου

Απλές πλαστικές μάσκες οξυγόνου που καλύπτουν τη μύτη και το στόμα είναι ικανές να αποδώσουν συγκεντρώσεις οξυγόνου ως και 50 ή 60 τις εκατό. Ανάλογα με το μέγεθος της μάσκας, αυτές οι συσκευές αποθηκεύουν στο εσωτερικό τους από 100 έως 200 ml επιπλέον αερίου, με αποτέλεσμα τη δυνατότητα να επιτυγχάνουν κλάσμα εισπνεόμενου οξυγόνου μεγαλύτερου του 0,44. Απλές μάσκες οξυγόνου χρειάζονται ροή οξυγόνου μεταξύ 5 και 6 L/min για να αποφευχθεί συσσώρευση CO₂ μέσα σε αυτές.



Εικόνα 1.3 – Μάσκα οξυγόνου ²

Οι συνηθισμένες μάσκες οξυγόνου έχουν όλους τους περιορισμούς των масκών προσώπου. Δεν επιτρέπουν στον ασθενή να πίνει ή να τρώει, εμποδίζουν την απόχρεμψη και μπορεί να μετακινηθούν από τη τους σωστή θέση, κυρίως τη νύχτα στη διάρκεια του ύπνου του ασθενή. Επιπλέον, η χρήση μάσκας οξυγόνου αυξάνει τον κίνδυνο αναρρόφησης από πιθανή παρεμπόδιση έμετου ή άλλων εκκρίσεων. Άρα, όταν χρησιμοποιούνται αυτές οι συσκευές η αναλογία κινδύνου-

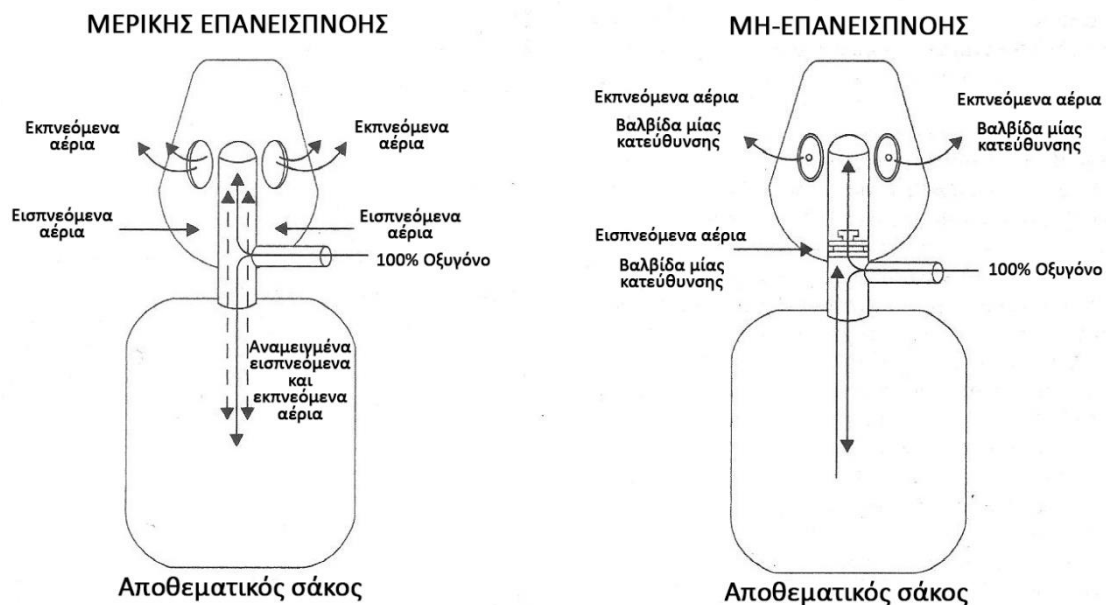
οφέλους πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν. Όπως και στην περίπτωση της ρινικής κάνουλας η ξήρανση των βλεννοδών μεμβρανών είναι πιθανή. Ύγρανση του εισπνεόμενου αερίου μειώνει το μέγεθος αυτού του προβλήματος. [2]

¹ http://fce-study.netdna-ssl.com/images/upload-flashcards/909730/555821_m.jpg

² http://mobilitygo.com.mx/media/catalog/product/cache/1/small_image/242x/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/m/a/mascaras-nebulizadoras-pediatricas-68771-142833.jpg

Μάσκες με αποθεματικούς σάκους

Για την παροχή οξυγόνου σε αναλογία μεγαλύτερη του 0,6 ένας αποθεματικός σάκος (600 – 1000 cc) μπορεί να τοποθετηθεί σε μία απλή μάσκα προσώπου. Μία πηγή συνεχούς οξυγόνου με ροή από 5 έως 8 L/min είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της πληρότητας του ασκού καθώς και της απομάκρυνσης του CO₂ από τη μάσκα. Εάν δεν υπάρχουν βαλβίδες μίας κατεύθυνσης στον αποθεματικό ασκό, το σύστημα καλείται μάσκα μερικής επανεισπνοής. Αυτού του τύπου οι μάσκες μπορούν να παρέχουν οξυγόνο σε συγκεντρώσεις 80 με 85 τις εκατό. Οι μάσκες πλήρους μη-επανεισπνοής χρησιμοποιούν μια βαλβίδα μίας κατεύθυνσης ανάμεσα από στη μάσκα και τον ασκό ώστε ο ασθενής να μπορεί να εισπνέει μόνο από τον ασκό και να εκπνέει μέσα από ξεχωριστές βαλβίδες στις πλευρές της μάσκας.



Εικόνα 1.4 – Τα δύο είδη χρήσης αποθεματικού σάκου στις μάσκες οξυγόνου [2]

Πολύ μεγάλη FiO₂ μπορεί να επιτευχθεί με χρήση μάσκας που εφαρμόζει απόλυτα στο πρόσωπο του ασθενή. Όμως, τέτοιας μορφής μάσκες, συμπεριλαμβανομένων και αυτών που χρησιμοποιούνται στα συστήματα CPAP, είναι συνήθως άβολες και δεν είναι κατάλληλες για χρήση μεγαλύτερη από λίγες ώρες. [2]

Συσκευές οξυγόνου υψηλής ροής

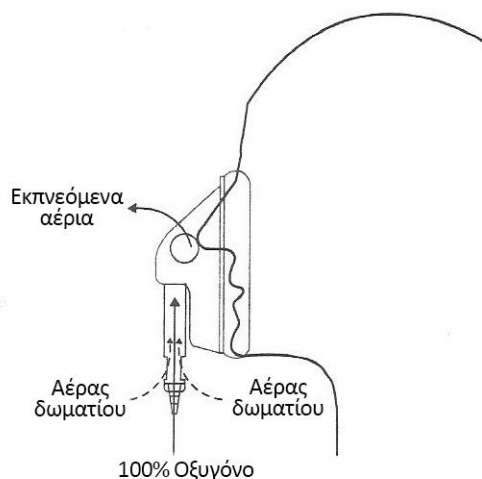
Τα συστήματα παροχής οξυγόνου υψηλής ροής διατηρούν την επιλεγμένη FiO₂ είτε με χρήση αποθέματος είτε μεταφέροντας οξυγόνο με πολύ υψηλή ροή. Η ροή σε όλα τα συστήματα αυτού του τύπου ξεπερνά κατά τέσσερις φορές τον εισπνεόμενο ανά λεπτό όγκο του ασθενή· σε διαφορετική περίπτωση έχουμε αύξηση του εισρεόμενου ατμοσφαιρικού αέρα στα κορυφαία σημεία της αναπνοής.

Συχνές κλινικές ενδείξεις για την ανάγκη χρήσης συστήματος παροχής οξυγόνου υψηλής ροής είναι: (1) θεραπεία υποξικών ασθενών που απαιτούν ελεγχόμενη αύξηση του FiO₂, και (2) νέους, δυνατούς ασθενείς με υποξαιμία που εμφανίζουν αφύσικους ρυθμούς αναπνοής και των οποίων οι απαιτήσεις αερισμού μπορεί να ξεπερνούν τις δυνατότητες των

συστημάτων χαμηλής ροής. Όταν υπάρχουν κλινικές ενδείξεις για στενά ελεγχόμενη, υψηλή FiO_2 , ή όταν είναι απαραίτητη υψηλή ροή, τότε πρέπει να χρησιμοποιείται κάποιο σύστημα υψηλής ροής. [2]

Jet-Mixing Venturi Masks

Μία άλλη συσκευή παροχής οξυγόνου υψηλής ροής είναι η μάσκα Venturi, η λειτουργία της οποίας βασίζεται στην τροποποίηση από τον Venturi, της αρχής του Bernoulli για τη φυσική των ρευστών στη μίξη αερίων. Καθώς η ροή του εισπνεόμενου αερίου αυξάνεται, η πλευρική πίεση στο διάνυσμα της ροής μειώνεται, με αποτέλεσμα την είσοδο ατμοσφαιρικού αέρα. Στις μάσκες Venturi, οξυγόνο σε 100 τις εκατό περιεκτικότητα ρέει μέσω ενός σταθερού στομίου περνώντας μπροστά από πλευρικά ανοίγματα, τραβώντας αέρα. Ο όγκος του εισερχόμενου αέρα, και άρα και η τιμή της FiO_2 , εξαρτάται από το μέγεθος των ανοιγμάτων και από τη ροή του οξυγόνου. Καθώς αυτές οι δύο παράμετροι παραμένουν σταθερές, η τελική αναλογία οξυγόνου-αέρα δε μεταβάλλεται, αποδίδοντας μία καλά ελεγχόμενη FiO_2 . Ο εκπνεόμενος όγκος διαφεύγει μέσω εξόδων στα πλαϊνά της μάσκας. Το εύρος της FiO_2 που μπορεί να επιτευχθεί μέσω ρυθμίσεων στην ροή του οξυγόνου και στον όγκο του εισερχόμενου αέρα, είναι μεγάλο. Οι μάσκες που χρησιμοποιούνται μπορούν να παρέχουν αέριο με FiO_2 μεταξύ 0,24 και 0,50.



Εικόνα 1.5 – Μάσκα Venturi [2]

Αφού οι μάσκες Venturi μπορούν αξιόπιστα να παρέχουν σταθερή FiO_2 μέχρι 0,50, είναι ιδανικές συσκευές για χρήση σε υποξαιμικούς ασθενείς με χρόνια αναπνευστική πνευμονοπάθεια (ΧΑΠ/COPD) και χρόνια αναπνευστική ανεπάρκεια με υπερκαπνία. Ενώ η FiO_2 , συνήθως μπορεί να ρυθμίζεται με ακρίβεια, τεχνικοί παράγοντες μπορούν να μεταβάλουν την τιμή της. Για παράδειγμα, σταγόνες νερού μπορεί να φράξουν τη συσκευή εισόδου του οξυγόνου, με αποτέλεσμα την αλλαγή της ροής των αερίων. Επίσης, προβλήματα στις θύρες εξόδου μπορεί να προκαλέσουν μείωση στην τιμή του εισερχόμενου ατμοσφαιρικού αέρα, καταλήγοντας σε υψηλότερη FiO_2 . [2]

Άλλα συστήματα υψηλής ροής

Νεφελοποιητές και υγραντήρες χρησιμοποιούνται για την παροχή συμπληρωματικού οξυγόνου ή υγραποποιημένων αερίων (συμπεριλαμβανομένου και του αέρα δωματίου). Υψηλές τιμές υγρασίας είναι συχνά σημαντικές στη διαχείριση αυξημένων εκκρίσεων των αεραγωγών. Εάν χρησιμοποιείται υψηλή ροή (μεγαλύτερη από 40 L/min), τότε αυτές οι συσκευές μπορούν συνήθως να παρέχουν σταθερή και προβλεπόμενη FiO_2 .

Μίκτες οξυγόνου-αέρα αποτελούνται από συσκευές ακριβείας που μετατρέπουν εντοιχισμένες πηγές αέρα και οξυγόνου υψηλών πιέσεων (από 50 έως 70 psi) σε διαχειρίσιμη, προβλεπόμενη ροή έως και 100 L/min σε FiO_2 μεταξύ 0,21 και 1,0. Αυτές οι συσκευές συνήθως διαθέτουν βαλβίδες μείωσης της πίεσης και δείκτη της πίεσης για να

εξασφαλίζεται σταθερή FiO_2 , ενάντια σε μικρές διακυμάνσεις στην πίεση της πηγής. Παρ' όλο που παρέχουν σταθερή FiO_2 , αυτές οι συσκευές έχουν κάποια μειονεκτήματα. Είναι θορυβώδεις και απαιτούν ειδικευμένο προσωπικό για την τοποθέτηση και την παρακολούθηση των οργάνων. [2]

1.3.2 – Συστήματα παροχής οξυγόνου μακράς διάρκειας [2]

Υπάρχει πλήθος διαθέσιμων συσκευών παροχής οξυγόνου για χρήση στο σπίτι ή σε άλλες καταστάσεις χρόνιας φροντίδας. Πηγές αερίων για οξυγονοθεραπεία μακράς διάρκειας περιλαμβάνουν συμπυκνωτές οξυγόνου και συμπιεσμένο ή υγρό οξυγόνο. Οι περισσότεροι ασθενείς που χρειάζονται σταθερή πηγή συμπληρωματικού οξυγόνου χρησιμοποιούν συμπυκνωτές οξυγόνου. Επειδή όμως οι συμπυκνωτές ζυγίζουν περίπου 20 κιλά και απαιτούν ηλεκτρική τροφοδοσία δικτύου, η χρήση τους περιορίζεται ως σταθερή πηγή οξυγόνου. Πλην της περίπτωσης όπου οι ασθενείς είναι κατάκοιτοι ή περιορισμένοι σε κλίνη, πρέπει να χρησιμοποιούνται και σταθερά και κινητά συστήματα παροχής οξυγόνου. Υπάρχουν φορητά συστήματα και συμπιεσμένου και υγρού οξυγόνου, αλλά τα δοχεία του υγρού οξυγόνου είναι πιο εύκολο να ξαναγεμιστούν από τους κυλίνδρους υψηλής πίεσης. Τα κύρια μειονεκτήματα των συστημάτων υγρού οξυγόνου είναι το μεγαλύτερο κόστος και η απαίτηση αποσυμπίεσης.

Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται στην οξυγονοθεραπεία περιλαμβάνουν σχεδόν όλα τα συστήματα χαμηλής πίεση που περιεγράφηκαν προηγουμένως. Οι περισσότεροι ασθενείς που λαμβάνουν οξυγόνο σε μόνιμη βάση χρησιμοποιούν ρινική κάνουλα και ροή οξυγόνου από 2 έως 4 L/min.

Για τη βελτίωση της αποδοτικότητας της παροχής οξυγόνου και για τον περιορισμό της ανάγκης για συνεχή παραγγελία αλλά και του κόστους, έχουν αναπτυχθεί αρκετές συσκευές σχεδιασμένες να “διατηρούν” οξυγόνο στο σπίτι. Αυτές περιλαμβάνουν τις δεξαμενές ρινικής κάνουλας, τις ηλεκτρονικές συσκευές διατήρησης οξυγόνου και τους διατραχειακούς καθετήρες.

Οι δεξαμενές ρινικής κάνουλας μπορούν να αποθηκεύουν 20 ml οξυγόνου κατά την εκπνοή το οποίο διατίθεται επιπλέον στην επόμενη εισπνοή. Οι ηλεκτρονικές συσκευές ενεργοποιούνται στην εκκίνηση της κάθε εισπνοής και αποδίδουν έναν παλμό οξυγόνου. Άλλες συσκευές παρέχουν σταθερό όγκο σε κάθε αναπνοή και άλλες μεταβλητό που ορίζεται από τη διάρκειά της. Οι πρώτες, κάθε φορά που ανιχνεύεται μία ανάσα δίνουν ένα σταθερό όγκο αερίου στην αρχή ανάλογα με τη ρύθμιση που έχει εφαρμοστεί ο οποίος δεν αλλάζει με το ρυθμό της αναπνοής του ασθενή. Κάποιες ενεργοποιούνται σε κάθε αναπνοή κάποιες ανά δύο. Ο δεύτερος τύπος παρέχει μεταβλητό όγκο ανάλογα με τη διάρκεια της κάθε αναπνοής. Ύστερα από τον αρχικό όγκο οξυγόνου, η συσκευή αποδίδει μία σταθερή ροή στο υπόλοιπο της εισπνοής. Αυτές οι συσκευές παρέχουν μεταβλητό όγκο για κάθε ρύθμιση ροής που εξαρτάται από τη διάρκεια της αναπνοής, και έχουν μικρότερη κατανάλωση οξυγόνου σε χαμηλούς ρυθμούς αναπνοής. Επιπλέον μπορούν να παρέχουν ίδιο ή περισσότερο οξυγόνο από αυτό που μπορεί να επιτευχθεί με τα περισσότερα συστήματα συνεχούς ροής· στην περίπτωση βλάβης του συστήματος διαχείρισης, η συσκευή αλλάζει αυτόματα σε λειτουργία συνεχούς ροής χωρίς την μεσολάβηση του ασθενή.

Οι διατραχειακοί καθετήρες βελτιώνουν την παροχή του οξυγόνου παρακάμπτοντας το χώρο του άνω αεραγωγού και ουσιαστικά χρησιμοποιώντας τον σα δεξαμενή οξυγόνου κατά την

εισπνοή και εκπνοή. Το οξυγόνο διατραχειακά παρέχεται μέσω ενός ρηχού καθετήρα απευθείας στην τραχεία τοποθετημένου χειρουργικά υπό τοπική αναισθησία, ή διαδερμικά με την τεχνική Seldinger. Πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι η χρήση διατραχειακού καθετήρα μειώνει την κατανάλωση οξυγόνου από 50 έως 75 τις εκατό. Άλλα πλεονεκτήματα του συστήματος είναι ότι είναι διακριτικό, δεν υπάρχουν ερεθισμοί στη μύτη και το πρόσωπο λόγω της ροής του οξυγόνου και σπάνια μετατόπιση του καθετήρα κατά τη διάρκεια του ύπνου. Μειονεκτήματα είναι η αυξημένη πιθανότητα λοιμώξεων, η ανάπτυξη θανατηφόρων μυκητών, και η πιθανή θραύση του καθετήρα που απαιτεί αλλαγή.

1.3.3 – Χορήγηση οξυγόνου σε ειδικές καταστάσεις

Μονάδες φροντίδας προώρων και νεογέννητων βρεφών.

Τα πρόωρα βρέφη, κυρίως εκείνα των 34 ή λιγότερων εβδομάδων, εμφανίζουν δυσκολίες στην έκπτυξη των πνευμόνων η οποία οφείλεται στην πτωχή ανάπτυξη των πνευμόνων και στην έλλειψη του surfactant. Για να διατηρηθούν στη ζωή, χρησιμοποιούνται διάφοροι επωαστικοί κλίβανοι, με έλεγχο της υγρασίας, της θερμοκρασίας και της οξυγόνωσης. Η μερική αρτηριακή πίεση οξυγόνου (PaO_2) διατηρείται μεταξύ 60-70 χιλ. Hg έως ότου μπορέσει να εγκαθιδρυθεί αυτόματος αερισμός.

Κατά το χρόνο του τοκετού η φτωχή λειτουργία του πλακούντα μπορεί να ευθύνεται για υποξαιμία του εμβρύου. Για να αυξηθεί η PaO_2 της μητέρας χρειάζεται να της δοθεί συμπληρωματικό οξυγόνο. [2]

Οξυγόνο σε ασθενοφόρα αυτοκίνητα.

Μέσα στα ασθενοφόρα αυτοκίνητα η οξυγονοθεραπεία χρειάζεται για να ελαττωθεί η ιστική υποξία κατά τη μεταφορά των ασθενών στο νοσοκομείο, η οποία είναι επικίνδυνη για τη ζωή και οφείλεται σε πολλές επείγουσες καταστάσεις. [1]

Ειδικές καταστάσεις περιβάλλοντος.

Τέτοιες είναι η ανάβαση σε όρη με μεγάλο υψόμετρο, τα αερόπλοια, τα διαστημόπλοια, οι καταδύσεις, η δηλητηρίαση από CO, ο πνευμοθώρακας και το διατεταμένο κόλον. [1]

Ο τύπος του συστήματος που χρησιμοποιείται επιλέγεται ώστε να ταιριάζει στον κάθε ασθενή. Αυτοί που μπορούν να μετακινηθούν ωφελούνται από τα ελαφρότερα συστήματα υγρού οξυγόνου που είναι φορητά. Οι συσκευές που παρέχουν ωθήσεις οξυγόνου κατά τη διάρκεια της εισπνοής, θα αυξήσουν την αυτονομία αυτών των φορητών συστημάτων. [3]

1.4 – Τοξικότητα του οξυγόνου

Ατελεκτασία από απορρόφηση

Εάν το άζωτο που είναι μέσα στις κυψελίδες αντικατασταθεί πλήρως ή σχεδόν πλήρως με οξυγόνο με συνεχή εισπνοή πολύ υψηλών πυκνοτήτων (άνω του 60%), υπάρχει τάση για πλήρη απόφραξη ορισμένων ομάδων κυψελίδων επειδή το οξυγόνο μεταφέρεται γρήγορα στο αίμα του πνεύμονα.

Επίσης ατελεκτασία από απορρόφηση εμφανίζεται και κατά τη διάρκεια της αναισθησίας, της εντατικής θεραπείας, κατά τη γενική ακινησία σε κάθε σοβαρή νόσο και σε κάθε περιοχή του πνεύμονος όταν υπάρχει δευτεροπαθής λοίμωξη. [1]

Κυτταροτοξικότητα

Το οξυγόνο, αν και απαραίτητο για το μεταβολισμό του κυττάρου, σε επίμονη υψηλή πυκνότητα μπορεί να γίνει δηλητήριο. Θεωρητικά κινδυνεύει κάθε κύτταρο αλλά ο πνεύμονας είναι ιδιαίτερα ευαίσθητος.

Η ευαισθησία των ατόμων προς την τοξικότητα του οξυγόνου ποικίλλει. Οι νέοι είναι πιο ανθεκτικοί από τους ηλικιωμένους και όσοι θρέφονται καλά αντιδρούν καλύτερα από τους λιμοκτονούντες. [1]

Τοξικότητα οξυγόνου και οξυγονοθεραπεία μακράς διάρκειας

Παρά το γεγονός ότι η ελεγχόμενη οξυγονοθεραπεία στο σπίτι χρησιμοποιεί το μέγιστο μόνο 30% πυκνότητα οξυγόνου, η μεγάλη διάρκεια αυτής της θεραπείας δημιουργεί ανησυχίες για εμφάνιση βλαβών στους πνεύμονες από την τοξικότητα του οξυγόνου. [1]

1.5 – Ο κίνδυνος ανάφλεξης

1.5.1 – Γενικά

Είναι γνωστό ότι η οξυγονοθεραπεία είναι επικίνδυνη για ασθενείς που συνεχίζουν να καπνίζουν, και έχουν σημειωθεί αρκετά κρούσματα πυρκαγιάς που προκλήθηκαν από αγωγούς και συνδέσεις οξυγόνου που πήραν φωτιά. Οι περισσότερες περιπτώσεις από αυτές αναφέρονται σε ατυχήματα που πραγματοποιήθηκαν σε σπίτια παρά σε νοσοκομεία. Στη πραγματικότητα, τα εγκαύματα σε χώρο νοσοκομείου από το κάπνισμα τσιγάρων κατά τη παροχή οξυγόνου είναι πιο συχνά από ότι καταγράφεται στην ιατρική βιβλιογραφία. [4]

Πρόσφατες έρευνες σε ασθενείς που χρησιμοποιούν συμπληρωματικό οξυγόνο έχουν δείξει ότι το ποσοστό των ενεργών καπνιστών είναι μεταξύ 14 και 45%. [5]

Παρά τις προειδοποιήσεις που δίνονται για τους πιθανούς κινδύνους, και την πιθανότητα εγκαυμάτων και φωτιάς εάν τσιγάρα ανάβονται μπροστά από οξυγόνο, ένας μεγάλος αριθμός ασθενών συνεχίζουν να καπνίζουν ενώ λαμβάνουν οξυγόνο. [4]

Μετά από έρευνες που έγιναν σε τέτοιες περιπτώσεις αναγνωρίστηκαν ορισμένοι παράγοντες κινδύνου που περιλαμβάνουν: (1) ο ασθενής μένει μόνος, (2) έλλειψη ή

παρουσία ελαττωματικών ανιχνευτών καπνού, (3) γνωστική δυσλειτουργία, (4) ιστορικό καπνίσματος σε παρουσία οξυγόνου, και (5) ευφλεκτά ρούχα. [4]

Η ανάφλεξη των περισσότερων υλικών απαιτεί την παρουσία καύσιμου, μία πηγή θερμότητας και έναν οξειδωτικό παράγοντα. Στην περίπτωση που μελετάται, το καύσιμο μπορεί να είναι κάποιο σπρέι, άρωμα ή ύφασμα, αλλά και το δέρμα ή τα μαλλιά του ασθενή λόγω της εύφλεκτης φύσης των ιστών του ανθρώπου. Η πηγή θερμότητας μπορεί να είναι κάποιο αναμμένο τσιγάρο ή μια σπίθα από αναπτήρα ή και ελαττωματική ηλεκτρική συσκευή (π.χ. ηλ. συσκευή ξυρίσματος). Το οξυγόνο παρόλο που από μόνο του δεν θεωρείται εύφλεκτο, δρα ως ισχυρό οξειδωτικό. [5]

1.5.2 – Παραδειγματικά περιστατικά

Ο ασθενής στα αριστερά της εικόνας 1.6, πήρε ένα τσιγάρο και αναπτήρα από την τσέπη μία ιατρικής μπλούζας, που είχε αφεθεί χωρίς επίβλεψη κοντά στο κρεβάτι του, και το άναψε. Η ανάφλεξη του συστήματος παροχής οξυγόνου που πραγματοποιήθηκε προκάλεσε εγκαύματα δευτέρου βαθμού στο μέσω του προσώπου. [4]

Ο δεύτερος ασθενής, ενώ ήταν στο κρεβάτι του, και συνδεδεμένος στο σύστημα παροχής οξυγόνου, προσπάθησε να ανάψει το υπόλοιπο ενός σβησμένου τσιγάρου (το οποίο πιθανώς βρήκε σε σταχτοδοχείο στο χώρο καπνίσματος του νοσοκομείου). Η φλόγα από τον αναπτήρα αναπύρωσε το πλούσιο σε οξυγόνο περιβάλλον, και ο ασθενής υπέστη βαθιά δευτέρου βαθμού εγκαύματα στο μέσω του προσώπου. [4]

Άλλη αξιοσημείωτη περίπτωση είναι η πυρκαγιά στις 31 Δεκεμβρίου του 1994 στο Southside Regional medical Center (SRMC) στο Petersburg της Virginia, όπου σκοτώθηκαν τέσσερις ασθενείς και τραυματίστηκαν τρεις πυροσβέστες και αρκετές νοσοκόμες.



Εικόνα 1.6 – Ασθενείς με εγκαύματα από ανάφλεξη θεραπευτικού οξυγόνου [4]

Οι έρευνες έδειξαν ότι η αφητηρία της φωτιάς βρισκόταν στο πάνω μισό μέρος του κρεβατιού ενός ασθενή. Ένας ρυθμιστής οξυγόνου στον τοίχο του δωματίου έλιωσε, ελευθερώνοντας 100% οξυγόνο με απροσδιόριστη ροή. Τελικά οι ερευνητές κατέληξαν ότι η πυρκαγιά προκλήθηκε είτε από κάπνισμα του ασθενή είτε από προσπάθεια χρήσης σπירתων ή αναπτήρα. [4]

1.6 – Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Η διπλωματική εργασία αυτή έχει σα στόχο την υλοποίηση ενός συστήματος ελέγχου της παροχής οξυγόνου για εφαρμογή σε συστήματα οξυγονοθεραπείας. Συγκεκριμένα, το σύστημα θα ανιχνεύει την κατάσταση μίας μάσκας προσώπου, εάν δηλαδή είναι ή όχι σωστά τοποθετημένη στο πρόσωπο του ασθενή. Μόλις η μάσκα θα απομακρύνεται από το πρόσωπο η παροχή του οξυγόνου θα σταματά και θα επανέρχεται εάν η μάσκα φορεθεί πάλι.

Για την υλοποίηση του συστήματος αυτού θα αναζητηθούν κατάλληλοι αισθητήρες για την ανίχνευση της κατάστασης της μάσκας, και κυκλώματα και μέθοδοι επεξεργασίας των δεδομένων που θα λαμβάνονται, για την ολοκλήρωση του ελέγχου.

Το κύριο μέλημα του συστήματος είναι η αποφυγή ατυχημάτων και τραυματισμών από ανάφλεξη του οξυγόνου, όπως παρουσιάστηκαν στα παραδείγματα της παραγράφου 1.5. Όμως, παράλληλα, θα είναι δυνατή και η εξοικονόμηση οξυγόνου, γεγονός που θα εξυπηρετεί ιδιαίτερα τα φορητά συστήματα οξυγονοθεραπείας. Θα γίνει προσπάθεια το σύστημα που θα αναπτυχθεί να είναι εύχρηστο, οικονομικό και να μην αλλάξει τον αναλώσιμο χαρακτήρα των масκών προσώπου.

Στο επόμενο κεφάλαιο, πραγματοποιείται μία έρευνα προς αναζήτηση κατάλληλων τεχνολογιών, μέσω των οποίων θα γίνει η υλοποίηση του συστήματος. Αυτή καταλήγει στην επιλογή τεχνολογίας ανίχνευσης αφής, οι αρχές τις οποίας αναλύονται μαζί με την παρουσίαση του επιλεγμένου ολοκληρωμένου κυκλώματος του αισθητήρα.

Ακολουθεί το πρακτικό κομμάτι που αφορά τις δοκιμές, τις μετρήσεις και τις αποφάσεις που λήφθηκαν και οδηγούν σταδιακά στην τελική και λειτουργική μορφή του συστήματος. Περιγράφονται τα προβλήματα και οι δυσκολίες που προέκυψαν, οι τρόποι επίλυσής τους, και όλη η διαδικασία κατασκευής όπως εξελίχθηκε.

Τέλος, μαζί με τα ανάλογα συμπεράσματα, παρουσιάζονται ορισμένες σκέψεις γύρω από βελτιώσεις που θα μπορούσαν να γίνουν, ώστε να μετατρέψουν το πειραματικό αποτέλεσμα της εργασίας αυτής, σε ένα πιθανό εμπορικό προϊόν.

Κεφάλαιο 2

Αναζήτηση τεχνολογιών

Το πρώτο στάδιο για την ολοκλήρωση του αντικειμένου της εργασίας ήταν η αναζήτηση έργων και ερευνών που έχουν δημοσιοποιηθεί και έχουν παρεμφερές θέμα με αυτό που εξετάζεται ή που περιέχουν χρήσιμες πληροφορίες για κάποιο από τα μέρη του συστήματος που θα υλοποιηθεί.

Ύστερα έπρεπε να γίνει επιλογή της μεθόδου με την οποία θα γινόταν η ανάπτυξη της κατασκευής και να βρεθούν τα κατάλληλα κυκλώματα και αισθητήρες.

Τα βήματα αυτά παρουσιάζονται στις επόμενες σελίδες και αναλύεται η τελική επιλογή της προσέγγισης που ακολουθήθηκε στη συνέχεια.

2.1 – Δημοσιεύσεις

Η δυνατότητα της ανάφλεξης του οξυγόνου και ο κίνδυνος που επιφέρει στα συστήματα οξυγονοθεραπείας είναι γνωστός από τα πρώτα χρόνια ανάπτυξης της μεθόδου. Όμως το πρόβλημα παραμένει, και άρα είναι λογικό να θεωρηθεί η πιθανότητα να έχουν γίνει ήδη μελέτες για την αντιμετώπισή του.

Η αναζήτηση ερευνών με αντικείμενο την πρόληψη της ανάφλεξης κατά την παροχή οξυγονοθεραπείας, έγινε μέσω εξειδικευμένων μηχανών αναζήτησης του διαδικτύου. Συγκεκριμένα, οι σελίδες που χρησιμοποιήθηκαν είναι το PubMed.gov (www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed), το ScienceDirect (www.sciencedirect.com), το Scopus (www.scopus.com) και το Google Scholar (scholar.google.gr).

Η αναζήτηση έγινε δίνοντας προτεραιότητα στις δημοσιεύσεις των τελευταίων ετών αλλά χωρίς να περιορίζεται σε αυτά. Αρχικά, εστιάστηκε στην ανεύρεση έργων με αντικείμενο που να αφορά συστήματα ελέγχου παροχής οξυγόνου. Εδώ χρησιμοποιήθηκαν διάφορες λέξεις και φράσεις κλειδιά, με κύρια την “oxygen”, ακολουθούμενη από άλλες όπως “control system”, “check”, “oxygen therapy”, “source”, “supply”, “valve”, κ.α.

Εικόνα 2.1 – Αποτελέσματα αναζήτησης στο ScienceDirect για τις λέξεις “oxygen”, “control” και “system” στο έτος 2016.

Στο σημείο αυτό βρέθηκαν εργασίες που να ασχολούνται με τον έλεγχο της ροής οξυγόνου σε συστήματα οξυγονοθεραπείας κυρίως παθητικά, όπως δηλαδή λειτουργούν τα περισσότερα συστήματα που χρησιμοποιούνται. Δεν υπήρξαν όμως αποτελέσματα που να έχουν ως στόχο τον ενεργό και πλήρη έλεγχο της παροχής οξυγόνου σε σχέση πάντα με τις κινήσεις του ασθενή.

Εικόνα 2.2 – Αποτελέσματα αναζήτησης στο PubMed για τις λέξεις “oxygen”, “supply” και “control” στα τελευταία πέντε έτη.

Στη συνέχεια η αναζήτηση στράφηκε προς άρθρα που αφορούν μάσκες οξυγόνου και τον κίνδυνο της ανάφλεξης. Τώρα μερικές από τις λέξεις κλειδιά που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι “oxygen mask”, “face”, “contact”, “oxygen burn”, “smoking”, “cigarettes”.

The screenshot shows the Scopus search results interface. At the top, the search criteria are displayed: TITLE-ABS-KEY (oxygen AND mask AND contact) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR, 2013)) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, "ENGI")). The search results are filtered to show 3 documents from 2013 in the Engineering subject area. The results table is as follows:

Document title	Authors	Year	Source	Cited by
1 Quantitative measurement of sugar concentration using in house fabricated microgap biosensor	Sharma Rao, B., Nurfaiz, M., Hashim, U.	2013	Proceedings - RSM 2013: 2013 IEEE Regional Symposium on Micro and Nano Electronics 6706471, pp. 54-57	2
2 Fabrication of hundreds of field effect transistors on a single carbon nanotube for basic studies and molecular devices	Zhang, X., Chenet, D., Kim, B., (...), Nuckolls, C., Hone, J.	2013	Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures 31(6),6F101	4
3 Fabrication of vertical nanowire resonators for aerosol exposure assessment	Merzsch, S., Wasisto, H.S., Stranz, A., (...), Peiner, E.	2013	Proceedings of SPIE - The International Society for Optical	0

Εικόνα 2.3 – Αποτελέσματα αναζήτησης στο Scopus για τις λέξεις “oxygen”, “mask” και “contact” στο έτος 2013 και για τεχνικά θέματα (engineering).

Εδώ, βρέθηκαν αρκετές δημοσιεύσεις που κατέγραφαν στοιχεία και στατιστικά γύρω από τους κινδύνους και τα ατυχήματα που αφορούν τη συνύπαρξη της λήψης θεραπευτικού οξυγόνου και του καπνίσματος, κάποια από τα οποία συμπεριλήφθηκαν στο προηγούμενο εισαγωγικό κεφάλαιο.

Ακόμα στα αποτελέσματα των αναζητήσεων υπήρχαν μελέτες που αφορούσαν την κατασκευή και το σχεδιασμό των μασκών οξυγόνου, και αν και δεν αφορούσαν άμεσα το αντικείμενο αυτής της εργασίας, η ανάγνωσή τους προσέφερε ιδέες που βοήθησαν στην ανάπτυξη της.

Παρόλα αυτά, η πλειοψηφία των δημοσιεύσεων που βρέθηκαν είχαν να κάνουν κυρίως με ιατρικό περιεχόμενο, όπως αποφυγή μολύνσεων και μετάδοση ασθενειών, ή ασχολούνταν με τα συστήματα παροχής οξυγόνου.

Κάποια άμεσα σχετιζόμενη έρευνα, με το θέμα που εξετάζεται εδώ, δεν βρέθηκε. Από το γεγονός αυτό βγήκε το συμπέρασμα ότι η ανάπτυξη του συστήματος ελέγχου της παροχής οξυγόνου με ανίχνευση της κατάστασης μίας μάσκας προσώπου, πρέπει να γίνει από την αρχή, ψάχνοντας τρόπους υλοποίησής της και μελετώντας τα αποτελέσματα.

The screenshot shows a Google Scholar search for "oxygen burn smoking" with approximately 33,300 results. The results list several articles, including:

- Domiciliary oxygen and smoking: an explosive combination** (Muehlberger, MA Smith, L Wong, 1998) - ScienceDirect.com
- Smoking and home oxygen therapy—a preventable public health hazard** (Edelman, S Maleyko-Jacobs, 2008) - journals.lww.com
- Review of burn injuries secondary to home oxygen** (Murabit, EE Tredget, 2012) - journals.lww.com
- Home oxygen therapy: adjunct or risk factor?** (Rohde, ES Hingness, DO Hershko, 2003) - journals.lww.com
- Smoking articles having a reduced free burn time** (Norman, AM Ihng, 1984) - Google Patents
- A hazard of home oxygen therapy** (Chang, CA Lipinski, HF Sherman, 2001) - journals.lww.com

Εικόνα 2.4 – Αποτελέσματα αναζήτησης στο Google Scholar για τις λέξεις “oxygen”, “burn” και “smoking”.

2.2 – Τεχνολογίες αισθητήρων

Η ανίχνευση της κατάστασης της μάσκας οξυγόνου, εάν δηλαδή είναι σωστά τοποθετημένη στο πρόσωπο του ασθενή ή όχι, θα πρέπει να γίνει μέσω κάποιου ή κάποιων αισθητήρων. Υπάρχουν πολλές τεχνολογίες οι οποίες θεωρητικά θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτό το σκοπό. Εδώ, θα αναφερθούν οι κυριότερες που λήφθηκαν υπόψιν καθώς και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μίας.

Αισθητήρες πίεσης

Οι αισθητήρες πίεσης λειτουργούν ως μετατροπείς, παράγοντας ηλεκτρικό σήμα ή μεταβάλλοντας τις ηλεκτρικές τους ιδιότητες σε συνάρτηση με την πίεση που τους ασκείται. [6]

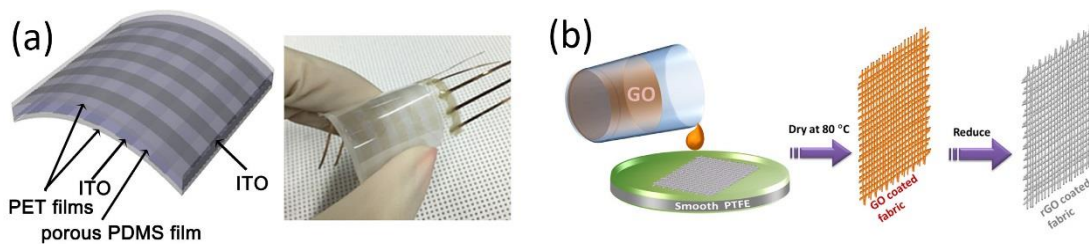
Όταν μία μάσκα οξυγόνου τοποθετείται στο πρόσωπο του ασθενή είναι λογικό να ασκείται πίεση προς αυτήν από το δέρμα. Η τοποθέτηση αισθητήρων πίεσης στα σημεία επαφής της μάσκας και του δέρματος ήταν η πρώτη ιδέα προσέγγισης της κατασκευής.

Οι εμπορικοί αισθητήρες αυτού του τύπου είναι είτε άκαμπτοι με μερικά χιλιοστά πάχος ή λεπτοί και εύκαμπτοι με διάμετρο όμως της τάξης του 1cm. Η τοποθέτηση αρκετών τέτοιων στοιχείων στην επιφάνεια της μάσκας θα την καθιστούσαν πιθανότατα άβολη στη χρήση.



Εικόνα 2.5 – Αισθητήρες πίεσης^{3, 4}

Βρέθηκαν δημοσιεύσεις για πειραματικούς αισθητήρες πίεσης που ίσως να ήταν ικανοί να χρησιμοποιηθούν αλλά ήταν αδύνατο, στα πλαίσια αυτής της εργασίας, να αναπαραχθούν.



Εικόνα 2.6 – Πειραματικοί αισθητήρες πίεσης, (α) από διηλεκτρικό ελαστομερές φιλμ με μικροπόρους και (β) από ίνες νηλον εμπλουτισμένες με μειωμένο οξείδιο του γραφενίου^{5, 6}

Ανίχνευση αναπνευστικού ρυθμού

Πολλά σύγχρονα συστήματα αναπνευστικής υποβοήθησης, όπως τα CPAP (Continuous Positive Airway Pressure) και PEEP (Positive End-Expiratory Pressure), έχουν τη δυνατότητα ανίχνευσης του αναπνευστικού ρυθμού του ασθενή ώστε να προσφέρουν τη ελάχιστη απαιτούμενη στήριξη ακολουθώντας τις προσπάθειες εκείνου. [7] [8]

Η μέθοδος αυτή αν και έχει μελετηθεί εκτεταμένα και θα μπορούσε να ανιχνεύσει την παύση της αναπνοής, και άρα την απομάκρυνση της μάσκας, θα είχε πολύ αργή απόκριση για την εφαρμογή που ερευνάται εδώ, καθώς αυτού του τύπου τα συστήματα λαμβάνουν υπόψιν και αναπνευστικές παύσεις.

Οπτοηλεκτρονική

Η οπτοηλεκτρονική αφορά τις ηλεκτρονικές συσκευές και συστήματα που παράγουν, ανιχνεύουν και ελέγχουν φως. Η ανίχνευση θέσης μέσω οπτικής τεχνολογίας βρίσκει

³ https://www.kistler.com/fileadmin/user_upload/products/media/933-972_web.png

⁴ <http://www.ladyada.net/images/midisense/sensors/all3fsr500.jpg>

⁵ B. Y. Lee, J. Kim, H. Kim, C. Kim, and S. D. Lee, "Low-cost flexible pressure sensor based on dielectric elastomer film with micro-pores," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 240, pp. 103–109, 2016.

⁶ Y. Abdul Samad *et al.*, "From sewing thread to sensor: Nylon?? fiber strain and pressure sensors," *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 240, pp. 1083–1090, 2017.

εφαρμογή σε πολλά συστήματα διαφόρων τύπων, από συσκευές μέτρησης αποστάσεων έως έλεγχο ρομποτικών συστημάτων. [9]

Η χρήση τέτοιου τύπου τεχνολογίας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση της απόστασης της μάσκας από το πρόσωπο του ασθενή, π.χ. με χρήση led υπέρυθρου φωτός και φωτοτρανζίστορ ανίχνευσης.



Εικόνα 2.7 – (α) Σχεδιάγραμμα των βασικών αρχών ανίχνευσης απόστασης μέσω οπτικής τεχνολογίας και (β) παραδείγματα εμπορικών ζευγών υπέρυθρου led και φωτοτρανζίστορ. ^{7, 8, 9}

Η υιοθέτηση αυτής της μεθόδου όμως παρουσιάζει αρκετά μειονεκτήματα. Τα ηλεκτρονικά στοιχεία ανίχνευσης θα έπρεπε να τοποθετηθούν άμεσα στη μάσκα, πράγμα που θα μεγάλωνε το κόστος της. Ο έλεγχος πολλαπλών σημείων θα εμφάνιζε μεγάλες δυσκολίες καθώς θα έπρεπε να απομονωθούν τα οπτικά ζεύγη ώστε να μην παρεμβάλουν μεταξύ τους. Τέλος, οι μάσκες οξυγόνου κατασκευάζονται από ελαστικά διαφανή πολυμερή μέσω των οποίων πιθανόν να υπήρχε εμφάνιση παρεμβολών από εξωτερικούς παράγοντες.

Θερμοκρασία και υγρασία

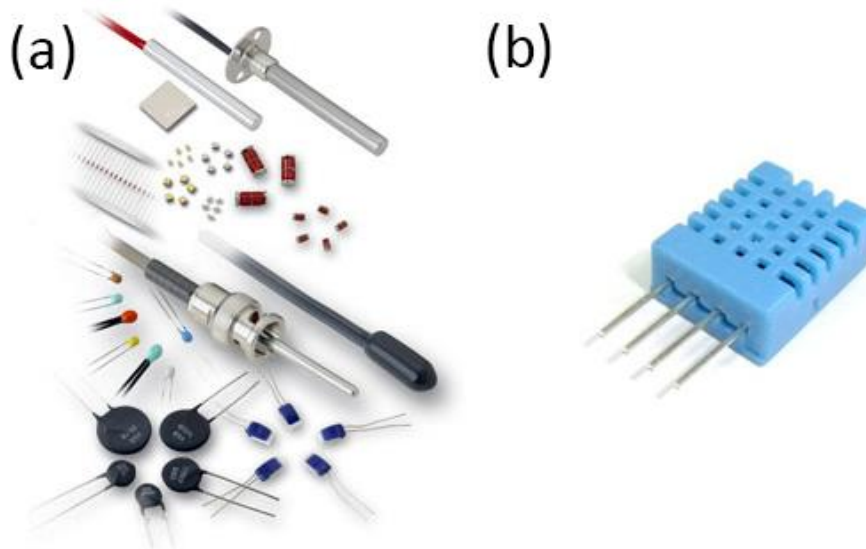
Στα σημεία επαφής της μάσκας με το πρόσωπο μπορεί να ανιχνευθεί η διαφορά της θερμοκρασίας λόγω του δέρματος του ασθενή σε σχέση με το περιβάλλον. Η προσέγγιση αυτή εμφάνιζε ενδιαφέρον καθώς υπάρχουν ηλεκτρονικοί αισθητήρες θερμοκρασίας αρκετά μικροί ώστε να τοποθετηθούν στη μάσκα (π.χ. θερμίστορ), και ιδιαίτερα ευαίσθητοι ώστε να μπορούν να αποδώσουν ικανές μετρήσεις χωρίς άμεση επαφή με το δέρμα. Όμως και εδώ, η απόκριση μετά από απομάκρυνση της μάσκας δεν είναι αρκετά γρήγορη ώστε να μπορεί να λειτουργήσει σωστά στην εφαρμογή που εξετάζεται.

Το ίδιο ακριβώς πρόβλημα θα εμφάνιζε και η χρήση αισθητήρων υγρασίας για την ανίχνευση της αλλαγής αυτής στο εσωτερικό της μάσκας λόγω των εκπνεόμενων αερίων.

⁷ <http://www.rfwireless-world.com/images/Infrared-sensor.jpg>

⁸ <https://www.parallax.com/sites/default/files/styles/full-size-product/public/28995.png?itok=jAhoGU2d>

⁹ <https://www.mgsuperlabs.co.in/estore/image/cache/data/MGSL/IR%20Sensor%20tcs-500x500.jpg>



Εικόνα 2.8 – (α) Αισθητήρες θερμοκρασίας, (β) τυπικός αισθητήρας υγρασίας^{10, 11}

Ανίχνευση αφής

Τέλος, εξετάστηκε η περίπτωση των αισθητήρων αφής. Η συγκεκριμένη τεχνολογία ερευνάται έντονα τα τελευταία χρόνια και έχει αναπτυχθεί σημαντικά. Οι δύο πιο διαδεδομένοι τύποι ανίχνευσης αφής είναι μέσω υπολογισμού αντίστασης και χωρητικότητας. Από αυτούς το μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο δεύτερος καθώς είναι πιο άμεσος και παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία.

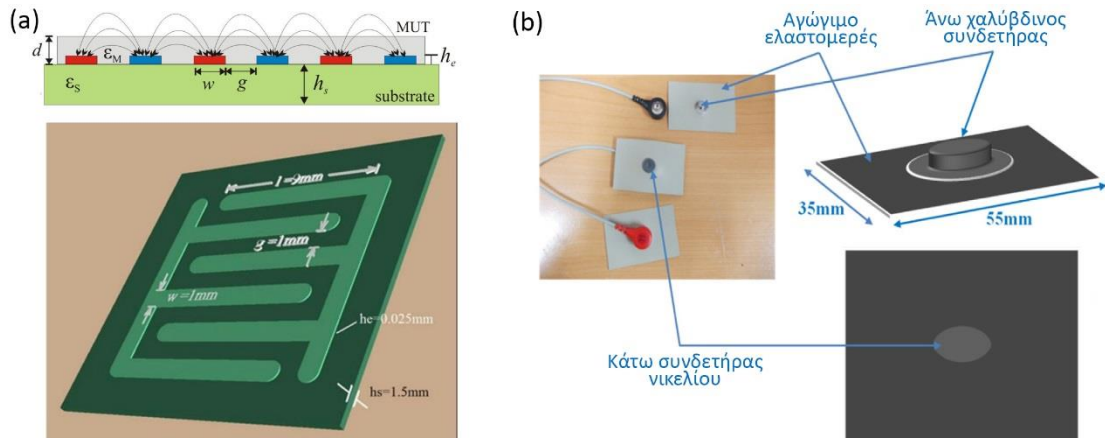
Έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι ανίχνευσης αφής μέσω χωρητικότητας, άλλες που κάνουν χρήση ψηφιακών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και άλλες που χρησιμοποιούν “απλές” αγώγιμες διατάξεις. Σε κάθε περίπτωση, η ανίχνευση αφής μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω επαφών που μπορούν να έχουν πολύ μικρό μέγεθος και ανάλογα με την εφαρμογή και οποιοδήποτε σχήμα.

Η αίσθηση χωρητικότητας βασίζεται στη χωρητική σύζευξη η οποία λαμβάνει ως είσοδο τη χωρητικότητα που παράγεται από το ανθρώπινο σώμα. Προσφέρει μία πιο αξιόπιστη λύση για εφαρμογές μέτρησης επιπέδου υγρών, σύνθεσης υλικών, μηχανικών κουμπιών και διεπαφές ανθρώπου-μηχανής. [10]

Στο σημείο αυτό η χρήση αυτής της μεθόδου φαινόταν ιδανική για την εφαρμογή που εξετάζεται, αν και όπως φαίνεται στο κεφάλαιο 4, εμφανίστηκαν αρκετές δυσκολίες κατά την ανάπτυξη του τελικού συστήματος.

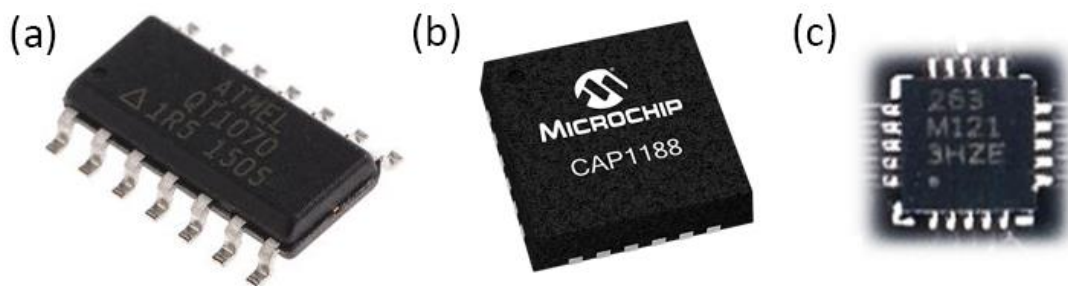
¹⁰ <http://www.ussensor.com/sites/default/files/NTC-thermistor-group.jpg>

¹¹ <http://rotexindia.in/wp-content/uploads/2016/08/humidity-sensor.jpg>



Εικόνα 2.9 – (α) Διάταξη αγώγιμου υλικού για ανίχνευση αφής, (β) πειραματικό αγώγιμο ελαστομερές για ανίχνευση αφής από γυαλί με επίστρωση άργυρου (Ag/G)^{12,13}

Εξετάστηκαν διάφορες λύσεις για την ανίχνευση αφής, είτε πειραματικές είτε εμπορικές. Τελικά επιλέχθηκε το ολοκληρωμένο κύκλωμα ανίχνευσης αφής MPR121 της εταιρίας Freescale Semiconductors. Πέρα από το γεγονός ότι παρέχει πολλές δυνατότητες, και είναι εμπορικά διαθέσιμος, ο βασικός λόγος επιλογής του έναντι άλλων αντίστοιχων κυκλωμάτων ήταν ο αριθμός των εισόδων του, που αν και αρχικά δεν ήταν γνωστό πόσες από αυτές θα ήταν απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν, θεωρήθηκε σκόπιμο να είναι πολλές ώστε να υπάρχει ευελιξία επιλογών.



Εικόνα 2.10 – Ολοκληρωμένα κυκλώματα ανίχνευσης αφής μέσω χωρητικότητας, (α) AT42QT1070, (β) CAP1188, (γ) MPR121^{14, 15, 16}

Οι αισθητήρες αφής αυτού του τύπου χρησιμοποιούν αγώγιμα ηλεκτρόδια στα οποία μετρείται η χωρητικότητά τους και βάσει των μεταβολών αυτής κρίνεται εάν υπάρχει ή όχι επαφή. Οι αρχές της μεθόδου παρουσιάζονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.

¹² A. Guadarrama-Santana, A. García-Valenzuela, F. Pérez-Jiménez, and L. Polo-Parada, "Interdigitated capacitance sensors in the mm scale with sub-femtoFarad resolution suitable for monitoring processes in liquid films," *Rev. Mex. Fis.*, vol. 60, no. 6, pp. 451–459, 2014.

¹³ P. S. Das and J. Y. Park, "A flexible touch sensor based on conductive elastomer for biopotential monitoring applications," *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 33, pp. 72–82, 2017.

¹⁴ http://www.microchip.com/_images/ics/medium-CAP1188-VQFN-24.png

¹⁵ <http://media1.rsdelivers.com/LargeProductImages/F7380167-01.jpg>

¹⁶ <http://my-live-01.slatic.net/p/2/mpr121-breakout-v12-capacitive-touch-sensor-controller-module-i2ckeyboard-9636-8275403-1.jpg>

Κεφάλαιο 3

Ο αισθητήρας αφής MPR121

Το ολοκληρωμένο κύκλωμα MPR121 σχεδιάστηκε από την εταιρία Freescale Semiconductor και πλέον διατίθεται από την NXP Semiconductors. Στο κεφάλαιο αυτό αποδίδονται όλες οι πληροφορίες που χρειάζονται για να γίνει κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας του και οι λεπτομέρειες εκείνες που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάπτυξη του συστήματος, όπως αναγράφονται στο datasheet του αισθητήρα καθώς και σε ορισμένες σημειώσεις εφαρμογών (application notes). [11]

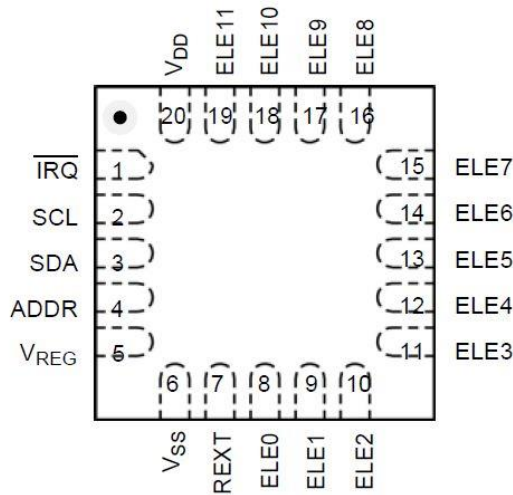
3.1 – Γενικά



Εικόνα 3.1 – Ο αισθητήρας αφής MPR121

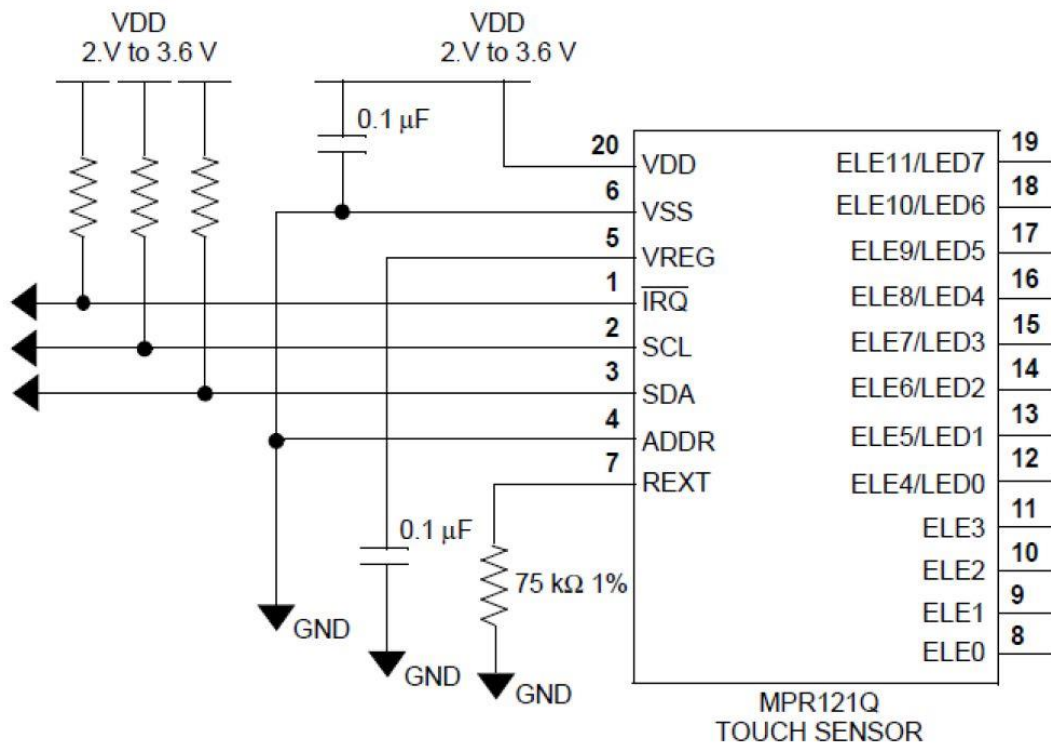
Για την ανίχνευση της επαφής των ηλεκτροδίων με το δέρμα του ασθενούς επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το ολοκληρωμένο κύκλωμα MPR121 της εταιρίας Freescale Semiconductor. Το κύκλωμα αυτό έχει δυνατότητα σύνδεσης έως και δώδεκα εισόδων στις οποίες η επαφή ελέγχεται μέσω της χωρητικότητας που αναπτύσσεται μεταξύ του κάθε ηλεκτροδίου και της γης (ή ουδέτερου σημείου) του κυκλώματος.

Το MPR121 τροφοδοτείται με 1.71 – 3.6 V και καταναλώνει 29 μ A για διάστημα δειγματοληψίας 16 ms. Στην εφαρμογή επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί τάση τροφοδοσίας 3.3 V ώστε να είναι κοινή και για τον μικροελεγκτή. Το κύκλωμα σύνδεσης του MPR121 φαίνεται στο επόμενο σχεδιάγραμμα.



Εικόνα 3.2 – Οι συνδέσεις του MPR121

Το MPR121 έχει δυνατότητα σειριακής επικοινωνίας και μεταφοράς δεδομένων με άλλα συστήματα (στη συγκεκριμένη περίπτωση τον μικροελεγκτή) μέσω των γραμμών SDA και SCL χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο I²C στη διεύθυνση 0x5A (με διαφορετική σύνδεση της γραμμής ADDR μπορεί να λειτουργήσει στις διευθύνσεις 0x5B, 0x5C ή 0x5D).



Εικόνα 3.3 – Συνδεσμολογία του MPR121 για τάση τροφοδοσίας από 2.0 V έως 3.6 V

3.2 – Στοιχεία λειτουργίας

Αρχικά οι είσοδοι του MPR121 συνδέονται σε έναν πολυπλέκτη ώστε η μέτρηση της χωρητικότητας να γίνεται σειριακά. Η τιμή που μετριέται μπορεί να είναι συνδυασμός παρασιτικής χωρητικότητας του περιβάλλοντος και εκείνης του δέρματος. Στη συνέχεια η τιμή αυτή περνά από έναν μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό και αποδίδεται σε δυαδικό μορφή 10 ψηφίων, προτού φιλτραριστεί και αποθηκευτεί στον αντίστοιχο καταχωρητή της συσκευής.

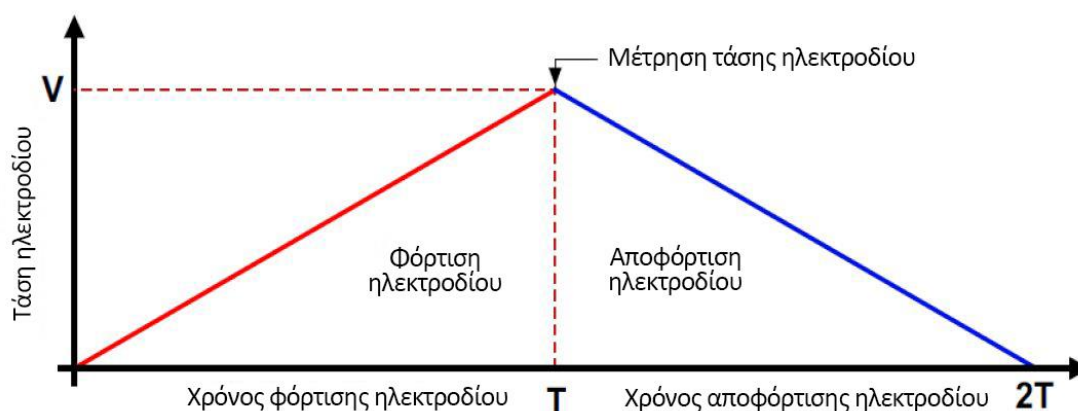
Λήψη μετρήσεων

Η χωρητικότητα στα ηλεκτρόδια υπολογίζεται μέσω της τάσης που αναπτύσσεται σε αυτά μέσα σε ένα χρονικό διάστημα που ορίζεται από 0.5μs ως 32μs κατά το οποίο τροφοδοτούνται με σταθερό ρεύμα από 1μΑ ως 63μΑ, βάσει του τύπου:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{I \times T}{V}$$

όπου C η υπό υπολογισμό χωρητικότητα, Q το φορτίο που αποδίδεται στο ηλεκτρόδιο, V η μετρήσιμη τάση, I το ρεύμα τροφοδοσίας και T η διάρκεια φόρτισης.

Κάθε κανάλι εισόδου φορτίζεται και αποφορτίζεται πλήρως ως προς τη γη πριν ξεκινήσει η μέτρηση του επομένου ηλεκτροδίου. Όταν μια είσοδος βρίσκεται στην περίοδο φόρτισης/αποφόρτισης και μέτρησης, οι υπόλοιπες είναι βραχυκυκλωμένες στη γη.



Εικόνα 3.4 – Μέτρηση Χωρητικότητας

Το εύρος τάσης στα κανάλια εισόδου που μπορεί να αναγνωσθεί από το σύστημα είναι 0.7 V έως $(V_{DD} - 0.7 V)$. Όπου V_{DD} η τάση τροφοδοσίας του αισθητήρα. Αυτό σημαίνει ότι για συγκεκριμένη τάση τροφοδοσίας το εύρος των τιμών που μπορεί να αναγνωσθεί δίνεται από τις επόμενες εξισώσεις. [12]

$$ADC_{low} = \frac{0.7}{V_{DD}} (1024)$$

και

$$ADC_{high} = \frac{V_{DD} - 0.7}{V_{DD}} (1024)$$

Όπως μπορεί εύκολα να αποδειχθεί, το άθροισμα των αποτελεσμάτων των δύο αυτών εξισώσεων είναι πάντοτε 1024, και άρα η μέση μετρούμενη τιμή θα είναι πάντα 512. Στον πίνακα 3.1, δίνεται το εύρος των έγκυρων μετρούμενων τιμών, για διάφορες τιμές τάσης.

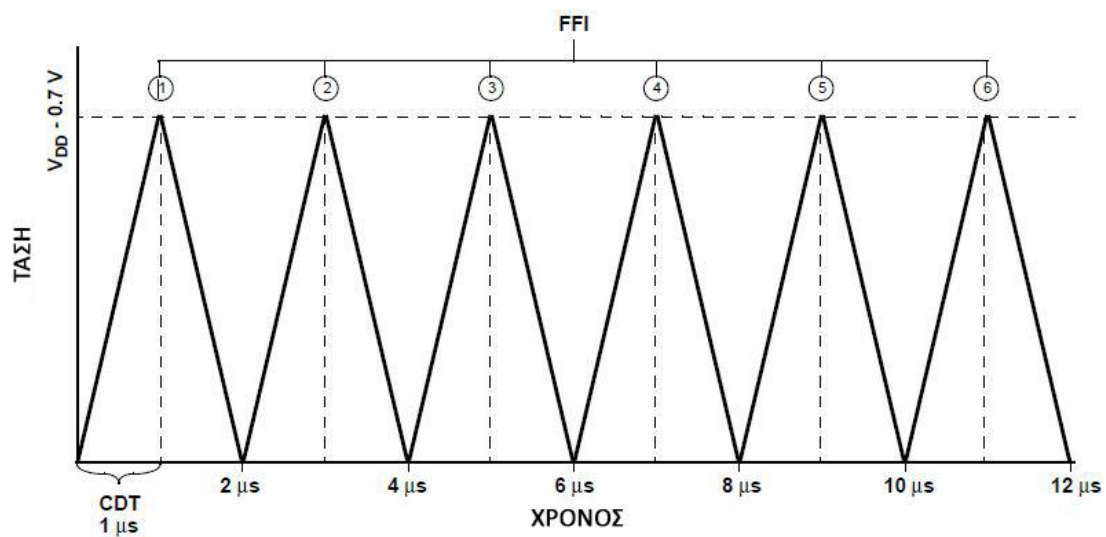
Πίνακας 3.1 – Εύρος έγκυρων μετρούμενων τιμών εισόδων

V_{DD} (V)	ADC_{low}	ADC_{mid}	ADC_{high}
1.8	398.222	512	625.778
3	238.933	512	785.067
3.3	217.212	512	806.788

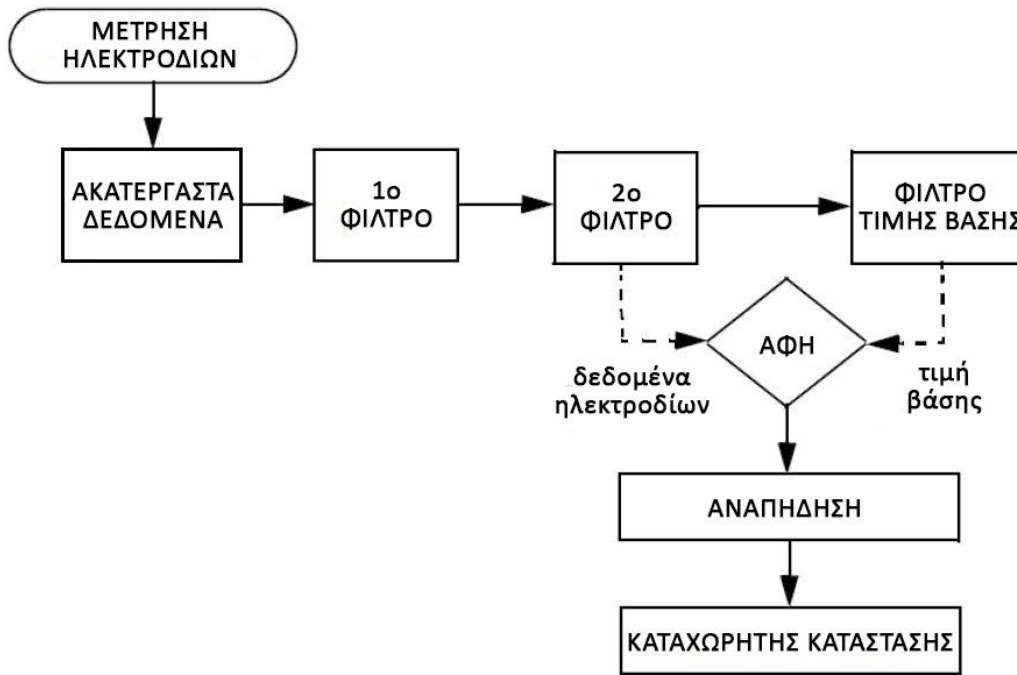
Τρία επίπεδα φιλτραρίσματος

Η τιμή που μετριέται και λαμβάνεται από τον αναλογικό/ψηφιακό μετατροπέα περνά από τρία επίπεδα φιλτραρίσματος για να αποβληθεί ο θόρυβος υψηλών και χαμηλών συχνοτήτων.

Το φίλτρο πρώτου επιπέδου αποτελείται από ένα απλό φίλτρο τρέχουσας μέσης τιμής, στο οποίο υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης του αριθμού δειγμάτων που χρησιμοποιεί (βλ. Καταχωρητής AFE Configuration 1 (0x5C)). Το φίλτρο θα λάβει όσες τιμές ορίζεται από τον καταχωρητή 0x5C, θα απορρίψει την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή και θα επιστρέψει τη μέση τιμή των υπολοίπων προς το φίλτρο 2^ο επιπέδου.

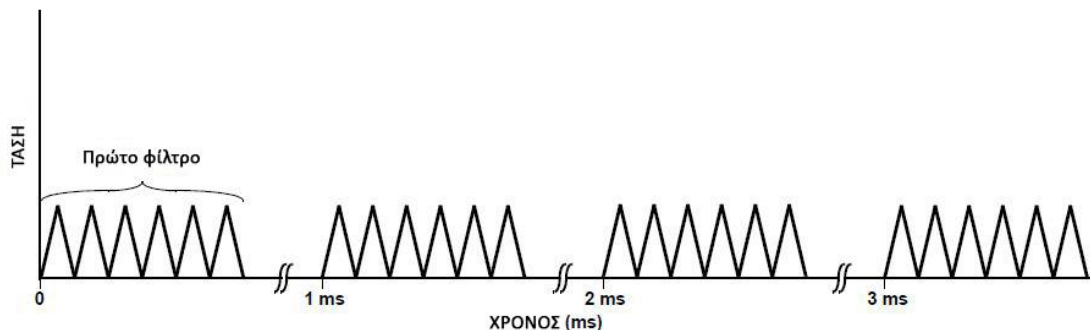


Εικόνα 3.5 – Παράδειγμα φίλτρου 1^{ου} επιπέδου για λήψη 6 δειγμάτων με χρόνο φόρτισης 1μs



Εικόνα 3.6 – Επεξεργασία δεδομένων

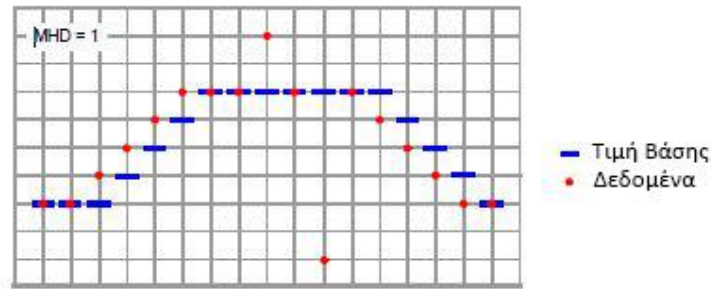
Στο φίλτρο δεύτερου επιπέδου εκτός από τον αριθμό των δειγμάτων μπορεί να ορισθεί και η περίοδος κατά την οποία θα λαμβάνονται (βλ. Καταχωρητής AFE Configuration 2 (0x5D)). Το αποτέλεσμα είναι η άμεση χωρητικότητα που μετρείται σε κάθε είσοδο.



Εικόνα 3.7 – Παράδειγμα φίλτρου 2^{ου} επιπέδου για λήψη 4 δειγμάτων κάθε 1ms

Το φίλτρο τρίτου επιπέδου ανιχνεύει διαφοροποιήσεις ακόμα χαμηλότερων συχνοτήτων που οφείλονται σε μεταβολές του περιβάλλοντος όπως η ατμοσφαιρική υγρασία και η σκόνη. Η τιμή που ορίζεται από αυτό είναι η χωρητικότητα που αναμένεται σε κάθε ηλεκτρόδιο όταν είναι ελεύθερο (δεν υπάρχει επαφή). Με βάση της τιμής αυτής και των ρυθμίσεων από το χρήστη, ορίζεται η διαφορά της χωρητικότητας όπου ανιχνεύεται η επαφή και η απελευθέρωση των ηλεκτροδίων. [13]

Το MPR121 έχει δυνατότητα αυτόματης μεταβολής των ρυθμίσεων του φίλτρου τρίτου επιπέδου ώστε να μην είναι απαραίτητη η συνεχής παρακολούθηση των περιβαλλοντικών συνθηκών. [14]



Εικόνα 3.8 – Παράδειγμα μεταβολής της τιμής βάσης του φίλτρου 3^{ου} επιπέδου σε μικρές μεταβολές της μετρούμενης τιμής

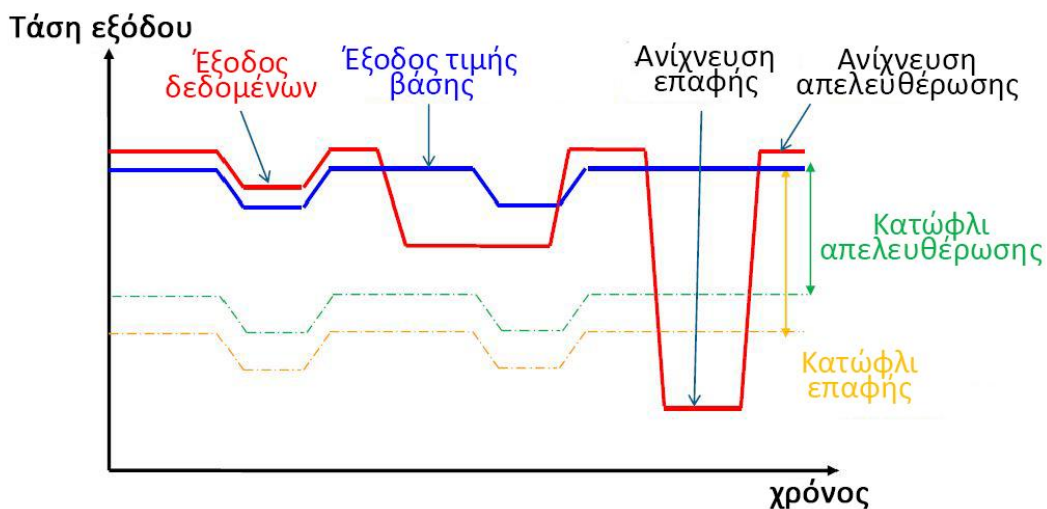
Σημείωση: Το αρκτικόλεξο “AFE” προέρχεται από τις λέξεις “Analog Front End”, των οποίων η σημασία αντιστοιχεί στα συνδεδεμένα στη συσκευή ηλεκτρόδια.

Αυτόματη ρύθμιση ηλεκτροδίων

Το κύκλωμα MPR121 έχει τη δυνατότητα, βάσει των επιλογών του χρήστη, να ρυθμίζει το ρεύμα και το χρόνο φόρτισης των ηλεκτροδίων κατάλληλα με αποτέλεσμα της βελτίωσης της απόκρισης του συστήματος αυτόματα, μειώνοντας την ανάγκη δοκιμών για τη εύρεση των βέλτιστων τιμών.

Ανίχνευση επαφής και απελευθέρωσης

Η επαφή και η απελευθέρωση διαπιστώνεται συγκρίνοντας τη στιγμιαία τιμή της χωρητικότητας στο ηλεκτρόδιο με την τιμή βάσης που λαμβάνεται από την έξοδο του φίλτρου 3^{ου} επιπέδου. Εάν η διαφορά ξεπερνά τα όρια που έχουν τεθεί, τότε ανιχνεύεται μία κατάσταση επαφής ή απελευθέρωσης και καταγράφεται στον κατάλληλο καταχωρητή. Το όρια επαφής και απελευθέρωσης είναι ανεξάρτητα και προγραμματίζονται ξεχωριστά για κάθε ηλεκτρόδιο. Υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης για την αντιμετώπιση του φαινομένου της αναπήδησης ώστε να επιτυγχάνεται επιπλέον μείωση θορύβου.



Εικόνα 3.9 – Ανίχνευση επαφής και απελευθέρωσης

Κατάσταση λειτουργίας και παύσης

Αφού ολοκληρωθεί το power on reset (POR), το MPR121 βρίσκεται σε κατάσταση παύσης χωρίς να κάνει καμία μέτρηση χωρητικότητας. Το σύστημα μπορεί να τεθεί σε κατάσταση λειτουργίας όταν τα bit D5 – D0 στον Καταχωρητή *Electrode Configuration* (ECR, 0x5E) δεν είναι όλα μηδενικά που υποδεικνύει ότι ένα από τα 13 κανάλια μέτρησης είναι ενεργό. Το MPR121 μπορεί να τεθεί ξανά σε κατάσταση παύσης γράφοντας 2bXX000000 στον καταχωρητή ECR.

Σε κατάσταση λειτουργίας, το MPR121 χρησιμοποιεί μία μηχανή κατάστασης η οποία το ενεργοποιεί περιοδικά για τη μέτρηση της χωρητικότητας, το φιλτράρισμα και την ανάλυση των δεδομένων, και για την ανίχνευση της επαφής ή της απελευθέρωσης των ηλεκτροδίων. Κατά την περίοδο αναμονής ανάμεσα στις μετρήσεις το MPR121 καταναλώνει ελάχιστο ρεύμα, έτσι η μέση κατανάλωση υπολογίζεται από τη συχνότητα των μετρήσεων και τον αριθμό των καναλιών που είναι ενεργοποιημένα. Το MPR121 μπορεί να ρυθμιστεί για περίοδο δειγματοληψίας μεταξύ 1 ms και 128 ms. Ο χρήστης μπορεί να κάνει συμβιβασμούς ανάμεσα στην απόρριψη θορύβου, στο χρόνο απόκρισης αφής και στην κατανάλωση ισχύος.

3.3 – Περιγραφή καταχωρητών

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι καταχωρητές που ενδιαφέρουν την περάτωση της εργασίας.

Touch Status Registers (0x00, 0x01)

Αυτοί οι δύο καταχωρητές διατηρούν την κατάσταση επαφής/απελευθέρωσης καθενός από τα ηλεκτρόδια. Ο ρυθμός ανανέωσης αυτών των bit κατάστασης θα είναι {ESI x SFI}.

ELE0 - ELE7 Touch Status (0x00)

Bit	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Ανάγνωση	E7TS	E6TS	E5TS	E4TS	E3TS	E2TS	E1TS	E0TS
Εγγραφή								

ELE8 – ELE12 Touch Status (0x01)

Ανάγνωση	OVCF	0	0	E12TS	E11TS	E10TS	E9TS	E8TS
Εγγραφή	1							

ExTS: Bit κατάστασης επαφής ή απελευθέρωσης κάθε καναλιού (Μόνο για ανάγνωση).
1, το συγκεκριμένο κανάλι βρίσκεται σε επαφή.
0, το ηλεκτρόδιο είναι ελεύθερο.

OVCF: Σημαία υπερβολικού ρεύματος (Για ανάγνωση και εγγραφή).
1, υπερβολικό ρεύμα ανιχνεύτηκε στην επαφή REXT.
0, κανονική κατάσταση.

Όταν ανιχνευθεί υπερβολικό ρεύμα, το MPR121 τίθεται αμέσως σε κατάσταση παύσης που μπορεί να αλλάξει εάν γραφτεί “1” στο OVCF και τα κατάλληλα bit στον καταχωρητή ECR.

Out of Range Status Registers (0x02, 0x03)

Το MPR121 ελέγχει τα δεδομένα από τα ηλεκτρόδια μετά από τις ενέργειες AUTO-CONFIG ή AUTO-RECONFIG καθώς και κατά την κανονική μέτρηση. Εάν αυτά τεθούν εκτός ορίων τότε το ανάλογο bit στους καταχωρητές **0OR0** και **0OR1** γίνεται “1” για να υποδείξει σφάλμα στο ηλεκτρόδιο. Μία πιθανή περίπτωση που μπορεί να σημάνει ένα σφάλμα OOR (Out Of Range – Εκτός Ορίων) είναι εάν ένα ηλεκτρόδιο βραχυκυκλωθεί με τη γη. Τα όρια των αποδεκτών τιμών μπορούν να προγραμματιστούν μέσω των καταχωρητών USL και LSL. Τα bits των καταχωρητών **0OR** καθαρίζονται έπειτα από AUTO-CONFIG, AUTO-RECONFIG ή από έναν έλεγχο ορίων. Αυτοί οι δύο καταχωρητές είναι μόνο για ανάγνωση, ο χρήστης δεν μπορεί να αλλάξει τα περιεχόμενά τους.

OUT OF RANGE Register 0 (0x02)

Bit	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Ανάγνωση	0OR7	0OR6	0OR5	0OR4	0OR3	0OR2	0OR1	0OR0
Εγγραφή								

OUT OF RANGE Register 1 (0x03)

Ανάγνωση	ACFF	ARFF	0	0OR12	0OR11	0OR10	0OR9	0OR8
Εγγραφή								

0ORx: 1, Εμφάνιση σφάλματος OOR στο αντίστοιχο κανάλι.
0, Κανένα σφάλμα OOR.

ACFF: AUTO-CONFIG Fail Flag. Ορίζεται έπειτα από αποτυχία ενός AUTO-CONFIG.

ARFF: AUTO-RECONFIG Fail Flag. Ορίζεται έπειτα από αποτυχία ενός AUTO-RECONFIG.

Electrode Data Registers (0x04 - 0x1D)

Electrode Data Low Byte ExFDL and High Byte ExFDH

Bit	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Ανάγνωση	ExFD7	ExFD6	ExFD5	ExFD4	ExFD3	ExFD2	ExFD1	ExFD0
Εγγραφή								

Ανάγνωση	0	0	0	0	0	0	ExFD9	ExFD8
Εγγραφή								

ExFDL, ExFDH: Κάθε ένα από τα 13 κανάλια έχει δύο καταχωρητές στους οποίους αποθηκεύονται τα 10bit δεδομένα εξόδου, προερχόμενα από το φίλτρο δεύτερου επιπέδου. Το εύρος των δεδομένων είναι 0-1024 ή 0x000-0x400 σε δεκαεξαδική αρίθμηση. Το χαμηλό byte ExFDL περιέχει τα χαμηλότερα 8 bit D0-D7, και το υψηλό byte ExFDH τα υψηλότερα 2 bit D8 και D9.

Αυτοί οι καταχωρητές είναι μόνο για ανάγνωση και ανανεώνονται σε διάστημα που ορίζεται από {ESI x SFI}. Απαιτείται λειτουργία ανάγνωσης πολλαπλών byte ώστε να διατηρείται η συνέχεια των δεδομένων (ταίριασμα των LSB και MSB).

Ανάγνωση πολλαπλών byte από τον καταχωρητή 0x00 έως 0x24 επιστρέφει τα δεδομένα όπως είναι σε μία συγκεκριμένη στιγμή (χωρίς να μπερδεύει παλιά και νέα δεδομένα).

Baseline Value Registers (0x1E - 0x2A)

Electrode Baseline Value

Bit	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Ανάγνωση	ExBV9	ExBV8	ExBV7	ExBV6	ExBV5	ExBV4	ExBV3	ExBV2
Εγγραφή								

ExBV: Το φίλτρο τρίτου επιπέδου χρησιμοποιείται σαν το φίλτρο βάσης για την ανίχνευση αφής έχοντας έξοδο μία τιμή βάσης των 10bit. Ο καταχωρητής τιμών βάσης (**Baseline Value Register**) περιέχει τα υψηλότερα 8 bit από την εσωτερική 10bit τιμή βάσης για κάθε ένα από τα 13 κανάλια.

Τα CL bit του καταχωρητή **ECR (0x5E)** ορίζουν την λειτουργία ανανέωσης αυτών των καταχωρητών. Ο ρυθμός ανανέωσης αυτών των καταχωρητών είναι {ESI x SFI}.

Ο χρήστης μπορεί να γράψει αυτές τις τιμές σε Κατάσταση Παύσης. Η λειτουργία εγγραφής θα καθαρίσει τα χαμηλότερα 2 bit της εσωτερικής 10bit τιμής.

Baseline Filtering Control Registers (0x2B - 0x40)

Ο υπολογισμός της τιμής βάσης γίνεται από το εσωτερικό φίλτρο τρίτου επιπέδου που ελέγχεται από τους καταχωρητές 0x2B έως 0x40. Η τιμή βάσης των δώδεκα ηλεκτροδίων ελέγχεται από την ίδια ομάδα καταχωρητών 0x2B έως 0x35, ενώ το 13^ο κανάλι ELEPROX από ανεξάρτητη ομάδα καταχωρητών 0x36 έως 0x40.

Και οι δύο αυτές ομάδες έχουν την ίδια δομή και χρησιμοποιούν τρία διαφορετικά σενάρια χαρακτηρισμένα ως αύξηση (rising), μείωση (falling) και επαφή (touched). Η κατάσταση αύξησης πραγματοποιείται όταν τα δεδομένα του ηλεκτροδίου έχουν μεγαλύτερη τιμή από την τιμή βάσης, η μείωση όταν τα δεδομένα του ηλεκτροδίου έχουν μικρότερη τιμή από την τιμή βάσης και η επαφή όταν το ηλεκτρόδιο βρίσκεται σε κατάσταση επαφής.

Για το κάθε σενάριο, τα χαρακτηριστικά φιλτραρίσματος ορίζονται από τέσσερις παραμέτρους: το maximum half delta, το noise half delta, το noise count limit και το filter delay count limit. Δεν υπάρχει maximum half delta για σενάριο επαφής.

Maximum Half Delta (MHD): Ορίζει τη μεγαλύτερη διακύμανση που μπορεί να περάσει από το φίλτρο βάσης. Το εύρος των δυνατών τιμών είναι 1-63.

Noise Half Delta (NHD): Ορίζει τη σταδιακή αλλαγή όταν ανιχνεύεται μεταβολή που δεν οφείλεται σε θόρυβο. Το εύρος των δυνατών τιμών είναι 1-63.

Noise Count Limit (NCL): Ορίζει τον απαιτούμενο αριθμό διαδοχικών δειγμάτων που πρέπει να είναι μεγαλύτερα από το MHD για να καθοριστεί ότι δεν πρόκειται για θόρυβο. Το εύρος των δυνατών τιμών είναι 0-255.

Filter Delay Count Limit (FDL): Ορίζει το ρυθμό λειτουργίας του φίλτρου. Μεγάλος αριθμός το κάνει να λειτουργεί πιο αργά. Το εύρος των δυνατών τιμών είναι 0-255.

Touch and Release Threshold (0x41 - 0x5A)

Touch Threshold ExTTH

Bit	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Ανάγνωση	ExTTH							
Εγγραφή								

Release Threshold ExRTH

Ανάγνωση	ExRTH							
Εγγραφή								

OORx: Κάθε ένα από τα 13 κανάλια έχει το δικό του ζευγάρι καταχωρητών ορίων επαφής και απελευθέρωσης. Το όριο ορίζεται ως μία τιμή απόκλισης από την τιμή βάσης, έτσι παραμένει σταθερή ακόμη και αν αλλάξει η τιμή βάσης. Τυπικά το όριο επαφής είναι λίγο μεγαλύτερο από το όριο απελευθέρωσης για να αποφεύγονται σφάλματα λόγω φαινομένων αναπήδησης και καθυστέρησης.

Το περιεχόμενο αυτών των καταχωρητών παίρνει τιμές από 0 έως 255 ανάλογα με την κάθε εφαρμογή.

Debounce Register (0x5B)

Electrode Data Low Byte ExFDL and High Byte ExFDH

Bit	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	
Ανάγνωση	0	DR				0	DT		
Εγγραφή									

Ο καταχωρητής διατηρεί τις ρυθμίσεις αναπήδησης που επηρεάζουν την τελική αλλαγή της κατάστασης επαφής και απελευθέρωσης των 0x00 και 0x01. Η αλλαγή της κατάστασης θα πραγματοποιηθεί μόνο μετά από ανίχνευση ενός αριθμού επαφών ή απελευθερώσεων ίσου με τον αριθμό των αναπηδήσεων. Εάν ο αριθμός ανιχνεύθηκε δεν ισούται με εκείνο των αναπηδήσεων, η κατάσταση δεν αλλάζει.

DT: Ο αριθμός αναπηδήσεων για επαφή. Το εύρος των τιμών είναι 0-7.

DR: Ο αριθμός αναπηδήσεων για απελευθέρωση. Το εύρος των τιμών είναι 0-7.

Όταν τα δεδομένα ενός ηλεκτροδίου αποδίδουν επαφή σε διαδοχικές μετρήσεις ίσες με τον αριθμό αναπήδησης, η κατάστασή του γίνεται “επαφή”. Όταν τα δεδομένα ενός ηλεκτροδίου αποδίδουν απελευθέρωση σε διαδοχικές μετρήσεις ίσες με τον αριθμό αναπήδησης, η κατάστασή του γίνεται “απελευθέρωση”. Η κατάσταση εμφανίζεται στον καταχωρητή κατάστασης (**Touch Status Register (0x00 - 0x01)**) με καθυστέρηση ίση με {ESI x SFI x DR (ή DT)}.

AFE Configuration Registers (0x5C, 0x5D)

AFE Configuration 1 Register (0x5C), προεπιλεγμένη τιμή = 0x10

Bit	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Ανάγνωση	FFI		CDC					
Εγγραφή								

Αυτός ο καταχωρητής διατηρεί τις ρυθμίσεις του φίλτρου πρώτου επιπέδου, και τη ρύθμιση για την καθολική τιμή του ρεύματος φόρτισης όλων των καναλιών. Σε κάθε κανάλι η καθολική τιμή CDC θα χρησιμοποιείται εάν η αντίστοιχη τιμή CDCx είναι μηδέν. Εάν υπάρχει μη μηδενική τιμή στους καταχωρητές 0x5F-0x6B, τότε το αντίστοιχο κανάλι θα χρησιμοποιεί αυτήν τη CDCx τιμή αντί της καθολικής CDC.

Πεδίο	Περιγραφή
7:6 FFI	Επαναλήψεις Πρώτου Φίλτρου (First Filter Iterations) – το πεδίο των επαναλήψεων του πρώτου φίλτρου επιλέγει τον αριθμό των δειγμάτων που λαμβάνονται ως είσοδοι για το πρώτο επίπεδο φιλτραρίσματος. 00 Κωδικοποίηση 0 – Θέτει τα λαμβανόμενα δείγματα σε 6 (προεπιλογή) 01 Κωδικοποίηση 1 – Θέτει τα λαμβανόμενα δείγματα σε 10 10 Κωδικοποίηση 2 – Θέτει τα λαμβανόμενα δείγματα σε 18 11 Κωδικοποίηση 3 – Θέτει τα λαμβανόμενα δείγματα σε 34

Πεδίο	Περιγραφή
5:0 CDC	Ρεύμα Φόρτισης Αποφόρτισης (Charge Discharge Current) – το πεδίο του ρεύματος φόρτισης αποφόρτισης επιλέγει το ρεύμα τροφοδοσίας που χρησιμοποιείται κατά τη φόρτιση και την αποφόρτιση ενός ηλεκτροδίου. Προγραμματιζόμενο σε βήματα του 1μΑ. 000000 Κωδικοποίηση 0 – Διακόπτει τη Φόρτιση Ηλεκτροδίων?? 000001 Κωδικοποίηση 1 – Θέτει το ρεύμα στο 1μΑ ... 010000 Κωδικοποίηση 16 – Θέτει το ρεύμα στα 16μΑ (προεπιλογή) ... 111111 Κωδικοποίηση 63 – Θέτει το ρεύμα στα 63μΑ

AFE Configuration 2 Register (0x5D), προεπιλεγμένη τιμή = 0x24

Bit	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Ανάγνωση	CDT		SFI		ESI			
Εγγραφή								

Ο καταχωρητής αυτός διατηρεί τη ρύθμιση για την καθολική τιμή του χρόνου φόρτισης και αποφόρτισης, και τις ρυθμίσεις του φίλτρου δεύτερου επιπέδου. Τα bit CDT θέτουν το χρόνο φόρτισης/αποφόρτισης για όλα τα κανάλια. Για κάθε κανάλι η καθολική τιμή CDT θα χρησιμοποιείται εάν η αντίστοιχη τιμή CDTx είναι μηδέν. Εάν υπάρχει μη μηδενική τιμή στους καταχωρητές 0x6C-0x72, τότε το αντίστοιχο κανάλι θα χρησιμοποιεί αυτήν τη CDTx τιμή αντί της καθολικής CDT.

Πεδίο	Περιγραφή
7:5 CDT	Χρόνος Φόρτισης Αποφόρτισης (Charge Discharge Time) – επιλέγει το χρόνο για τον οποίο ένα ηλεκτρόδιο θα φορτίζει. Προγραμματιζόμενο σε $0,5 (2^{n-1})$ μ s 000 Κωδικοποίηση 0 – Αδύνατο 001 Κωδικοποίηση 1 – Θέτει το χρόνο σε 0,5 μ s (προεπιλογή) 010 Κωδικοποίηση 2 – Θέτει το χρόνο σε 1 μ s ... 111 Κωδικοποίηση 7 – Θέτει το χρόνο σε 32 μ s
4:3 SFI	Επανάληψεις Δεύτερου Φίλτρου (Second Filter Iterations) – επιλέγει τον αριθμό των δειγμάτων που λαμβάνονται για το φίλτρο δεύτερου επιπέδου. 00 Κωδικοποίηση 0 – Θέτει τον αριθμό των δειγμάτων σε 4 (προεπιλογή) 01 Κωδικοποίηση 1 – Θέτει τον αριθμό των δειγμάτων σε 6 10 Κωδικοποίηση 2 – Θέτει τον αριθμό των δειγμάτων σε 10 11 Κωδικοποίηση 3 – Θέτει τον αριθμό των δειγμάτων σε 18
2:0 ESI	Διάστημα Δειγμάτων Ηλεκτροδίων (Electrode Sample Interval) – επιλέγει την περίοδο μεταξύ δειγμάτων που χρησιμοποιείται για το δεύτερο επίπεδο φιλτραρίσματος. Προγραμματιζόμενο σε 2^n ms. 000 Κωδικοποίηση 0 – Θέτει την περίοδο σε 1 ms 001 Κωδικοποίηση 1 – Θέτει την περίοδο σε 2 ms ... 100 Κωδικοποίηση 4 – Θέτει την περίοδο σε 16 ms ... 111 Κωδικοποίηση 7 – Θέτει την περίοδο σε 128 ms

Electrode Configuration Register (ECR, 0x5E)

Bit	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Ανάγνωση	CL[1:0]		ELEPROX[1:0]		ELE[3:0]			
Εγγραφή								

Ο καταχωρητής επιλέγει τα ενεργά ηλεκτρόδια τις ρυθμίσεις ανίχνευσης εγγύτητας, και ελέγχει το MPR121 στην κατάσταση λειτουργίας και παύσης. Η προεπιλογή επανεκκίνησης του MPR121 είναι η κατάσταση παύσης χωρίς μέτρηση χωρητικότητας.

Για να ξεκινήσει η μέτρηση χωρητικότητας και η ανίχνευση αφής, πρέπει να τεθεί σε κατάσταση λειτουργίας επιλέγοντας τις εισόδους που θα είναι ενεργές. Το MPR121 μπορεί να τεθεί σε κατάσταση παύσης γράφοντας 2bXX00000 στον **ECR** οποιαδήποτε στιγμή.

CL: Bit Επιλογής Βαθμονόμησης (Calibration Lock Bit). Τα bit CL ελέγχουν την ανανέωση των καταχωρητών **Baseline Value**. Τυπικά χρησιμοποιείται CL=2b10 ώστε η τιμή βάσης να αρχικοποιείται στο στάδιο εκκίνησης με μία τιμή κοντά στην άμεσα μετρήσιμη αντί για μηδέν. Εφόσον το φίλτρο τρίτου επιπέδου έχει μεγάλη χρονική σταθερά, αν αρχικοποιηθεί σε μηδέν θα υπάρξει μεγάλο διάστημα χωρίς να μπορεί να ανιχνευθεί επαφή.

CL[1:0]	Περιγραφή
00	Ανίχνευση τιμής βάσης ενεργή (προεπιλογή). Οι τιμές βάσης ανανεώνονται σε περίοδο ίση με {ESI x SFI} βάσει της καθορισμένης λειτουργίας του φίλτρου. Η αρχική τιμή είναι άγνωστη.
01	Βαθμονόμηση κλειδωμένη. Ανίχνευση τιμής βάσης απενεργοποιημένη. Οι τιμές βάσης δε μεταβάλλονται από το MPR121.
10	Ανίχνευση τιμής βάσης και αρχικοποίηση ενεργή. Στο πρώτο διάστημα {ESI x SFI}, το MPR121 αντιγράφει τα 5 πιο σημαντικά ψηφία (MSB) της εξόδου του φίλτρου 2 ^{ου} επιπέδου σε τιμή βάσης των 10 bit (τα 5 LSB γίνεται μηδέν). Μεταγενέστερες ανανεώσεις γίνονται βάσει της καθορισμένης λειτουργίας του φίλτρου.
11	Ανίχνευση τιμής βάσης και αρχικοποίηση ενεργή. Στο πρώτο διάστημα {ESI x SFI}, το MPR121 αντιγράφει την τιμή εξόδου του φίλτρου 2 ^{ου} επιπέδου σε τιμή βάσης των 10 bit. Μεταγενέστερες ανανεώσεις γίνονται βάσει της καθορισμένης λειτουργίας του φίλτρου.

ELE[3:0]	Περιγραφή
0000	Ανίχνευση αφής ηλεκτροδίων απενεργοποιημένη (προεπιλογή)
0001	Κατάσταση λειτουργίας με μέτρηση στο ELE0 ενεργοποιημένη
0010	Κατάσταση λειτουργίας με μέτρηση στα ELE0-1 ενεργοποιημένη
0011	Κατάσταση λειτουργίας με μέτρηση στα ELE0-2 ενεργοποιημένη
0100	Κατάσταση λειτουργίας με μέτρηση στα ELE0-3 ενεργοποιημένη
0101	Κατάσταση λειτουργίας με μέτρηση στα ELE0-4 ενεργοποιημένη
0110	Κατάσταση λειτουργίας με μέτρηση στα ELE0-5 ενεργοποιημένη
0111	Κατάσταση λειτουργίας με μέτρηση στα ELE0-6 ενεργοποιημένη
1000	Κατάσταση λειτουργίας με μέτρηση στα ELE0-7 ενεργοποιημένη
1001	Κατάσταση λειτουργίας με μέτρηση στα ELE0-8 ενεργοποιημένη
1010	Κατάσταση λειτουργίας με μέτρηση στα ELE0-9 ενεργοποιημένη
1011	Κατάσταση λειτουργίας με μέτρηση στα ELE0-10 ενεργοποιημένη
11XX	Κατάσταση λειτουργίας με μέτρηση στα ELE0-11 ενεργοποιημένη

ELEPROX[1:0]	Περιγραφή
00	Ανίχνευση εγγύτητας απενεργοποιημένη (προεπιλογή)
01	Κατάσταση λειτουργίας με ανίχνευση εγγύτητας ενεργοποιημένη στα ELE0-1
10	Κατάσταση λειτουργίας με ανίχνευση εγγύτητας ενεργοποιημένη στα ELE0-3
11	Κατάσταση λειτουργίας με ανίχνευση εγγύτητας ενεργοποιημένη στα ELE0-11

Όταν και τα ELEPROX και τα ELE είναι μη μηδενικά, πρώτα γίνεται μέτρηση για την ανίχνευση εγγύτητας και ύστερα η μέτρηση των ηλεκτροδίων. Όταν και τα ELEPROX και τα ELE είναι μηδέν το MPR121 τίθεται σε κατάσταση παύσης.

ELE: Όταν ELECON ≠ 0, ανίχνευση αφής στα αντίστοιχα ηλεκτρόδια ενεργοποιημένη.

ELEPROX: Όταν ELEPROXCON ≠ 0, ανίχνευση εγγύτητας στην αντίστοιχη ομάδα ηλεκτροδίων ενεργοποιημένη.

Individual Charge Current Register (0x5F - 0x6B)

Bit	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Ανάγνωση	0		CDCx					
Εγγραφή								

Αυτοί οι καταχωρητές συγκρατούν τις ατομικές τιμές ρεύματος φόρτισης/αποφόρτισης (individual Charge/Discharge Current, CDCx) καθενός ηλεκτροδίου εάν δε χρησιμοποιείται η καθολική CDC τιμή. Η ρύθμιση της παραμέτρου είναι παρόμοια με το CDC. Οι προεπιλεγμένες τιμές αυτών των καταχωρητών, όταν πραγματοποιείται επανεκκίνηση, είναι όλες μηδέν.

Πεδίο	Περιγραφή
5:0 CDCx	Ατομικό Ρεύμα Φόρτισης Αποφόρτισης (Individual Charge Discharge Current) – το πεδίο του ατομικού ρεύματος φόρτισης αποφόρτισης επιλέγει το ρεύμα τροφοδοσίας που χρησιμοποιείται κατά τη φόρτιση και την αποφόρτιση ενός συγκεκριμένου ηλεκτροδίου. Προγραμματιζόμενο σε βήματα του 1μΑ. 000000 Κωδικοποίηση 0 – Χρησιμοποιείται το καθολικό CDC (προεπιλογή) 000001 Κωδικοποίηση 1 – Θέτει το ρεύμα στο 1μΑ ... 010000 Κωδικοποίηση 16 – Θέτει το ρεύμα στα 16μΑ (προεπιλογή) ... 111111 Κωδικοποίηση 63 – Θέτει το ρεύμα στα 63μΑ

Εάν το CDCx είναι μηδέν, τότε χρησιμοποιείται η καθολική τιμή. Εάν υπάρχουν μη μηδενικά δεδομένα στους καταχωρητές 0x5F-0x6B, τότε αντί η καθολικής CDC τιμής, θα χρησιμοποιηθεί η ατομική τιμή για το αντίστοιχο κανάλι.

Individual Charge Time Register (0x6C - 0x72)

Bit	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Ανάγνωση	0	CDTx'			0	CDTx		
Εγγραφή								

Αυτοί οι καταχωρητές συγκρατούν τις ατομικές τιμές χρόνου φόρτισης/αποφόρτισης (individual Charge/Discharge Time, CDTx) καθενός ηλεκτροδίου εάν δε χρησιμοποιείται η καθολική CDT τιμή. Η ρύθμιση της παραμέτρου είναι παρόμοια με το CDT. Οι προεπιλεγμένες τιμές αυτών των καταχωρητών, όταν πραγματοποιείται επανεκκίνηση, είναι όλες μηδέν.

Πεδίο	Περιγραφή
7:5 CDTx	Ατομικός Χρόνος Φόρτισης Αποφόρτισης (Individual Charge Discharge Time) – επιλέγει το χρόνο φόρτισης για κάθε ένα κανάλι. Προγραμματιζόμενο σε $0,5 (2^{n-1}) \mu s$ 000 Κωδικοποίηση 0 – Χρησιμοποιείται το καθολικό CDT (προεπιλογή) 001 Κωδικοποίηση 1 – Θέτει το χρόνο σε 0,5 μs (προεπιλογή) 010 Κωδικοποίηση 2 – Θέτει το χρόνο σε 1 μs ... 111 Κωδικοποίηση 7 – Θέτει το χρόνο σε 32 μs

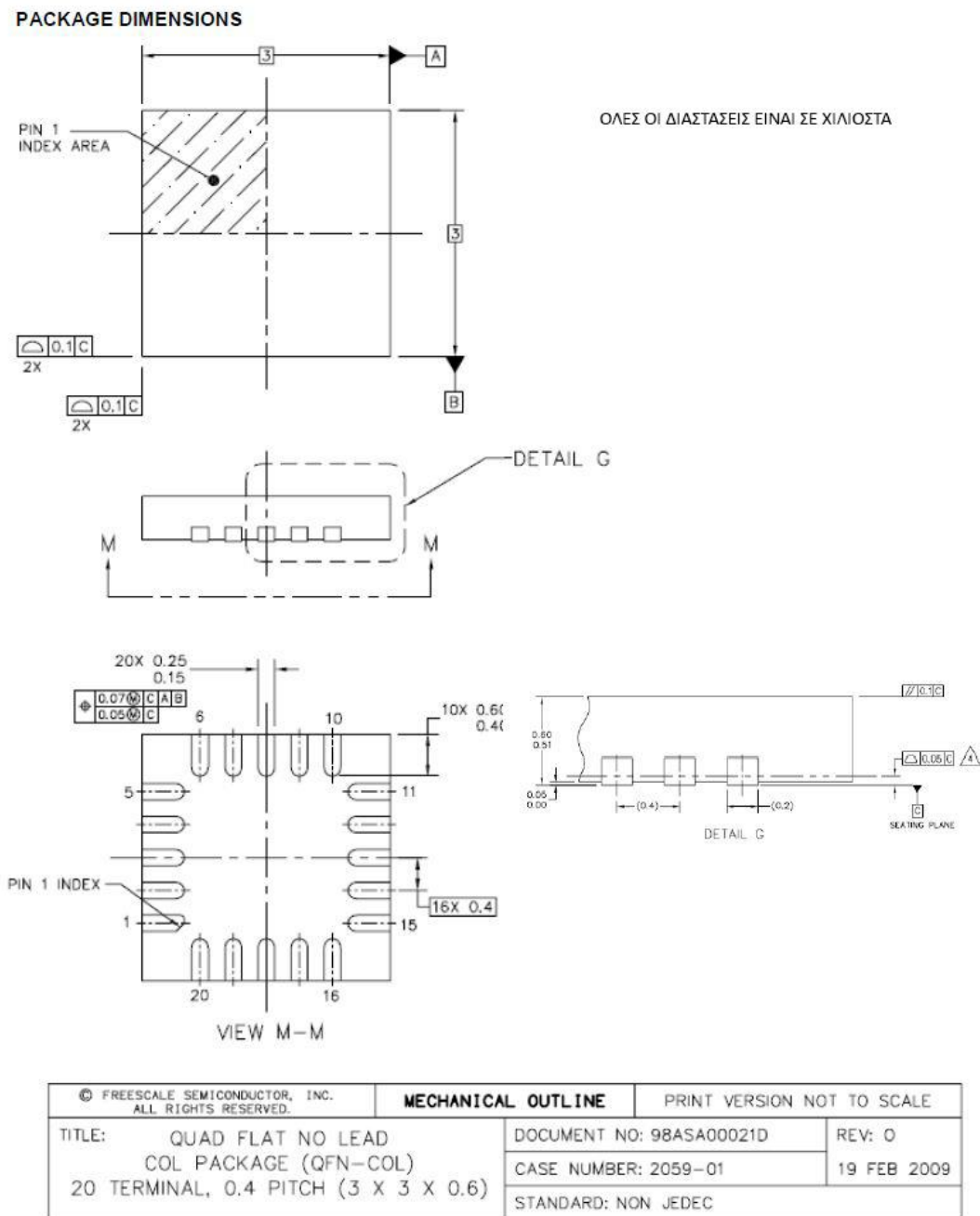
Εάν το CDTx είναι μηδέν, τότε χρησιμοποιείται η καθολική τιμή. Εάν υπάρχουν μη μηδενικά δεδομένα στους καταχωρητές 0x6C-0x72, τότε αντί η καθολικής CDT τιμής, θα χρησιμοποιηθεί η ατομική τιμή για το αντίστοιχο κανάλι.

Software Reset Register (0x80)

Εγγραφή με 0x63 στον καταχωρητή 0x80 πραγματοποιεί μερική επανεκκίνηση. Η μερική επανεκκίνηση δεν επηρεάζει το σύστημα I2C, αλλά κατά τα άλλα λειτουργεί όπως η επανεκκίνηση μέσω τροφοδοσίας (power on reset, POR).

3.4 – Διαστάσεις συσκευής

Οι διαστάσεις του αισθητήρα αφής MPR121 όπως δίδονται από την κατασκευάστρια εταιρία παρουσιάζονται στο επόμενο σχέδιο.



Εικόνα 3.10 – Σχέδιο διαστάσεων του MPR121

Κεφάλαιο 4

Η υλοποίηση του συστήματος

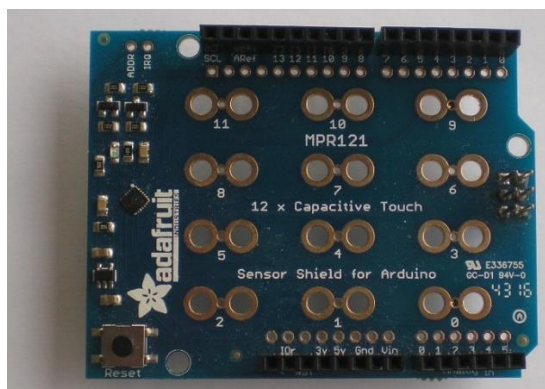
Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται όλη η διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά την υλοποίηση του συστήματος ελέγχου παροχής οξυγόνου με χρήση ανίχνευσης αφής. Αναλύονται όλα τα βήματα, οι μετρήσεις και οι αποφάσεις που έγιναν καθώς επίσης και τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν.

4.1 – Τα ηλεκτρόδια ελέγχου

Η πρώτη επαφή με τον αισθητήρα αφής MPR121 έγινε μέσω ενός κυκλώματος κατασκευασμένου από την εταιρία Adafruit για χρήση σε συνδυασμό με την πλατφόρμα Arduino. Το συγκεκριμένο shield (όπως αναφέρονται τα περιφερειακά κυκλώματα του Arduino) συνοδεύεται από κατάλληλες βιβλιοθήκες και παραδειγματικό κώδικα για τη χρήση του. [15]



Εικόνα 4.1 – Arduino Uno, Revision 3



Εικόνα 4.2 – Adafruit, MPR121 Capacitive Sensor Shield

Για τη μελέτη του αισθητήρα και την ανάλυση των παραμέτρων του, γράφτηκε πρόγραμμα που επιστρέφει την τιμή της μετρούμενης τάσης (από τον αναλογικό/ψηφιακό μετατροπέα στην έξοδο του φίλτρου 2^{ου} επιπέδου), για όλες τις δυνατές τιμές του ρεύματος φόρτισης (1 – 63 μ A) και του χρόνου φόρτισης (0,5 – 32 μ s). Μέσω αυτού, έγιναν διάφορες δοκιμές ηλεκτροδίων οι οποίες αναγράφονται στη συνέχεια. Όλες οι τιμές που μετρήθηκαν είναι σε ψηφιακή μορφή των 10 bit (0 – 1023), με το 0 να αντιστοιχεί σε 0V και το 1023 στην τάση τροφοδοσίας. Η χωρητικότητα στην οποία αντιστοιχούν μπορεί να βρεθεί βάσει της εξίσωσης:

$$C = \frac{I \cdot T}{ADC\ counts} \cdot \frac{1}{VDD} \cdot 1024$$

όπου I είναι το ρεύμα φόρτισης, T είναι ο χρόνος φόρτισης, ADC counts είναι η 10 bit μετρούμενη τιμή και VDD είναι η τάση τροφοδοσίας του αισθητήρα όπου σε αυτήν την περίπτωση είναι 3,3V.

Σε κάθε έναν από τους επόμενους πίνακες φαίνονται οι τιμές της μετρούμενης 10 bit τάσης σε μία τυχαία είσοδο του MPR121 για διάφορες επιλογές ηλεκτροδίων και σε διάφορες καταστάσεις αυτών. Η χωρητικότητα που υπολογίζεται από την προηγούμενη εξίσωση θα είναι περίπου η ίδια για κάθε τιμή ενός πίνακα (εκτός από ακραίες περιπτώσεις), πράγμα αναμενόμενο, καθώς τα φυσικά χαρακτηριστικά της εισόδου δε μεταβάλλονται. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο οι τιμές στους πίνακες δεν έχουν μετατραπεί.

Στον πίνακα 4.1 φαίνονται οι τιμές όταν στην πλακέτα δεν έχουν συνδεθεί εξωτερικά ηλεκτρόδια (μόνο με τις υπάρχουσες επαφές). Αγνοώντας τις ακραίες τιμές, υπολογίστηκε η χωρητικότητα της συγκεκριμένης εισόδου από τη μέση τιμή των υπόλοιπων σε 6,72pF.

Είναι προφανές ότι για μία τιμή χωρητικότητας αυτής της τάξης, αύξηση στο ρεύμα και στο χρόνο φόρτισης, έχουν ως αποτέλεσμα η τιμή της μετρούμενης τάσης να φτάνει στο κορεσμό (δηλ, την τιμή της τάσης τροφοδοσίας) πολύ γρήγορα. Σε αυτά τα σημεία δε μπορεί να εγγραφεί η ανίχνευση αφής, καθώς η αντίστοιχη τιμή μπορεί να είναι και αυτή εκτός μετρήσιμων ορίων. Αυτό φαίνεται στον επόμενο πίνακα που δείχνει τις μετρούμενες τιμές για την ίδια είσοδο όταν αυτή βρίσκεται σε επαφή. Εδώ η μέση τιμή της χωρητικότητας υπολογίστηκε σε 48,10pF.

Οι μετρήσεις που σημειώνονται με κόκκινο χρώμα αντιστοιχούν σε τιμές εκτός ορίων, με βάση αυτά που αναλύθηκαν στην παράγραφο 3.2 και για τις οποίες ο υπολογισμός χωρητικότητας θα ήταν εσφαλμένος. Παρόλα αυτά, η ανίχνευση επαφής/απελευθέρωσης για ορισμένες τιμές (μη ακραίες) παραμένει δυνατή, καθώς δεν αλλάζει το γεγονός ότι αντιστοιχούν σε πολύ μεγάλες ή πολύ μικρές τιμές χωρητικότητας. Συγκεκριμένα, τα όρια των τιμών που λαμβάνουν μέρος στον υπολογισμό της χωρητικότητας φαίνονται στον πίνακα 3.1 για τροφοδοσία 3.3V (τιμή που αποδίδεται από το Arduino).

Σημείωση: Σε αρκετά σημεία φαίνεται ότι η τιμή της τάσης για μία τιμή ρεύματος φόρτισης είναι μικρότερη από την προηγούμενη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η επαφή με την είσοδο του αισθητήρα στην οποία πραγματοποιείται η μέτρηση, δεν είναι απόλυτα σταθερή.

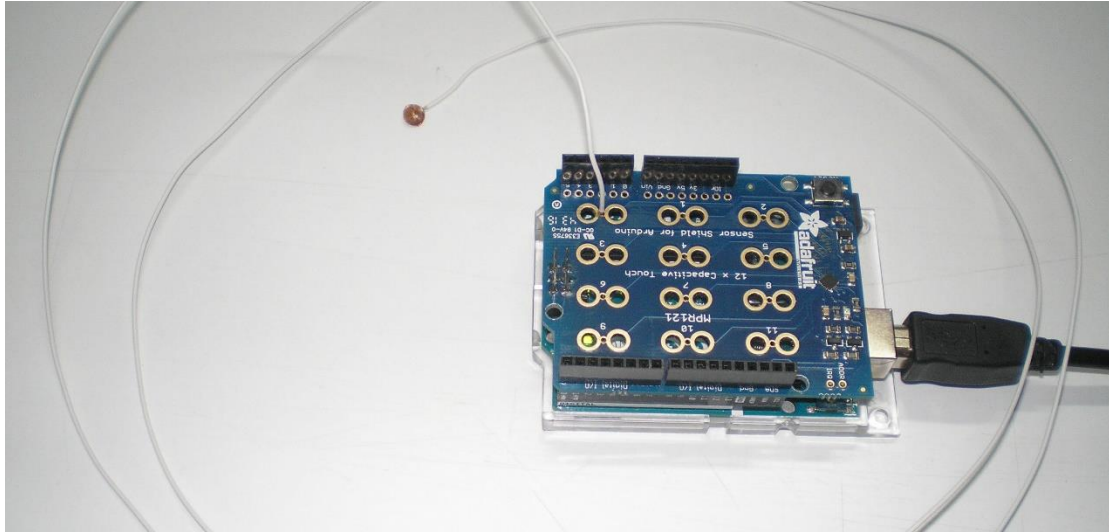
Πίνακας 4.1 – Μετρήσεις ελεύθερης εισόδου χωρίς εξωτερικά ηλεκτρόδια

		Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)									Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)								
		0,5	1	2	4	8	16	32			0,5	1	2	4	8	16	32		
Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	1	20	44	94	193	383	713	1023	Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	33	707	1022	1023	1023	1023	1023	1023		
	2	45	95	195	386	716	1023	1023		34	725	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023	
	3	70	145	295	552	1000	1023	1023		35	741	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023	
	4	96	196	389	719	1023	1023	1023		36	761	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	5	121	247	472	883	1023	1023	1023		37	776	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	6	147	298	554	999	1023	1023	1023		38	794	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	7	172	347	634	1020	1023	1023	1023		39	809	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	8	198	392	718	1023	1023	1023	1023		40	828	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	9	224	433	798	1023	1023	1023	1023		41	843	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	10	249	474	878	1023	1023	1023	1023		42	859	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	11	275	514	948	1023	1023	1023	1023		43	873	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	12	300	555	993	1023	1023	1023	1023		44	891	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	13	325	594	1012	1023	1023	1023	1023		45	903	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	14	350	633	1019	1023	1023	1023	1023		46	917	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	15	372	671	1021	1023	1023	1023	1023		47	927	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	16	393	709	1022	1023	1023	1023	1023		48	944	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	17	413	746	1023	1023	1023	1023	1023		49	952	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	18	434	785	1023	1023	1023	1023	1023		50	962	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	19	453	822	1023	1023	1023	1023	1023		51	968	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	20	473	862	1023	1023	1023	1023	1023		52	977	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	21	492	895	1023	1023	1023	1023	1023		53	982	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	22	511	929	1023	1023	1023	1023	1023		54	988	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	23	530	955	1023	1023	1023	1023	1023		55	992	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	24	550	980	1023	1023	1023	1023	1023		56	998	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	25	568	994	1023	1023	1023	1023	1023		57	1001	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	26	587	1004	1023	1023	1023	1023	1023		58	1004	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	27	604	1010	1023	1023	1023	1023	1023		59	1006	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	28	623	1015	1023	1023	1023	1023	1023		60	1009	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	29	640	1017	1023	1023	1023	1023	1023		61	1011	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	30	658	1019	1023	1023	1023	1023	1023		62	1013	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	31	675	1020	1023	1023	1023	1023	1023		63	1014	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	32	691	1021	1023	1023	1023	1023	1023											

Πίνακας 4.2 – Μετρήσεις εισόδου σε επαφή χωρίς εξωτερικά ηλεκτρόδια

		Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)									Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)						
		0,5	1	2	4	8	16	32			0,5	1	2	4	8	16	32
Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	1	2	7	14	24	47	95	187	Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	33	131	231	424	796	1021	1022	1023
	2	4	14	27	51	102	194	377		34	138	240	437	814	1020	1022	1023
	3	11	20	39	78	153	289	564		35	141	247	451	837	1021	1023	1023
	4	16	32	54	102	197	381	748		36	139	252	464	866	1021	1023	1022
	5	27	38	67	129	245	481	921		37	149	260	476	887	1022	1022	1023
	6	20	46	79	153	298	574	1010		38	156	268	489	906	1021	1022	1022
	7	27	51	96	178	348	664	1019		39	157	272	499	926	1022	1023	1022
	8	30	58	110	205	397	763	1021		40	158	280	513	939	1021	1023	1022
	9	33	66	123	231	439	845	1019		41	167	287	521	956	1022	1022	1023
	10	44	72	133	255	484	943	1021		42	166	294	533	970	1022	1022	1022
	11	42	81	150	277	530	990	1022		43	174	302	544	978	1021	1022	1022
	12	52	90	161	308	582	1009	1021		44	173	309	560	985	1022	1022	1023
	13	55	96	176	328	632	1016	1022		45	186	313	571	990	1023	1022	1022
	14	57	102	191	358	673	1018	1022		46	183	323	584	996	1021	1022	1023
	15	63	110	197	382	719	1020	1022		47	187	328	591	1002	1022	1023	1022
	16	60	115	211	398	767	1020	1022		48	191	337	605	1004	1022	1022	1022
	17	69	122	224	427	809	1020	1022		49	198	342	616	1006	1022	1023	1023
	18	65	129	240	448	856	1021	1022		50	202	348	631	1009	1023	1022	1023
	19	78	139	253	472	902	1023	1022		51	207	355	641	1010	1023	1022	1023
	20	82	144	267	498	936	1021	1023		52	202	363	654	1014	1022	1022	1023
	21	91	151	275	522	967	1022	1023		53	208	369	662	1013	1022	1023	1023
	22	91	159	293	545	988	1021	1021		54	218	377	679	1016	1022	1023	1023
	23	95	168	304	567	999	1022	1022		55	216	383	689	1015	1022	1023	1022
	24	100	173	318	591	1009	1021	1022		56	223	388	700	1017	1023	1022	1022
	25	101	179	332	612	1012	1022	1022		57	225	397	712	1016	1023	1022	1022
	26	107	185	342	639	1015	1021	1022		58	231	403	725	1017	1022	1023	1022
	27	112	193	354	658	1017	1022	1023		59	237	408	735	1018	1022	1023	1022
	28	110	199	368	683	1018	1021	1023		60	242	415	748	1018	1022	1023	1023
	29	120	207	379	707	1020	1023	1022		61	239	422	756	1018	1022	1022	1022
	30	123	211	391	732	1019	1022	1021		62	243	426	769	1019	1023	1023	1021
	31	129	222	403	753	1021	1023	1023		63	251	432	780	1019	1022	1023	1022
	32	133	226	413	774	1020	1022	1021									

Επειδή η αρχική ιδέα για την κατασκευή ήταν τα ηλεκτρόδια της μάσκας προσώπου να εκτείνονταν από αυτήν προς το ηλεκτρονικό κύκλωμα, η επόμενη δοκιμή ήταν να τοποθετηθεί ένα ηλεκτρόδιο μεγάλου μήκους (περίπου 140 cm) στην είσοδο 0 για να παρατηρηθεί η συμπεριφορά του.



Εικόνα 4.3 – Συνδεδεμένο ηλεκτρόδιο μεγάλου μήκους στο shield του MPR121

Όπως φαίνεται στον πίνακα 4.3 η τιμές που λήφθηκαν ήταν αρκετά μικρότερες από πριν. Αυτό οφείλεται στην αυξημένη χωρητικότητα λόγω του μεγαλύτερου συνολικού όγκου του ηλεκτροδίου, όπου υπολογίστηκε σε 16,90pF για ελεύθερο ηλεκτρόδιο και 92,77pF όταν βρίσκεται σε επαφή. Παρόλα αυτά, αντιστοιχίζοντας με τις τιμές του πίνακα 4.4 για το ίδιο ηλεκτρόδιο σε επαφή, βλέπουμε ότι υπάρχουν πολλοί συνδυασμοί I και T για τα οποία μπορεί να επιτευχθεί ανίχνευση αφής.

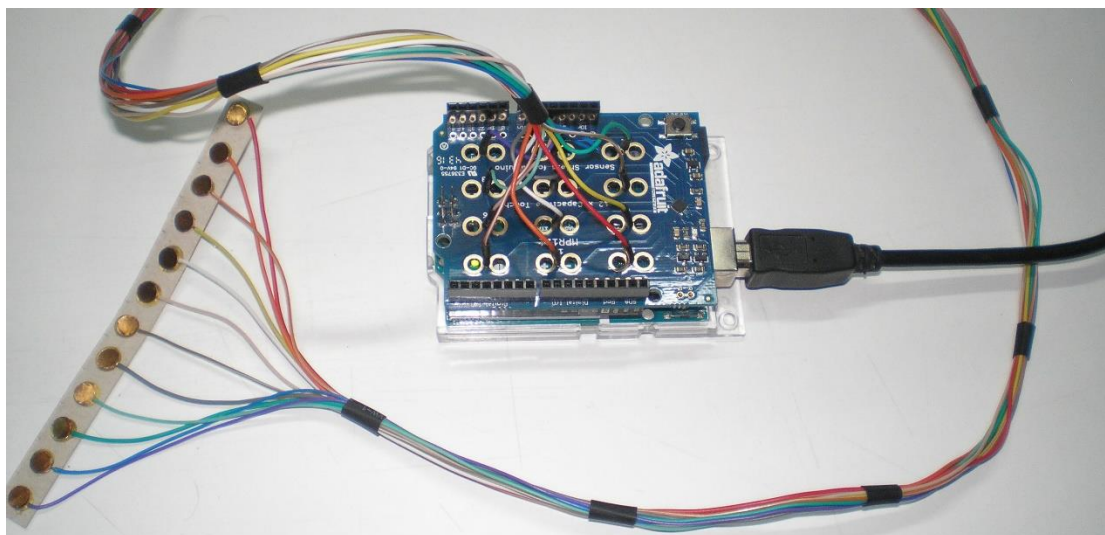
Πίνακας 4.3 – Μετρήσεις εισόδου σε ένα ελεύθερο ηλεκτρόδιο μεγάλου μήκους

		Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)									Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)							
		0,5	1	2	4	8	16	32			0,5	1	2	4	8	16	32	
Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	1	7	18	33	71	147	293	569	Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	33	311	591	1014	1023	1023	1023	1023	
	2	18	34	72	143	294	572	1014		34	321	609	1017	1023	1023	1023	1023	1023
	3	26	53	109	221	436	848	1022		35	333	624	1019	1023	1023	1023	1023	1023
	4	38	71	150	298	579	1015	1022		36	341	641	1020	1023	1023	1023	1023	1023
	5	46	92	184	371	718	1022	1022		37	349	657	1021	1023	1023	1023	1023	1023
	6	57	110	223	441	852	1023	1023		38	359	671	1022	1023	1023	1023	1023	1023
	7	63	134	261	510	971	1022	1023		39	369	688	1022	1023	1023	1023	1023	1023
	8	73	148	300	580	1016	1023	1022		40	377	706	1022	1023	1023	1023	1023	1023
	9	83	168	338	645	1021	1023	1023		41	386	721	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	10	94	189	374	717	1023	1022	1023		42	397	738	1022	1023	1023	1023	1023	1023
	11	105	206	409	785	1023	1023	1023		43	404	752	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	12	114	224	444	856	1022	1023	1023		44	412	772	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	13	122	245	477	920	1023	1023	1023		45	422	784	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	14	131	263	513	971	1022	1023	1023		46	429	800	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	15	143	282	546	1001	1023	1023	1023		47	439	815	1022	1023	1023	1023	1023	1023
	16	152	301	580	1014	1023	1023	1023		48	445	834	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	17	162	320	614	1020	1023	1023	1023		49	453	848	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	18	171	341	645	1021	1023	1023	1023		50	462	863	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	19	180	356	680	1022	1023	1023	1023		51	471	876	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	20	191	375	713	1022	1023	1023	1023		52	479	894	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	21	199	392	748	1023	1023	1023	1023		53	487	905	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	22	209	410	780	1023	1023	1023	1023		54	493	919	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	23	217	429	813	1023	1023	1023	1023		55	502	930	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	24	230	444	849	1023	1023	1023	1023		56	512	945	1023	1023	1023	1022	1023	1023
	25	238	462	880	1023	1023	1023	1023		57	519	955	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	26	248	480	913	1023	1023	1023	1023		58	527	964	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	27	257	496	939	1023	1023	1023	1023		59	534	971	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	28	267	512	964	1023	1023	1023	1022		60	544	980	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	29	277	528	982	1022	1023	1023	1023		61	550	985	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	30	286	545	995	1023	1023	1023	1023		62	558	992	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	31	297	562	1004	1023	1023	1023	1023		63	565	996	1022	1023	1023	1023	1023	1023
	32	303	575	1010	1023	1023	1023	1023										

Πίνακας 4.4 – Μετρήσεις εισόδου σε ένα ηλεκτρόδιο σε επαφή, μεγάλου μήκους

		Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)									Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)						
		0,5	1	2	4	8	16	32			0,5	1	2	4	8	16	32
Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	1	2	4	6	12	23	46	92	Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	33	70	121	218	409	781	1020	1023
	2	7	6	14	27	49	97	185		34	73	124	225	423	800	1021	1021
	3	5	10	19	36	75	141	270		35	77	126	232	434	820	1021	1022
	4	8	13	29	51	101	186	360		36	77	130	237	443	842	1021	1022
	5	11	19	33	62	118	231	446		37	77	134	244	459	867	1021	1022
	6	14	22	41	79	150	285	550		38	79	139	253	469	889	1022	1022
	7	15	25	47	86	167	317	616		39	80	151	274	514	948	1022	1022
	8	17	29	56	100	190	368	703		40	82	148	272	535	1011	1022	1023
	9	22	32	60	113	213	413	815		41	97	175	324	611	1015	1022	1023
	10	18	37	68	125	244	471	905		42	98	175	331	627	1016	1022	1023
	11	20	41	76	140	270	516	971		43	101	184	344	652	1018	1022	1023
	12	27	44	81	152	293	560	1002		44	104	189	353	668	1019	1023	1023
	13	25	48	88	167	315	605	1013		45	106	191	359	684	1018	1022	1023
	14	29	53	94	178	340	647	1017		46	110	196	366	694	1020	1022	1023
	15	33	56	102	190	359	696	1019		47	110	200	373	711	1020	1022	1022
	16	34	58	108	203	382	734	1020		48	114	205	381	726	1021	1022	1022
	17	37	64	113	211	408	781	1021		49	115	208	390	735	1020	1022	1023
	18	38	66	121	227	435	831	1021		50	118	213	398	753	1021	1022	1022
	19	41	71	130	240	452	872	1022		51	118	217	405	770	1021	1022	1022
	20	43	74	133	252	484	919	1021		52	123	220	414	785	1021	1022	1023
	21	44	79	140	267	500	948	1021		53	125	224	420	797	1022	1022	1023
	22	45	82	149	277	526	979	1022		54	129	230	425	807	1022	1022	1023
	23	45	85	156	288	549	994	1022		55	129	233	434	825	1022	1022	1023
	24	56	89	161	301	577	1006	1022		56	132	238	444	844	1021	1022	1022
	25	53	91	166	314	598	1010	1021		57	135	242	453	857	1021	1022	1023
	26	55	96	173	328	621	1013	1023		58	138	245	460	870	1022	1021	1023
	27	55	99	175	327	620	1013	1021		59	140	251	467	883	1021	1023	1023
	28	61	100	179	346	653	1016	1021		60	142	256	475	902	1022	1023	1022
	29	62	104	188	361	693	1019	1022		61	145	258	482	911	1022	1022	1023
	30	65	110	199	373	714	1018	1022		62	147	263	484	920	1021	1023	1023
	31	68	113	207	388	734	1020	1022		63	151	268	495	934	1022	1022	1023
	32	67	117	212	399	747	1020	1022									

Στη συνέχεια, συνδέθηκαν δώδεκα ηλεκτρόδια μεγάλου μήκους (περίπου 90 cm). Στις μετρήσεις αυτών παρατηρήθηκε ότι οι τιμές ήταν πολύ μικρότερες από ότι προηγουμένως. Η μείωση αυτή στη μετρούμενη τάση (δηλ. αύξηση της χωρητικότητας), πιθανώς οφείλεται σε επαγωγικά φαινόμενα μεταξύ των παράλληλων ηλεκτροδίων. Για τις περιπτώσεις που περιγράφονται στους πίνακες 4.5 και 4.6, η χωρητικότητα υπολογίστηκε σε 40,57pF και 92,88pF αντίστοιχα.



Εικόνα 4.4 – Σύνδεση δώδεκα ηλεκτροδίων μεγάλου μήκους

Επιπλέον, έγιναν δοκιμές για τιμές εισόδου όταν όλα τα ηλεκτρόδια βρίσκονται σε επαφή, αμέσως μετά την επαφή και αφού τα ηλεκτρόδια είχαν αποκτήσει θερμοκρασία δέρματος. Τα αποτελέσματα φαίνονται στους πίνακες 4.7 και 4.8, και οι αντίστοιχες τιμές χωρητικότητας βρέθηκαν να είναι 208,20pF και 456,81pF.

Είναι προφανές ότι η θερμοκρασία είναι κι αυτή ένας παράγοντας που μπορεί να μεταβάλει τη χωρητικότητα ενός αντικειμένου. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας αντιστοιχούν σε υψηλότερες τιμές χωρητικότητας και άρα σε χαμηλότερες τιμές της μετρούμενης τάσης.

Από τις τιμές που λήφθηκαν συνολικά, φαίνεται ότι υπάρχουν αρκετοί παράμετροι που μπορούν να επηρεάσουν τη χωρητικότητα των ηλεκτροδίων. Υπενθυμίζεται ότι μικρές τιμές της μετρούμενης τάσης αντιστοιχούν σε μεγάλες τιμές χωρητικότητας και αντίστροφα.

Αναλύοντας όλα τα δεδομένα αποφασίστηκε τελικά, να χρησιμοποιηθούν ηλεκτρόδια μικρού μήκους, με τον αισθητήρα σε μικρή απόσταση από τη μάσκα. Με αυτόν τον τρόπο, μεγάλο μήκος θα έχουν τα καλώδια ελέγχου της βαλβίδας οξυγόνου, που θεωρείται ότι θα μεταφέρουν σήματα ψηφιακής λογικής και τα οποία επηρεάζονται λιγότερο από το υλικό του μέσου και τις μεταβολές του περιβάλλοντος. Επιπλέον, θα μπορούν να επιλεγθούν μικρές τιμές ρεύματος και χρόνου φόρτισης, επιτυγχάνοντας μικρότερη κατανάλωση ισχύος στο σύστημα, πράγμα που θα μπορούσε να είναι χρήσιμο σε περίπτωση που χρησιμοποιούνταν σε συνδυασμό με κάποια φορητή συσκευή παροχής οξυγόνου.

Πίνακας 4.5 – Μετρήσεις εισόδου για δώδεκα ελεύθερα ηλεκτρόδια

		Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)									Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)						
		0,5	1	2	4	8	16	32			0,5	1	2	4	8	16	32
Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	1	2	6	14	28	58	116	233	Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	33	133	258	500	956	1022	1023	1023
	2	6	14	29	59	119	236	465		34	137	266	515	974	1022	1023	1023
	3	11	22	44	89	179	355	692		35	141	274	529	987	1022	1023	1023
	4	15	30	60	121	240	472	923		36	146	282	544	997	1022	1023	1023
	5	19	38	76	151	300	587	1016		37	149	290	558	1004	1022	1023	1023
	6	23	46	91	182	360	703	1021		38	154	298	572	1009	1022	1023	1023
	7	27	54	107	212	419	817	1022		39	158	306	587	1013	1022	1023	1023
	8	31	62	123	244	479	933	1022		40	162	314	602	1015	1022	1023	1023
	9	35	70	138	274	537	999	1022		41	166	322	616	1017	1022	1023	1023
	10	39	78	154	305	595	1017	1022		42	170	330	630	1018	1022	1023	1023
	11	43	86	169	335	652	1020	1022		43	174	337	644	1019	1022	1023	1023
	12	48	94	185	366	712	1021	1022		44	178	345	659	1020	1022	1023	1023
	13	51	101	200	395	768	1022	1023		45	182	353	673	1020	1022	1023	1023
	14	56	109	216	425	827	1022	1023		46	186	361	687	1021	1023	1023	1023
	15	60	117	231	454	883	1022	1023		47	191	368	701	1021	1023	1023	1023
	16	64	125	246	482	935	1022	1023		48	195	376	716	1021	1023	1023	1023
	17	68	133	262	511	975	1022	1023		49	198	383	730	1021	1023	1023	1023
	18	72	141	277	541	999	1022	1023		50	203	391	744	1021	1023	1023	1023
	19	76	149	292	569	1011	1022	1023		51	207	398	758	1022	1023	1023	1023
	20	80	157	308	599	1016	1022	1023		52	211	406	772	1022	1023	1023	1023
	21	84	164	324	628	1019	1022	1023		53	215	413	786	1022	1023	1023	1023
	22	88	173	339	657	1020	1022	1023		54	219	421	800	1022	1023	1023	1023
	23	93	180	354	686	1021	1022	1023		55	223	428	813	1022	1023	1023	1023
	24	97	189	370	716	1021	1022	1023		56	227	436	829	1022	1023	1023	1023
	25	101	197	385	744	1022	1023	1023		57	231	443	842	1022	1023	1023	1023
	26	105	204	400	773	1022	1023	1023		58	235	451	856	1022	1023	1023	1023
	27	109	212	414	802	1022	1022	1023		59	239	458	869	1022	1023	1023	1023
	28	113	220	430	831	1022	1023	1023		60	243	466	884	1022	1023	1023	1023
	29	117	228	444	859	1022	1023	1023		61	248	473	896	1022	1023	1023	1023
	30	121	236	459	887	1022	1023	1023		62	252	480	909	1022	1023	1023	1023
	31	125	244	473	914	1022	1023	1023		63	255	487	920	1022	1023	1023	1023
	32	129	250	485	935	1022	1023	1023									

Πίνακας 4.6 – Μετρήσεις εισόδου ενός ηλεκτροδίου σε επαφή με τα υπόλοιπα ελεύθερα

		Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)									Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)						
		0,5	1	2	4	8	16	32			0,5	1	2	4	8	16	32
Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	1	2	4	6	12	23	46	92	Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	33	70	121	218	409	781	1020	1023
	2	7	6	14	27	49	97	185		34	73	124	225	423	800	1021	1021
	3	5	10	19	36	75	141	270		35	77	126	232	434	820	1021	1022
	4	8	13	29	51	101	186	360		36	77	130	237	443	842	1021	1022
	5	11	19	33	62	118	231	446		37	77	134	244	459	867	1021	1022
	6	14	22	41	79	150	285	550		38	79	139	253	469	889	1022	1022
	7	15	25	47	86	167	317	616		39	80	151	274	514	948	1022	1022
	8	17	29	56	100	190	368	703		40	82	148	272	535	1011	1022	1023
	9	22	32	60	113	213	413	815		41	97	175	324	611	1015	1022	1023
	10	18	37	68	125	244	471	905		42	98	175	331	627	1016	1022	1023
	11	20	41	76	140	270	516	971		43	101	184	344	652	1018	1022	1023
	12	27	44	81	152	293	560	1002		44	104	189	353	668	1019	1023	1023
	13	25	48	88	167	315	605	1013		45	106	191	359	684	1018	1022	1023
	14	29	53	94	178	340	647	1017		46	110	196	366	694	1020	1022	1023
	15	33	56	102	190	359	696	1019		47	110	200	373	711	1020	1022	1022
	16	34	58	108	203	382	734	1020		48	114	205	381	726	1021	1022	1022
	17	37	64	113	211	408	781	1021		49	115	208	390	735	1020	1022	1023
	18	38	66	121	227	435	831	1021		50	118	213	398	753	1021	1022	1022
	19	41	71	130	240	452	872	1022		51	118	217	405	770	1021	1022	1022
	20	43	74	133	252	484	919	1021		52	123	220	414	785	1021	1022	1023
	21	44	79	140	267	500	948	1021		53	125	224	420	797	1022	1022	1023
	22	45	82	149	277	526	979	1022		54	129	230	425	807	1022	1022	1023
	23	45	85	156	288	549	994	1022		55	129	233	434	825	1022	1022	1023
	24	56	89	161	301	577	1006	1022		56	132	238	444	844	1021	1022	1022
	25	53	91	166	314	598	1010	1021		57	135	242	453	857	1021	1022	1023
	26	55	96	173	328	621	1013	1023		58	138	245	460	870	1022	1021	1023
	27	55	99	175	327	620	1013	1021		59	140	251	467	883	1021	1023	1023
	28	61	100	179	346	653	1016	1021		60	142	256	475	902	1022	1023	1022
	29	62	104	188	361	693	1019	1022		61	145	258	482	911	1022	1022	1023
	30	65	110	199	373	714	1018	1022		62	147	263	484	920	1021	1023	1023
	31	68	113	207	388	734	1020	1022		63	151	268	495	934	1022	1022	1023
	32	67	117	212	399	747	1020	1022									

Πίνακας 4.7 – Μετρήσεις εισόδου ενός από δώδεκα ηλεκτρόδια σε επαφή για θερμοκρασία δωματίου

		Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)									Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)						
		0,5	1	2	4	8	16	32			0,5	1	2	4	8	16	32
Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	1	0	1	3	7	14	27	49	Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	33	43	72	126	224	402	717	1005
	2	1	4	7	15	29	53	96		34	44	74	129	230	412	736	1006
	3	3	6	12	23	43	78	141		35	46	76	133	236	423	754	1007
	4	4	8	16	30	57	103	187		36	47	78	136	242	433	773	1007
	5	6	11	20	38	70	128	230		37	48	80	140	248	443	791	1008
	6	7	13	24	45	83	152	274		38	49	82	143	254	453	808	1008
	7	9	16	29	53	97	176	317		39	50	84	146	260	463	827	1009
	8	10	18	33	60	110	200	361		40	52	86	150	265	474	844	1010
	9	12	20	37	68	123	223	402		41	53	88	153	271	484	863	1010
	10	13	23	41	75	136	246	444		42	54	90	156	277	493	878	1011
	11	14	25	45	82	149	269	484		43	55	92	160	282	503	894	1011
	12	16	27	49	89	161	293	525		44	57	94	163	288	513	910	1011
	13	17	30	53	96	174	315	564		45	58	96	166	294	523	924	1012
	14	18	32	57	103	186	337	605		46	59	98	169	299	532	937	1012
	15	20	34	61	109	198	359	643		47	60	99	172	304	541	946	1012
	16	21	36	64	116	210	379	678		48	61	101	175	310	550	955	1012
	17	22	38	68	122	222	400	715		49	63	103	178	315	560	963	1013
	18	24	40	72	129	233	421	753		50	64	105	182	321	570	970	1013
	19	25	43	75	136	245	442	791		51	65	107	185	326	578	974	1013
	20	26	45	79	142	257	464	829		52	66	109	188	331	587	979	1013
	21	28	47	83	149	269	484	866		53	67	111	190	336	596	982	1013
	22	29	49	87	156	281	505	901		54	69	113	194	341	605	986	1014
	23	30	51	91	162	292	526	932		55	70	114	197	347	615	989	1014
	24	32	54	94	169	305	547	957		56	71	116	200	352	624	991	1014
	25	33	56	98	175	316	567	973		57	72	118	203	358	633	993	1014
	26	34	58	102	182	327	587	983		58	73	120	206	363	642	994	1014
	27	36	60	105	188	339	607	990		59	74	122	209	368	651	996	1014
	28	37	62	109	194	350	627	995		60	76	124	213	374	662	997	1015
	29	38	64	112	201	361	646	998		61	77	126	216	379	670	998	1015
	30	39	66	116	207	372	665	1000		62	78	128	219	384	680	1000	1015
	31	41	68	120	213	383	684	1002		63	79	129	222	390	689	1000	1015
	32	42	70	122	218	391	699	1003									

Πίνακας 4.8 – Μετρήσεις εισόδου ενός από δώδεκα ηλεκτρόδια σε επαφή για θερμοκρασία δέρματος

		Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)									Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)						
		0,5	1	2	4	8	16	32			0,5	1	2	4	8	16	32
Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	1	0	0	1	3	6	12	21	Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	33	31	47	76	125	211	359	612
	2	0	2	3	7	13	24	42		34	32	48	78	129	217	369	630
	3	2	3	6	11	20	36	62		35	33	50	80	133	223	379	647
	4	3	5	8	15	27	47	81		36	34	51	82	137	229	390	665
	5	4	6	11	19	34	59	100		37	35	53	85	140	236	401	683
	6	4	8	13	23	41	70	119		38	36	54	87	144	242	411	701
	7	5	9	16	27	47	81	137		39	36	55	89	148	248	421	718
	8	6	11	18	31	54	92	157		40	37	57	91	151	254	432	737
	9	8	12	21	35	61	103	175		41	38	58	94	155	261	442	754
	10	8	14	23	39	67	114	194		42	39	60	96	158	267	452	772
	11	9	15	25	43	73	125	213		43	40	61	98	162	273	463	790
	12	11	17	28	47	80	136	232		44	41	63	100	166	279	473	808
	13	12	18	30	51	87	147	250		45	42	64	103	169	285	483	825
	14	12	20	32	55	93	158	269		46	43	66	105	173	291	494	843
	15	13	21	35	58	99	168	287		47	44	67	107	177	297	504	860
	16	14	22	37	62	105	179	305		48	45	68	109	180	303	514	876
	17	15	24	39	66	111	189	323		49	46	70	111	184	309	524	892
	18	16	25	42	70	118	200	342		50	47	71	114	187	315	534	908
	19	18	27	44	74	124	211	360		51	48	72	116	191	321	544	921
	20	18	28	47	78	131	222	379		52	49	74	118	195	327	555	934
	21	19	30	49	81	137	233	397		53	50	75	120	198	333	565	944
	22	20	31	51	85	143	243	416		54	51	76	122	202	339	575	953
	23	21	33	53	89	150	254	434		55	52	78	125	205	345	585	960
	24	22	34	56	93	156	265	453		56	53	80	127	209	351	596	966
	25	23	36	58	97	162	276	471		57	54	81	129	213	357	606	971
	26	24	37	60	100	169	287	489		58	54	82	131	216	363	616	975
	27	25	38	63	104	175	297	507		59	55	84	134	220	369	626	979
	28	26	40	65	108	181	308	526		60	56	85	136	223	375	636	982
	29	27	41	67	111	188	319	544		61	57	86	138	227	381	646	984
	30	28	43	69	115	194	329	562		62	58	88	140	231	387	656	986
	31	29	44	72	119	200	340	579		63	59	89	142	234	393	666	988
	32	30	45	74	121	205	348	594									

4.2 – Το ηλεκτρόδιο αναφοράς

Κατά τη λήψη των μετρήσεων που προηγήθηκαν, παρατηρήθηκε και πρακτικά η λειτουργία του φίλτρου 3^{ου} επιπέδου και του τρόπου υπολογισμού των τιμών εξόδου αυτού. Σύμφωνα με το datasheet του MPR121 (βλ. παράγραφο 3.2), το φίλτρο αυτό μπορεί να τεθεί ουσιαστικά σε δύο καταστάσεις λειτουργίας, ενεργής ανίχνευσης τιμής βάσης και μη. Στην πρώτη περίπτωση, οι τιμές εξόδου του φίλτρου αρχικοποιούνται από τις τιμές εξόδου του φίλτρου 2^{ου} επιπέδου και ακολουθούν μικρές μεταβολές αυτών ώστε να καθορίζονται οι τιμές ελεύθερων ηλεκτροδίων. Αυτό σημαίνει ότι το ολοκληρωμένο θεωρεί ότι κατά την εκκίνησή του (ή επανεκκίνηση), οι πρώτες μετρούμενες τιμές αντιστοιχούν σε ελεύθερα ηλεκτρόδια, ή στην περίπτωση της παρούσας εφαρμογής ότι η μάσκα δεν είναι τοποθετημένη στο πρόσωπο του ασθενή και γενικά ότι δεν υπάρχει επαφή δέρματος και ηλεκτροδίων.

Ένα ακόμη μειονέκτημα του ενεργού τρόπου λειτουργίας του φίλτρου 3^{ου} επιπέδου είναι ότι, όπως αναφέρθηκε, αλλάζει τις τιμές βάσης ακολουθώντας τυχόν μικρές μεταβολές των μετρούμενων τιμών των εισόδων (η ανίχνευση αφής πραγματοποιείται ύστερα από μεγάλη, απότομη μεταβολή). Αυτό γίνεται για να καλυφθεί η περίπτωση όπου αλλαγές του περιβάλλοντος χώρου επιδρούν στη χωρητικότητα των ηλεκτροδίων (όπως παρατηρήθηκε πιο πριν και για τη θερμοκρασία). Όμως, το ίδιο αποτέλεσμα μπορεί να παρουσιαστεί εάν πλησιάσουμε αργά ένα ηλεκτρόδιο. Η αντίστοιχη τιμή βάσης θα μεταβληθεί παράλληλα με τη σταδιακή αύξηση της χωρητικότητας, και όταν τελικά θα υπάρξει επαφή ο αισθητήρας δε θα την ανιχνεύσει. Προφανώς, μία τέτοια κατάσταση θα μπορούσε να παρουσιαστεί κατά τη χρήση της μάσκας προσώπου.

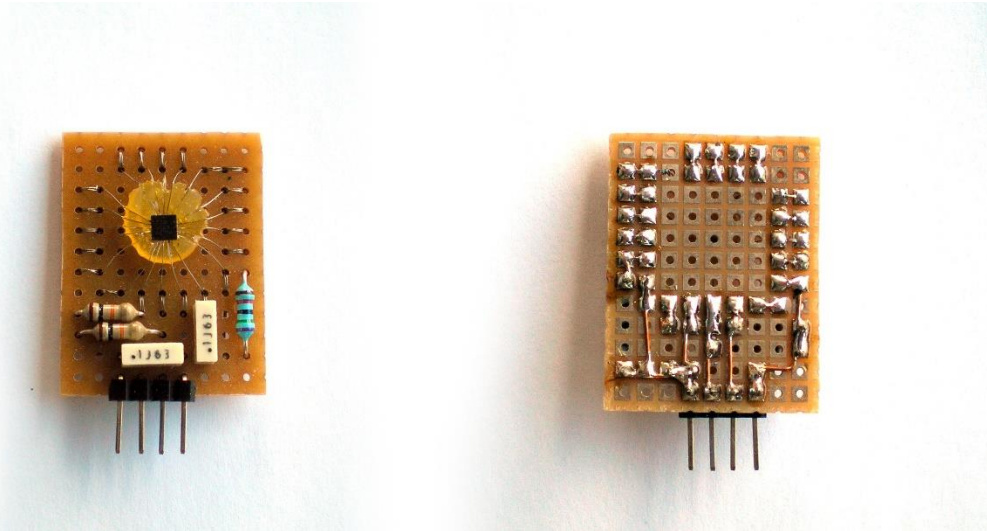
Για τους δύο παραπάνω λόγους κρίθηκε απαραίτητο, η λειτουργία ανίχνευσης τιμών βάσης του φίλτρου 3^{ου} επιπέδου να απενεργοποιηθεί και η τιμές βάσης να ανανεώνονται σύμφωνα με ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς το οποίο θα τοποθετηθεί σε εσωτερικό σημείο της μάσκας κατάλληλο έτσι ώστε να μην είναι δυνατή η επαφή με αυτό.

4.3 – Το κύκλωμα του αισθητήρα

Όπως προαναφέρθηκε, αποφασίστηκε ο αισθητήρας αφής MPR121 να βρίσκεται κοντά στη μάσκα, ώστε το μήκος των ηλεκτροδίων να είναι μικρό. Η απόφαση αυτή κατέστησε το shield που χρησιμοποιήθηκε μέχρι τώρα μη βολικό για τη διεκπεραίωση της εφαρμογής λόγω του μεγέθους του.

Πλέον έπρεπε να κατασκευασθεί νέο κύκλωμα για τη λειτουργία του MPR121 σύμφωνα με το σχέδιο που δίνεται στο datasheet (βλ. παράγραφο 3.1), όσο το δυνατόν μικρότερων διαστάσεων. Σε αυτό το σημείο παρουσιάστηκε πρόβλημα λόγω του πολύ μικρού μεγέθους του ολοκληρωμένου, το οποίο καθιστούσε τις απλές μεθόδους κατασκευής PCB μη εφαρμόσιμες. Για το λόγο αυτό κολλήθηκαν λεπτά καλώδια απευθείας στις επαφές του MPR121, και μέσω αυτών τοποθετήθηκε σε διάτρητη πλακέτα. Στην ίδια πλακέτα τοποθετήθηκαν και τα απαραίτητα για τη λειτουργία του στοιχεία για να είναι πιο άμεση η σύνδεση με αυτό κατά την υπόλοιπη διάρκεια ανάπτυξης της εφαρμογής.

Το τελικό κύκλωμα φαίνεται στην επόμενη φωτογραφία.

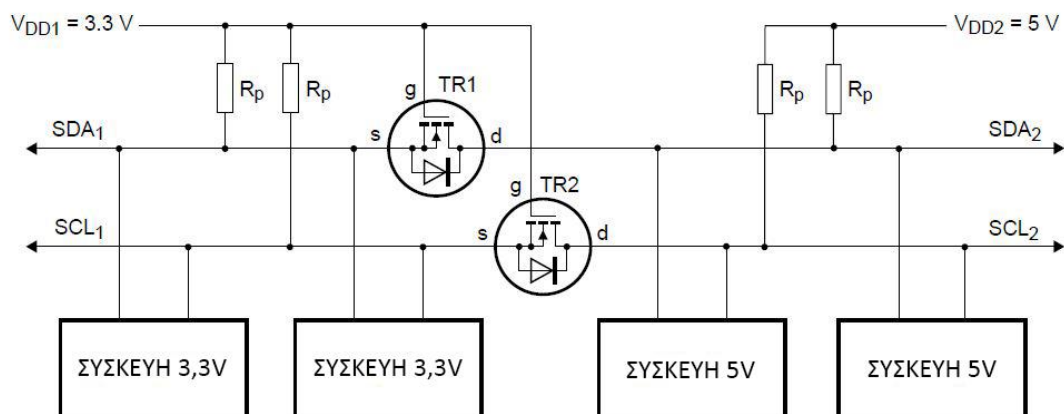


Εικόνα 4.5 – Το κύκλωμα του αισθητήρα αφής MPR121

4.4 – Κύκλωμα μετατροπέα επιπέδου τάσης

Προς το παρόν, η ανάπτυξη της εφαρμογής συνεχίστηκε με χρήση του κυκλώματος Arduino για εκμετάλλευση της ευχρηστίας και των δυνατοτήτων του. Το πρόβλημα με αυτή την απόφαση είναι ότι ο αισθητήρας MPR121 λειτουργεί με μέγιστη τάση τροφοδοσίας 3,6V. Μεγαλύτερη τιμή από αυτή πιθανόν να προκαλέσει ζημιά στο ολοκληρωμένο ή και να το καταστρέψει. Από την άλλη πλευρά το Arduino λειτουργεί με τάση 5V, και αν και παρέχει έξοδο τροφοδοσίας των 3,3V το ζήτημα των διαφορετικών επιπέδων τάσης δεν επιλύεται. Ο λόγος είναι η διασύνδεση του αισθητήρα και του μικροελεγκτή μέσω του πρωτοκόλλου I²C το οποίο χρησιμοποιεί τις γραμμές SCL και SDA για τη μεταφορά των δεδομένων. Από την πλευρά του MPR121 η τάση στις γραμμές αυτές δε θα πρέπει να ξεπερνά τα 3,6V, ενώ το Arduino θα χρησιμοποιεί σήματα των 5V.

Για την επίλυση αυτού του προβλήματος χρησιμοποιήθηκαν δύο τρανζίστορ επίδρασης πεδίου μετάλλου-οξειδίου-ημιαγωγού, πύκνωσης, καναλιού-N (N-channel enhancement Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOS-FET), για την κατασκευή ενός κυκλώματος δύο μετατροπέων επιπέδου τάσης (level shifter). Τα τρανζίστορ συνδέονται σε κάθε γραμμή ως εξής: Η πύλη (Gate) συνδέεται στην χαμηλή τάση τροφοδοσίας (στα 3,3V στη συγκεκριμένη περίπτωση), η πηγή (Source) συνδέεται στην πλευρά 'χαμηλής τάσης' της γραμμής (προς τον αισθητήρα), και η υποδοχή (Drain) στην πλευρά 'υψηλής τάσης' (προς το Arduino).



Εικόνα 4.6 – Κυκλωματικό σχέδιο του μετατροπέα επιπέδου τάσης

Λειτουργία του μετατροπέα

Υπάρχουν τρεις καταστάσεις μέσω των οποίων χαρακτηρίζεται η λειτουργία του κυκλώματος του μετατροπέα.

Σημείωση: Και οι δύο πλευρές των γραμμών διατηρούνται σε κατάσταση HIGH από αντιστάσεις ανύψωσης (pull-up resistors).

1. Καμία συσκευή δε θέτει τη γραμμή σε LOW. Η πλευρά 'χαμηλής τάσης' βρίσκεται υπό τάση 3,3V όπως και η πύλη, έτσι η τάση πύλης-πηγής (V_{GS}) είναι μικρότερη από την τάση κατωφλίου (V_t) και το τρανζίστορ δεν άγει, επιτρέποντας στην πλευρά 'υψηλής τάσης' να βρίσκεται στα 5V. Και οι δύο πλευρές σε κατάσταση HIGH.
2. Μία συσκευή θέτει τη πλευρά 'χαμηλής τάσης' σε LOW. Τώρα η V_{GS} είναι μεγαλύτερη από τη V_t και το FET άγει. Μέσω αυτού, η πλευρά 'υψηλής τάσης' τίθεται κι αυτή σε LOW. Και οι δύο πλευρές σε κατάσταση LOW.
3. Μία συσκευή θέτει τη πλευρά 'υψηλής τάσης' σε LOW. Η διόδος που σχηματίζεται μεταξύ υποδοχής και υποστρώματος αρχίζει και άγει, τραβώντας την πλευρά 'χαμηλής τάσης' σε τάση μικρότερη των 3,3V, καθώς το υπόστρωμα και η πηγή στο FET είναι βραχυκυκλωμένα. Σε κάποιο σημείο το V_{GS} ξεπερνά και πάλι την τάση κατωφλίου V_t και το τρανζίστορ πλέον άγει θέτοντας την πλευρά 'χαμηλής τάσης' σε LOW. Και οι δύο πλευρές σε κατάσταση LOW.

Αυτές οι καταστάσεις δείχνουν ότι τα επίπεδα ψηφιακής λογικής μεταφέρονται και στις δύο πλευρές της διεπαφής καθιστώντας δυνατή την επικοινωνία μεταξύ συσκευών διαφορετικής τάσης. [16]

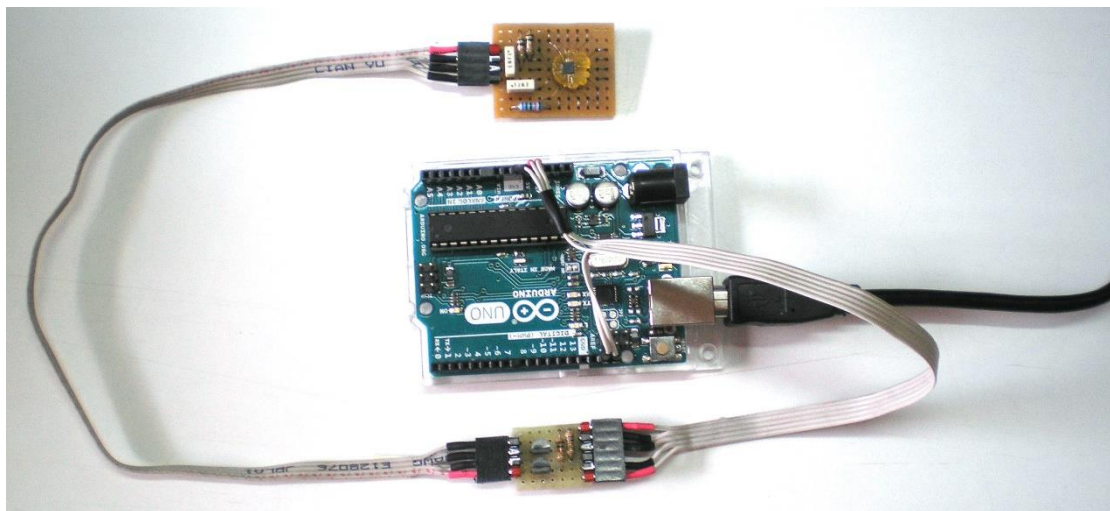


Εικόνα 4.7 – Ο υλοποιημένος μετατροπέας επιπέδου τάσης

Σημείωση: Τα λατινικά γράμματα ‘A’ και ‘L’ επάνω στο κύκλωμα αντιστοιχούν στις γραμμές SDA και SCL, και τα χρωματισμένα με κόκκινο pins υποδεικνύουν γραμμές τροφοδοσίας, είτε 3,3V είτε 5V. Όπως φαίνεται στη φωτογραφία, στο κύκλωμα βρίσκονται και οι αντιστάσεις ανύψωσης της πλευράς ‘υψηλής τάσης’. Εκείνες, της πλευράς ‘χαμηλής τάσης’ έχουν προβλεφθεί στο κύκλωμα του αισθητήρα, ώστε να ακολουθεί το κυκλωματικό σχέδιο όπως δίνεται στο datasheet του MPR121.

4.5 – Έλεγχοι και νέες μετρήσεις

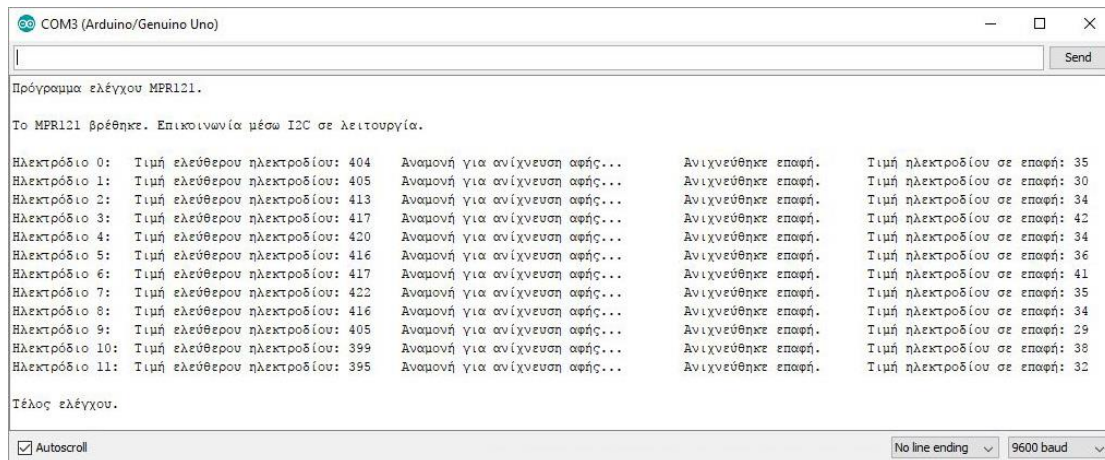
Στη συνέχεια ελέγχθηκε η σωστή λειτουργία των κυκλωμάτων που κατασκευάστηκαν.



Εικόνα 4.8 – Το κύκλωμα του MPR121 συνδεδεμένο με το Arduino μέσω του level shifter

Γράφτηκε κατάλληλο πρόγραμμα το οποίο, αφού ελέγξει την επικοινωνία με τον αισθητήρα αφής μέσω ανάγνωσης της προεπιλεγμένης τιμής του καταχωρητή **AFE Configuration 2**

(0x24), ανιχνεύει τις αλλαγές κατάστασης επαφής/απελευθέρωσης των εισόδων, αναγράφοντας και τις τιμές εξόδου του φίλτρου 2^{ου} επιπέδου. Η έξοδος του προγράμματος φαίνονται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 4.9 – Τα αποτελέσματα ελέγχου λειτουργίας του κυκλώματος

Τέλος, λήφθηκαν και μετρήσεις για τις διάφορες τιμές του ρεύματος και του χρόνου φόρτισης, πάλι σε κάποια τυχαία είσοδο. Τα αποτελέσματα βρίσκονται στον πίνακα 4.9. Η μέση χωρητικότητα που αντιστοιχεί στις μετρήσεις είναι 6,49pF.

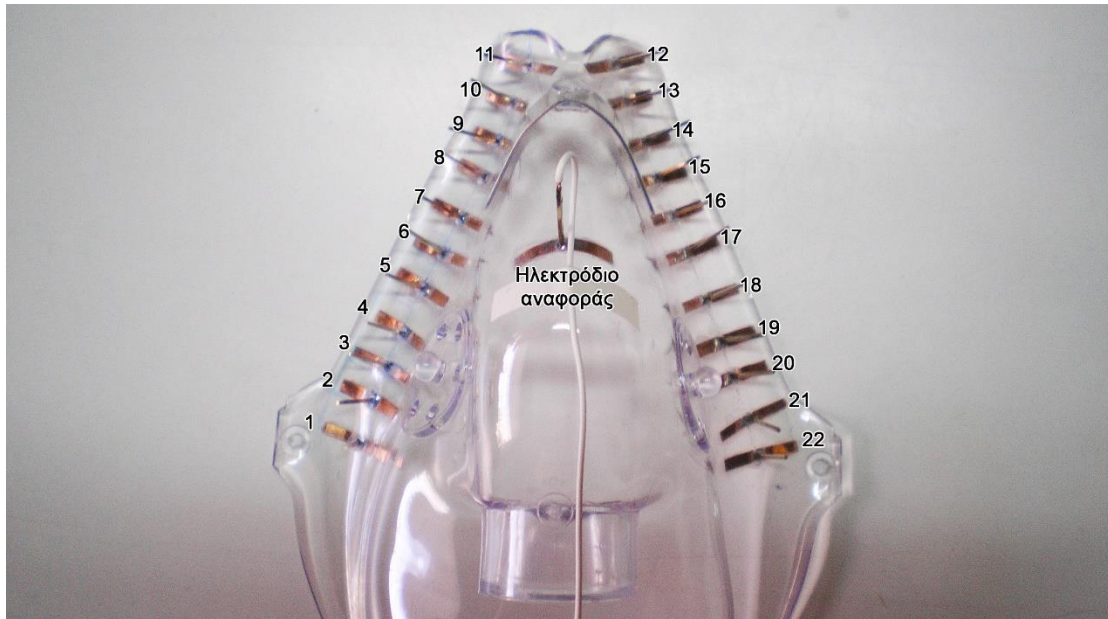
4.6 – Επιλογή θέσεων των ηλεκτροδίων

Αρχικά, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί μόνο το άνω μισό (περίπου) τμήμα της μάσκας, όπου οι τρίχες του προσώπου στους άνδρες, δε θα εμπόδιζε την επαφή ηλεκτροδίων και επιδερμίδας. Σύμφωνα με αυτό, τα έντεκα ηλεκτρόδια τοποθετήθηκαν σε σημεία της επιλεγμένης περιοχής έτσι ώστε να απέχουν ίση απόσταση μεταξύ τους (το δωδέκατο ηλεκτρόδιο χρησιμοποιείται ως ηλεκτρόδιο αναφοράς). Η προσέγγιση αυτή όμως αποδείχθηκε ότι δε ήταν εφαρμόσιμη καθώς ορισμένα σημεία της μάσκας δεν είχαν πάντα ή και ποτέ επαφή με το δέρμα.

Στο σημείο αυτό φάνηκε η ανάγκη για την εύρεση σημείων στη μάσκα όπου η πιθανότητα επαφής ηλεκτροδίων και δέρματος θα ήταν μεγάλη. Η επιλογή των βέλτιστων αυτών σημείων στα οποία θα γινόταν η τελική τοποθέτηση των ηλεκτροδίων έγινε με τη χρήση μίας μάσκας δειγματοληψίας. Στη μάσκα αυτή τοποθετήθηκαν είκοσι δύο επαφές και ύστερα από αρκετές διαδοχικές τοποθετήσεις στο πρόσωπο επιλέχθηκαν δέκα σημεία (πέντε σε κάθε πλευρά) για την τελική κατασκευή.

Πίνακας 4.9 – Μετρήσεις εισόδου για το νέο κύκλωμα του MPR121 για ελεύθερη είσοδο

		Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)									Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)							
		0.5	1	2	4	8	16	32			0.5	1	2	4	8	16	32	
Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	1	21	46	98	202	397	737	1022	Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	33	733	1022	1023	1023	1023	1023	1023	
	2	47	98	202	397	735	1022	1023		34	751	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	3	73	151	307	568	1008	1023	1023		35	768	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	4	99	203	399	735	1022	1023	1023		36	788	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	5	125	256	484	905	1023	1023	1023		37	804	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	6	152	309	568	1006	1023	1023	1023		38	822	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	7	178	358	651	1021	1023	1023	1023		39	837	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	8	204	402	734	1022	1023	1023	1023		40	857	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	9	231	445	817	1023	1023	1023	1023		41	871	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	10	258	487	898	1023	1023	1023	1023		42	887	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	11	284	528	965	1023	1023	1023	1023		43	901	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	12	310	569	1002	1023	1023	1023	1023		44	918	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	13	336	608	1015	1023	1023	1023	1023		45	929	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	14	361	648	1020	1023	1023	1023	1023		46	942	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	15	382	688	1022	1023	1023	1023	1023		47	951	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	16	404	729	1022	1023	1023	1023	1023		48	967	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	17	425	768	1023	1023	1023	1023	1023		49	974	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	18	446	809	1023	1023	1023	1023	1023		50	982	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	19	466	847	1023	1023	1023	1023	1023		51	987	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	20	487	887	1023	1023	1023	1023	1023		52	994	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	21	506	920	1023	1023	1023	1023	1023		53	998	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	22	526	951	1023	1023	1023	1023	1023		54	1002	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	23	545	975	1023	1023	1023	1023	1023		55	1004	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	24	567	994	1023	1023	1023	1023	1023		56	1009	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	25	585	1004	1023	1023	1023	1023	1023		57	1010	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	26	605	1011	1023	1023	1023	1023	1023		58	1012	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	27	623	1015	1023	1023	1023	1023	1023		59	1014	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	28	642	1018	1023	1023	1023	1023	1023		60	1015	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	29	659	1019	1023	1023	1023	1023	1023		61	1016	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	30	678	1021	1023	1023	1023	1023	1023		62	1017	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	31	696	1021	1023	1023	1023	1023	1023		63	1018	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	32	716	1022	1023	1023	1023	1023	1023										



Εικόνα 4.10 – Η μάσκα για την επιλογή των δέκα σημείων τοποθέτησης των ηλεκτροδίων

Οι επιφάνειες των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιήθηκαν στη διεκπεραίωση της εργασίας κατασκευάστηκαν από λεπτό φύλλο χαλκού κομμένο σε κομμάτια των 15 x 2 mm τα οποία κολλήθηκαν στο εσωτερικό της μάσκας οξυγόνου, κάθετα στην περίμετρο αυτής. Στο σημείο τοποθέτησης του κάθε ηλεκτροδίου έγινε μία οπή στη μάσκα από όπου εξέρχονται οι επαφές ελέγχου για τη μάσκα δειγματοληψίας, ή για τη τελική κατασκευή (όπως θα φανεί στη συνέχεια) τα καλώδια των ηλεκτροδίων μέσω των οποίων συνδέονται με τον αισθητήρα αφής MPR121.

Πίνακας 4.10 – Αποτελέσματα επαφής ηλεκτροδίων σε 22 σημεία

		Ηλεκτρόδια																					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Δοκιμές	1	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓
	3	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	4	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	5	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	6	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	7	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓
	8	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓
	9	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	10	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓

Από τα δεδομένα του πίνακα 4.10 αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν τα σημεία 1, 2, 3, 8, 9, 14, 15, 20, 21 και 22 (σημειωμένα με πράσινο χρώμα). Εκτός της συνεχούς επαφής που παρουσίασαν τα σημεία αυτά, μπορούν να χωρισθούν σε τέσσερις ομάδες (άνω-δεξιά, άνω-αριστερή, κάτω-δεξιά και κάτω-αριστερή) μέσω των οποίων θα γίνεται ο έλεγχος για την κατάσταση της μάσκας.

4.7 – Προδιαγραφές κατασκευής της μάσκας

Όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3 της περιγραφής του αισθητήρα αφής MPR121, και συζητήθηκε στην παράγραφο 4.2 του ηλεκτροδίου αναφοράς, η ανίχνευση επαφής γίνεται ύστερα από απότομη πτώση της τιμής εξόδου του φίλτρου 2^{ου} επιπέδου, σε σύγκριση με την τιμή βάσης. Έτσι, από τη στιγμή που αποφασίστηκε η χρήση ηλεκτροδίου αναφοράς του οποίου η μετρούμενη τιμή θα τίθεται ως τιμή βάσης των ηλεκτροδίων ελέγχου, θα πρέπει η τιμές χωρητικότητας των τελευταίων να ισούται με εκείνη του πρώτου.

Αυτό παρουσιάζει προβλήματα στην κατασκευή καθώς απαιτείται μεγάλη ακρίβεια στην υλοποίηση των ηλεκτροδίων. Πιο συγκεκριμένα, από τη στιγμή που, λόγω των θέσεων τους, τα ηλεκτρόδια θα έχουν διαφορετικό μήκος καλωδίου το καθένα, με το οποίο θα συνδέονται στον αισθητήρα και το οποίο θα εμφανίζει διαφορετική τιμή χωρητικότητας, τότε θα πρέπει να υιοθετηθεί κάποια μέθοδος ώστε να αντισταθμιστεί η διαφορά αυτή.

Προσεγγίσεις

Ένας τρόπος θα ήταν το κάθε ηλεκτρόδιο (συμπεριλαμβανομένου και του ηλεκτροδίου αναφοράς) να έχει διαφορετικό εμβαδό επαφής, με εκείνα που θα είναι σε μεγαλύτερη απόσταση από τον αισθητήρα να έχουν το μικρότερο και όσο πλησιάζουν να αυξάνεται η επιφάνεια τους. Με αυτή τη μέθοδο όλα τα ηλεκτρόδια θα μπορούσαν να έχουν συνολική χωρητικότητα (καλωδίου και επαφής) ίδια.

Η δεύτερη προσέγγιση αφορά επιλογή διαφορετικών τιμών ρεύματος και χρόνου φόρτισης για κάθε ηλεκτρόδιο ξεχωριστά. Τώρα, παρόλο που η πραγματική τιμή της χωρητικότητας θα είναι διαφορετική, η τιμή 10 bit της μετρούμενης τάσης θα είναι η ίδια, και η ανίχνευση αφής σε όλα τα ηλεκτρόδια θα μπορεί και εδώ να χρησιμοποιεί κοινή τιμή βάσης.

Και οι δύο μέθοδοι έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τα όποια λήφθηκαν υπόψιν για την τελική επιλογή. Αναλυτικά, στην πρώτη περίπτωση το μεγαλύτερο κέρδος είναι η δυνατότητα χρήσης καθολικών τιμών στη ρύθμιση των παραμέτρων του MPR121 και γενικά η διευκόλυνση στη πλευρά του προγραμματισμού. Όμως, από την άλλη πλευρά, ηλεκτρόδια μεγάλης επιφάνειας επαφής θα δυσχεραίνουν τη χρήση της μάσκας, καθιστώντας την πιο δύσκαμπτη και άβολη. Ακόμα, όσο μεγαλύτερο συνολικό μέγεθος έχει ένα ηλεκτρόδιο, τόσο πιο επιρρεπές θα είναι σε μεταβολές του περιβάλλοντος και άρα αναμένεται να υπάρχουν αποκλίσεις τιμών μεταξύ των ηλεκτροδίων κατά τη διάρκεια χρήσης του συστήματος.

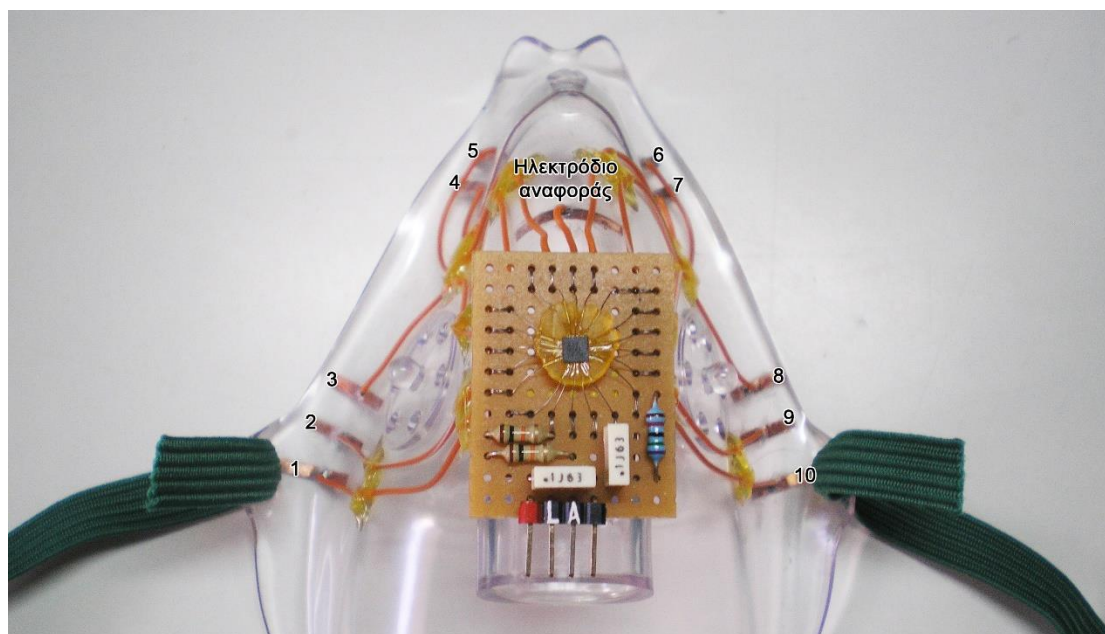
Στη δεύτερη περίπτωση, διευκολύνεται η κατασκευή στην πλευρά του υλικού. Στα ηλεκτρόδια μπορεί να αποδοθεί το μικρότερο δυνατό μέγεθος, γεγονός που θα αποφέρει μικρότερες αποκλίσεις σε αλλαγές των περιβαλλοντολογικών συνθηκών και θα επηρεάσει λιγότερο και την ίδια τη μάσκα. Στο κομμάτι του λογισμικού όμως εμφανίζονται μεγαλύτερες απαιτήσεις. Η επιλογή των παραμέτρων πρέπει να είναι πιο σχολαστική και θα πρέπει να

γίνει χρήση των καταχωρητών των διευθύνσεων 0x5F ως 0x72 για την ξεχωριστή ρύθμιση του ρεύματος και του χρόνου φόρτισης κάθε ηλεκτροδίου, που στην προηγούμενη περίπτωση αγνοούνται.

Από όσα αναφέρθηκαν πιο πάνω, αποφασίστηκε η χρήση της δεύτερης προσέγγισης. Οι λόγοι είναι, πρώτον, ότι μετατροπές και βελτιώσεις σε επίπεδο λογισμικού είναι σαφώς πιο εύκολο να γίνουν από ότι στο υλικό και δεύτερον, ότι όπως θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο, παρά τη χρήση του συστήματος ελέγχου η μάσκα οξυγόνου θα μπορεί να παραμείνει αναλώσιμη, και άρα θα ήταν λογικό η κατασκευή της να παραμείνει όσον το δυνατόν απλούστερη.

4.8 – Η μάσκα

Με βάση τις προδιαγραφές που δόθηκαν κατά τη μέχρι τώρα ανάλυση η μάσκα κατασκευάστηκε όπως φαίνεται στην εικόνα 4.11.



Εικόνα 4.11 – Η τελική κατασκευή της μάσκας

Σημείωση: Η αντιστοιχία των επαφών της μάσκας όπως φαίνεται στην εικόνα και των εισόδων του αισθητήρα είναι 1-11, 2-10, 3-9, 4-6, 5-8, 6-3, 7-4, 8-2, 9-1, 10-0, 'ηλεκτρόδιο αναφοράς'-5.

Για την επίτευξη μικρού μήκους καλωδίων στα ηλεκτρόδια, το κύκλωμα του αισθητήρα MPR121 στερεώθηκε επάνω στη μάσκα. Τα καλώδια κολλήθηκαν κι αυτά ώστε να είναι σταθερή η θέση τους και να υπάρχουν όσο το δυνατό λιγότερες επιρροές μεταξύ τους. Χρησιμοποιήθηκαν λεπτά, πολύκλινα καλώδια ώστε από την μία πλευρά να είναι ο όγκος τους μικρός (και άρα και η χωρητικότητα που θα προσθέτουν στο ηλεκτρόδιο) και από την άλλη για να αποφευχθεί διακοπή του, λόγω της ελαστικότητας της μάσκας.

Οι επιφάνειες των ηλεκτροδίων κατασκευάστηκαν και τοποθετήθηκαν όπως περιγράφεται στην παράγραφο 4.6.

4.9 – Επιλογή ρυθμίσεων ηλεκτροδίων

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, βάσει των επιλογών που έγιναν, πρέπει να επιλεγούν διαφορετικές ρυθμίσεις ρεύματος και χρόνου φόρτισης για κάθε ηλεκτρόδιο. Για να γίνει αυτό λήφθηκαν οι τιμές της μετρούμενης τάσης σε κάθε ηλεκτρόδιο για όλους του συνδυασμούς ρεύματος και χρόνου φόρτισης.

Σημείωση: Οι αντίστοιχοι πίνακες αποδίδονται στο παράρτημα Γ.

Αρχικά, για κάθε ένα ηλεκτρόδιο επιλέχθηκαν τιμές στις οποίες αντιστοιχούσε τιμή τάσης 10 bit, περίπου 600. Παρατηρούμε, ότι υπάρχουν πολλοί συνδυασμοί I και T όπου λαμβάνεται τέτοια τιμή. Όμως μπορούμε να δούμε ότι το γινόμενο I x T είναι σε όλες αυτές τις περιπτώσεις ίδιο, και άρα η κατανάλωση ισχύος θα είναι σε κάθε περίπτωση ίδια.

Οι τιμές της χωρητικότητας όπως υπολογίστηκαν για το κάθε ηλεκτρόδιο της μάσκας παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 4.11 – Χωρητικότητα ηλεκτροδίων της μάσκας (pF)

	Ηλεκτρόδιο Αναφοράς	Ηλεκτρόδια Ελέγχου									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ελεύθερο	6,78	7,60	7,50	7,33	7,43	7,53	7,58	7,43	7,25	7,40	7,38
Σε επαφή		482,34	690,55	1238,19	808,26	434,71	510,35	911,07	536,95	874,65	310,80

Όρια ανίχνευσης επαφής και απελευθέρωσης

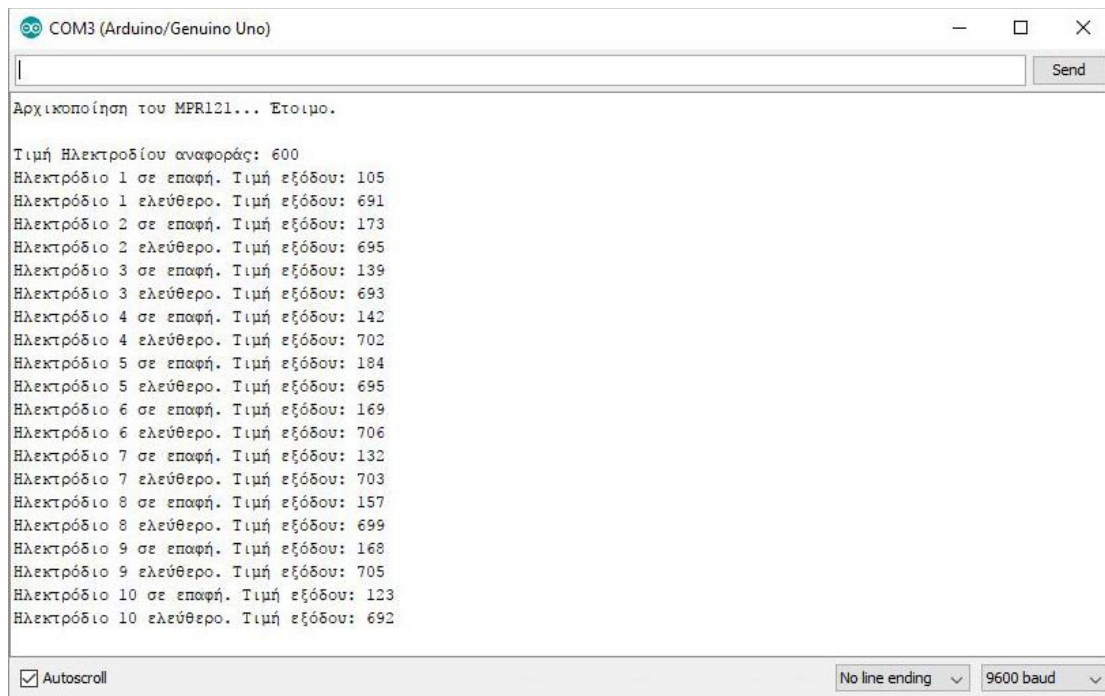
Σε αυτό το σημείο, εμφανίστηκε ένα ακόμη πρόβλημα. Μέχρι εδώ, οι τιμές για την ανίχνευση επαφής και απελευθέρωσης στους καταχωρητές **Touch and Release Threshold** (0x41 – 0x5A), θέτονταν ίδιες. Όμως, τώρα, με κοινή τιμή βάσης, μικρές αποκλίσεις της μετρούμενης τάσης μεταξύ των ηλεκτροδίων ελέγχου και αναφοράς κατέληγαν σε εσφαλμένη επιλογή κατάστασης.

Η προφανής επίλυση θα ήταν να επιλεχθούν διαφορετικά όρια για κάθε ηλεκτρόδιο, ανάλογα με την εκάστοτε απόκλιση. Η προσέγγιση αυτή θα ήταν λειτουργική, αρκεί όμως να είχε γίνει εκτενής έρευνα για τη σωστή επιλογή των ορίων, υπό οποιεσδήποτε συνθήκες (π.χ. θερμοκρασία, υγρασία, διαφοροποιήσεις δέρματος κ.α.).

Αντί να γίνει προσπάθεια πρόβλεψης κάθε κατάστασης υπό την οποία μπορεί να τεθεί το σύστημα, είναι καλύτερο να χρησιμοποιηθεί μία γενική λύση, εφαρμόσιμη σε κάθε ηλεκτρόδιο. Αυτή είναι να επιλέξουμε τιμές ρεύματος και χρόνου φόρτισης των ηλεκτροδίων ελέγχου, τέτοιες ώστε η μετρούμενη τιμή τάσης 10 bit να είναι μεγαλύτερη από εκείνη του ηλεκτροδίου αναφοράς. Έτσι, θα υπάρχει ένα εύρος τιμών για το οποίο δε θα υπάρχει κίνδυνος εσφαλμένης ανίχνευσης επαφής. Παράλληλα, θα γίνει επιλογή ενός κοινού ορίου επαφής τέτοιου ώστε να είναι ικανά εντός της διαφοράς της τιμής βάσης (όπως δίδεται από το ηλεκτρόδιο αναφοράς) και της τιμής ενός (οποιοσδήποτε) ηλεκτροδίου ελέγχου σε επαφή. Το όριο απελευθέρωσης μπορεί να τεθεί σε κάποια μικρή τιμή, αφού θεωρούμε ότι ένα ελεύθερο ηλεκτρόδιο θα έχει τιμή μεγαλύτερη της τιμής βάσης. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγουμε και την περίπτωση μερικής ή σχετικής επαφής.

Ύστερα από μετρήσεις που έγιναν και συμβουλευόμενοι τους πίνακες του παραρτήματος Γ για τη διαφορά των τιμών ελεύθερων ηλεκτροδίων και σε επαφή, έγιναν οι εξής επιλογές για τις παραμέτρους που συζητήθηκαν. Οι τιμές ρεύματος και χρόνου φόρτισης επιλέχθηκαν έτσι ώστε η τιμή εξόδου του ηλεκτροδίου αναφοράς να παραμείνει σε περίπου 600, ενώ των ηλεκτροδίων ελέγχου να είναι περίπου 700. Τα νούμερα αυτά επιλέχθηκαν ώστε και το ηλεκτρόδιο αναφοράς αλλά και τα ηλεκτρόδια ελέγχου να έχουν αρκετό εύρος προς τις ακραίες τιμές 0 και 1023. Τα όρια επαφής τέθηκαν σε 20 από την τιμή βάσης, και τα όρια απελευθέρωσης σε 5.

Γράφτηκε πρόγραμμα για τον έλεγχο της σωστής ανίχνευσης της κατάστασης των ηλεκτροδίων με χρήση αυτών των τιμών. Τα αποτελέσματα του οποίου φαίνονται στην επόμενη εικόνα.



```
COM3 (Arduino/Genuino Uno)
|
| Send
|
| Αρχικοποίηση του MPRI21... Έτοιμο.
|
| Τιμή Ηλεκτροδίου αναφοράς: 600
| Ηλεκτρόδιο 1 σε επαφή. Τιμή εξόδου: 105
| Ηλεκτρόδιο 1 ελεύθερο. Τιμή εξόδου: 691
| Ηλεκτρόδιο 2 σε επαφή. Τιμή εξόδου: 173
| Ηλεκτρόδιο 2 ελεύθερο. Τιμή εξόδου: 695
| Ηλεκτρόδιο 3 σε επαφή. Τιμή εξόδου: 139
| Ηλεκτρόδιο 3 ελεύθερο. Τιμή εξόδου: 693
| Ηλεκτρόδιο 4 σε επαφή. Τιμή εξόδου: 142
| Ηλεκτρόδιο 4 ελεύθερο. Τιμή εξόδου: 702
| Ηλεκτρόδιο 5 σε επαφή. Τιμή εξόδου: 184
| Ηλεκτρόδιο 5 ελεύθερο. Τιμή εξόδου: 695
| Ηλεκτρόδιο 6 σε επαφή. Τιμή εξόδου: 169
| Ηλεκτρόδιο 6 ελεύθερο. Τιμή εξόδου: 706
| Ηλεκτρόδιο 7 σε επαφή. Τιμή εξόδου: 132
| Ηλεκτρόδιο 7 ελεύθερο. Τιμή εξόδου: 703
| Ηλεκτρόδιο 8 σε επαφή. Τιμή εξόδου: 157
| Ηλεκτρόδιο 8 ελεύθερο. Τιμή εξόδου: 699
| Ηλεκτρόδιο 9 σε επαφή. Τιμή εξόδου: 168
| Ηλεκτρόδιο 9 ελεύθερο. Τιμή εξόδου: 705
| Ηλεκτρόδιο 10 σε επαφή. Τιμή εξόδου: 123
| Ηλεκτρόδιο 10 ελεύθερο. Τιμή εξόδου: 692
|
|  Autoscroll
| No line ending 9600 baud
```

Εικόνα 4.12 – Αποτελέσματα ελέγχου με προεπιλεγμένες τιμές I και T

4.10 – Ο αλγόριθμος ελέγχου

Ο στόχος του συστήματος είναι, όπως έχει συζητηθεί, να ελέγχει εάν η μάσκα είναι επαρκώς τοποθετημένη στο πρόσωπο ή αν έχει αφαιρεθεί, και αντίστοιχα να επιτρέπει ή να διακόπτει τη ροή του οξυγόνου από τη συσκευή παροχής προς τη μάσκα.

Ως εδώ, αναλύθηκε η λειτουργία του αισθητήρα αφής MPR121 και έγινε η επιλογή των κατάλληλων ρυθμίσεων ώστε να γίνεται σωστά η ανίχνευση της επαφής στα ηλεκτρόδια της μάσκας. Όμως πέρα από την ανίχνευση και την αποστολή των ανάλογων δεδομένων, ο αισθητήρας δεν είναι ικανός να τα αναλύσει και βάσει των αποτελεσμάτων να ελέγξει την εικονική ηλεκτρονική βαλβίδα οξυγόνου όπου και θεωρείται ότι συνδέεται το σύστημα.

Τα τελευταία τα αναλαμβάνει κάποιος μικροελεγκτής σε επικοινωνία με τον αισθητήρα. Το εύρος των μικροελεγκτών που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν είναι πολύ μεγάλο. Υπάρχουν μικροελεγκτές πολλών εταιριών, αρχιτεκτονικών υλοποίησης, συνόλου εντολών και δυνατοτήτων που θα μπορούσαν να καλύψουν τις ανάγκες του συστήματός που αναλύεται. Επίσης, ο προγραμματισμός αυτών μπορεί να πραγματοποιηθεί σε αρκετές γλώσσες προγραμματισμού αρκεί να συνοδεύονται από κατάλληλο μεταγλωττιστή και τα όποια απαραίτητα εργαλεία.

Σε αυτή τη παράγραφο, θα δοθεί ο αλγόριθμος ελέγχου μέσω του οποίου θα λειτουργεί το παρόν σύστημα, χωρίς όμως να θεωρήσουμε κάποιο συγκεκριμένο μικροελεγκτή, δίνοντάς τον σε ψευδοκώδικα.

Γενική διάρθρωση του προγράμματος

Το πρόγραμμα του μικροελεγκτή, αρχικά θα αναλαμβάνει την εκκίνηση του πρωτοκόλλου επικοινωνίας για την μεταφορά δεδομένων από και προς τον αισθητήρα, ύστερα θα αρχικοποιεί τον αισθητήρα σύμφωνα με αυτά που έχουν παρουσιαστεί στις προηγούμενες παραγράφους, και μετά θα εκτελεί τον αλγόριθμο ελέγχου.

Περιγραφή του αλγορίθμου

Όπως περιγράφεται στην παράγραφο 4.6, τα ηλεκτρόδια της μάσκας έχουν διαμοιραστεί σε τέσσερις ομάδες, άνω-δεξιά, άνω-αριστερή, κάτω-δεξιά και κάτω-αριστερή. Η απόφαση για την κατάσταση της μάσκας θα βασίζεται στη κατάσταση της κάθε μίας ομάδας ξεχωριστά. Για να θεωρείται η μάσκα σωστά τοποθετημένη πρέπει ένα ηλεκτρόδιο από κάθε ομάδα να βρίσκεται σε επαφή.

Η λειτουργία του αλγορίθμου αποφασίστηκε ύστερα από παρατήρηση της συμπεριφοράς της μάσκας σε προσπάθειες αφαίρεσής της με διάφορους τρόπους (π.χ. από οποιαδήποτε πλευρά, με κάθε χέρι, προσπαθώντας να διατηρηθεί όσο το δυνατό μεγαλύτερη επαφή ενώ υπάρχει πρόσβαση προς το στόμα κ.τ.λ.). Με την ομαδοποίηση των ηλεκτροδίων αποφεύγεται η διακοπή του οξυγόνου εάν ένα από αυτά δεν παρουσιάσει επαφή και ο αριθμός των ομάδων φροντίζει να προλαμβάνει την παροχή του οξυγόνου σε λανθασμένη εμφάνιση επαφής (π.χ. άγγιγμα ηλεκτροδίων με το χέρι).

Ψευδοκώδικας προγράμματος

Αρχική Συνάρτηση {

Ορισμός εισόδων / εξόδων

Εκκίνηση πρωτοκόλλου I²C

Αρχικοποίηση του MPR121

Λήψη τιμής εξόδου του ηλεκτροδίου αναφοράς

Ορισμός τιμής βάσης των ηλεκτροδίων ελέγχου

}

Κύρια Συνάρτηση {

Λήψη νέας τιμής εξόδου του ηλεκτροδίου αναφοράς

Εάν (Υπάρχει αρκετή διαφορά, θετική ή αρνητική, μεταξύ παλιάς και νέας τιμής)

Τότε { Ανανέωση των τιμών βάσης των ηλεκτροδίων ελέγχου }

Λήψη δεδομένων κατάστασης ηλεκτροδίων

Εάν (Κάποια ομάδα δεν έχει κανένα ηλεκτρόδιο σε επαφή)

Τότε { Απενεργοποίηση της βαλβίδας οξυγόνου }

Αλλιώς Εάν (Κάθε ομάδα έχει τουλάχιστον ένα ηλεκτρόδιο σε επαφή)

Τότε { Ενεργοποίηση της βαλβίδας οξυγόνου }

}

4.11 – Επιλογή μικροελεγκτή

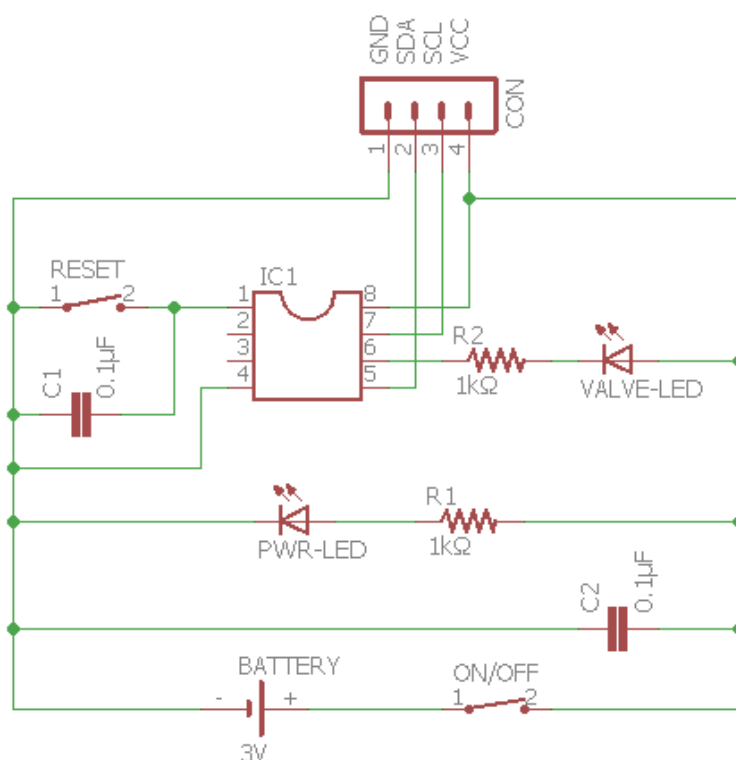
Το μόνο που απομένει για την ολοκλήρωση του συστήματος είναι η επιλογή ενός μικροελεγκτή και η ανάπτυξη του προγράμματός του. Καθ' όλη τη μελέτη και ανάπτυξη της εργασίας χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα Arduino. Όμως, οι δυνατότητες του μικροελεγκτή AVR ATmega328P που βρίσκεται στο Arduino Uno, είναι πολύ περισσότερες από αυτές που απαιτούνται. Επίσης, όπως αναλύεται στην παράγραφο 4.4, η διαφορά των τάσεων τροφοδοσίας του MPR121 και του Arduino, εμφανίζει δυσκολίες που απαιτούν τη χρήση επιπλέον υλικού για διευθέτησή τους.

Έτσι, επιλέχθηκε για την τελική κατασκευή ο μικροελεγκτής AVR ATtiny85. Οι λόγοι αναλύονται στην παρουσίαση και περιγραφή των χαρακτηριστικών του στο παράρτημα Α.

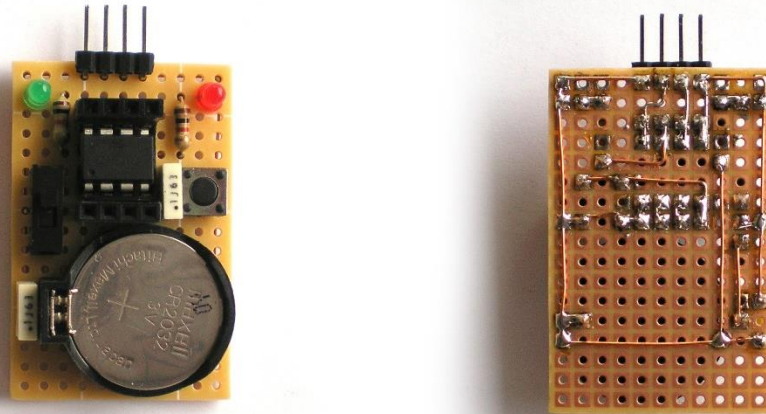
Ο ATtiny85 μπορεί να χρησιμοποιεί για το χρονισμό του εξωτερικό ρολόι έως και 20MHz. Όμως σε τέτοια συχνότητα απαιτεί τάση τροφοδοσίας μεταξύ 4.5V και 5.5V. Για να

χρησιμοποιήσουμε τάση μικρότερη των 3.6V πρέπει το ρολόι του ATtiny85 να είναι συχνότητας μικρότερης των 10MHz. Σε αυτές τις τιμές υπάρχουν δυνατές δύο επιλογές. Η πρώτη είναι και πάλι η χρήση εξωτερικού κυκλώματος ρολογιού χαμηλότερης συχνότητας. Η δεύτερη είναι να χρησιμοποιηθεί ο ενσωματωμένος ταλαντωτής RC που διαθέτει ο μικροελεγκτής και μπορεί να ρυθμιστεί να λειτουργεί στο 1MHz ή στα 8MHz. Το μόνο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου χρονισμού είναι η μικρότερη ακρίβεια που παρουσιάζει. Όμως, σε αυτήν την εφαρμογή δεν απαιτείται ακρίβεια χρονισμού, αλλά γρήγορη ανάγνωση και επεξεργασία των δεδομένων, έτσι επιλέχθηκε ο εσωτερικός ταλαντωτής στα 8MHz με τον οποίο καλύπτονται οι απαιτήσεις χρονισμού και τάσης τροφοδοσίας, ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται απλούστερο και μικρότερο κύκλωμα.

Το τελικό κύκλωμα του μικροελεγκτή ATtiny85 σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε όπως παρουσιάζεται στις επόμενες εικόνες.



Εικόνα 4.13 – Το ηλεκτρονικό σχέδιο του κυκλώματος του μικροελεγκτή.



Εικόνα 4.14 – Το κύκλωμα του μικροελεγκτή ATtiny85

Από τις οκτώ επαφές του ATtiny85 τα pin 8 και 4 αντιστοιχούν στις συνδέσεις τροφοδοσίας VCC και GND αντίστοιχα. Τα pin 5 και 7 χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση μέσω του πρωτοκόλλου I²C του μικροελεγκτή και του MPR121, ενώ το pin 6 αποτέλεσε τη σύνδεση με την εικονική βαλβίδα παροχής οξυγόνου, όπου στο κύκλωμα προσομοιάζεται από ένα led (κόκκινο). Τέλος, στο pin 1 συνδέθηκε διακόπτης ως εξωτερικό reset.

Όπως φαίνεται, στο κύκλωμα έχει συμπεριληφθεί ένας γενικός διακόπτης λειτουργίας και ένα led κατάστασης αυτής (πράσινο). Το κύκλωμα του μικροελεγκτή αλλά και του αισθητήρα αφής τροφοδοτείται από μία μπαταρία των 3V (CR2032). Αυτό έγινε και για διευκόλυνση αλλά και για να φανούν οι μικρές απαιτήσεις ισχύος του κυκλώματος.

Αφού, προγραμματίστηκε ο μικροελεγκτής και το σύστημα ολοκληρώθηκε, έγινε έλεγχος για την εύρεση του μέγιστου χρόνου αδιάληπτης λειτουργίας μετά την τοποθέτηση καινούργιας μπαταρίας. Ο χρόνος αυτός βρέθηκε να είναι περίπου 25 ώρες.

4.12 – Ο προγραμματισμός του αισθητήρα και του μικροελεγκτή [17]

Η λειτουργία του αισθητήρα αφής MPR121 καθορίζεται όπως αναλύεται στο κεφάλαιο 3, από τις τιμές κάποιων από τους καταχωρητές του. Οι τιμές αυτές ορίζονται από το μικροελεγκτή κατά την εκκίνηση του συστήματος και μπορούν να μεταβληθούν ανά πάσα στιγμή. Η επεξεργασία των δεδομένων από τον MPR121 γίνεται με βάση τον κώδικα του μικροελεγκτή στον οποίο αναπτύσσεται και ο αλγόριθμος ελέγχου της εικονικής βαλβίδας οξυγόνου.

Γενικά στοιχεία

Ο κώδικας για το σύστημα αναπτύχθηκε στο ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης εφαρμογών (integrated development environment, IDE) του Arduino, και η μεταφορά του κώδικα στον ATtiny85, έγινε με χρήση ενός προγραμματιστή τύπου USBtinyISP. Παρουσίαση αυτών γίνεται στο παράρτημα Α, μαζί με τις λεπτομέρειες των ρυθμίσεων που απαιτήθηκαν.

Η βιβλιοθήκη ορισμού του αισθητήρα αφής MPR121

Η βιβλιοθήκη που παρουσιάζεται εδώ λειτουργεί σαν το συνδεδεμένο κρίκο μεταξύ της κλάσης του αισθητήρα και του προγράμματος ελέγχου που παρατίθενται παρακάτω. Η βιβλιοθήκη περιλαμβάνει όλες τις μεταβλητές που χρησιμοποιούνται από την κλάση την οποία και ορίζει μαζί με τις συναρτήσεις της.

```
#ifndef MPR121_H
#define MPR121_H

#if (ARDUINO >= 100)
  #include "Arduino.h"
#else
  #include "WProgram.h"
#endif

#include "TinyWireM.h"

#define MPR121_TOUCHSTATUS_L 0x00
#define MPR121_TOUCHSTATUS_H 0x01
#define MPR121_FILTDATA_0L 0x04
#define MPR121_FILTDATA_0H 0x05
#define MPR121_BASELINE_0 0x1E
#define MPR121_MHDR 0x2B
#define MPR121_NHDR 0x2C
#define MPR121_NCLR 0x2D
#define MPR121_FDLR 0x2E
#define MPR121_MHDF 0x2F
#define MPR121_NHDF 0x30
#define MPR121_NCLF 0x31
#define MPR121_FDLF 0x32
#define MPR121_NHDT 0x33
#define MPR121_NCLT 0x34
#define MPR121_FDLT 0x35
#define MPR121_TOUCHTH_0 0x41
#define MPR121_RELEASETH_0 0x42
#define MPR121_DEBOUNCE 0x5B
#define MPR121_CONFIG1 0x5C
#define MPR121_CONFIG2 0x5D
#define MPR121_ECR 0x5E
#define MPR121_CHARGECURR_0 0x5F
#define MPR121_CHARGETIME_10 0x6C
#define MPR121_GPIODIR 0x76
#define MPR121_GPIOEN 0x77
#define MPR121_GPIOSET 0x78
#define MPR121_GPIOCLR 0x79
#define MPR121_GPIOTOGGLE 0x7A
#define MPR121_AUTOCONFIG0 0x7B
#define MPR121_AUTOCONFIG1 0x7C
#define MPR121_UPLIMIT 0x7D
#define MPR121_LOWLIMIT 0x7E
#define MPR121_TARGETLIMIT 0x7F
#define MPR121_SOFTRESET 0x80

class MPR121 {
public:
  MPR121(void);
```

```

        boolean begin(uint8_t i2caddr, uint16_t ecrv, uint8_t con1,
                    uint8_t con2, boolean ct);

        void setThresholds(uint8_t touch, uint8_t release);
        void setConfigRegs(uint8_t con1, uint8_t con2, uint8_t ecrv);
        void setCurrentTime();
        void setBaseline(uint16_t v);

        uint16_t touched(void);
        uint16_t filteredData(uint8_t t);
        uint16_t baselineData(uint8_t t);

        uint8_t readRegister8(uint8_t reg);
        uint16_t readRegister16(uint8_t reg);
        void writeRegister(uint8_t reg, uint8_t value);

    private:
        int8_t _i2caddr;
};

#endif

```

Η κλάση του αισθητήρα αφής MPR121

Η χρήση του MPR121 γίνεται μέσω μίας κατάλληλης κλάσης η οποία ορίζει το αντικείμενο της συσκευής καθώς και τις απαραίτητες συναρτήσεις για τη λειτουργία της. Η κλάση αυτή όπως περιγράφεται στη συνέχεια είναι βασισμένη στην αντίστοιχη κλάση, γραμμένη από την Limor Fried, που συνοδεύει το shield του Arduino που παρουσιάστηκε στην αρχή του κεφαλαίου.

Στον κώδικα φαίνεται η χρήση της κλάσης TinyWireM, που αναλαμβάνει την επικοινωνία του μικροελεγκτή και του αισθητήρα μέσω του πρωτοκόλλου I²C. Η κλάση αυτή έχει γραφεί από τον BroHogan όπως αναγράφεται στην επικεφαλίδα του αρχείου.

```

#include "MPR121.h"
        /* Η αντίστοιχη βιβλιοθήκη που συνοδεύει την κλάση. */

MPR121::MPR121() {}
        /* Συνάρτηση κατασκευής του αντικειμένου. */

boolean MPR121::begin(uint8_t i2caddr, uint16_t ecrv, uint8_t con1, uint8_t con2,
                    boolean ct) {
        /* Συνάρτηση εκκίνησης του αισθητήρα αφής MPR121. Θέτει τις τιμές των
        καταχωρητών για τον επιθυμητό τρόπο λειτουργίας. */

        TinyWireM.begin();
        /* Εκκίνηση των συναρτήσεων για επικοινωνία μέσω του πρωτοκόλλου I2C. */

        _i2caddr = i2caddr;

        writeRegister(MPR121_SOFTRESET, 0x63);

```

```

        /* Πραγματοποίηση ενός soft reset προληπτικά ώστε όλες οι τιμές των
        καταχωρητών να είναι οι προεπιλεγμένες. */
delay(1);

writeRegister(MPR121_ECR, 0x0);
    /* Θέτουμε τον MPR121 σε κατάσταση παύσης όπου δε γίνονται μετρήσεις
    ώστε να μπορούν να μεταβληθούν οι τιμές των καταχωρητών. */

uint8_t c = readRegister8(MPR121_CONFIG2);
    /* Ανάγνωση του περιεχομένου του καταχωρητή AFE Configuration 2. */

if (c != 0x24)
    return false;
    /* Εάν δεν αναγνωσθεί η προεπιλεγμένη τιμή, επιστροφή false, δηλ. υπήρξε
    πρόβλημα με την εκκίνηση του MPR121. */

writeRegister(MPR121_MHDR, 0x01);
writeRegister(MPR121_NHDR, 0x01);
writeRegister(MPR121_NCLR, 0x0E);
writeRegister(MPR121_FDLR, 0x00);
writeRegister(MPR121_MHDF, 0x01);
writeRegister(MPR121_NHDF, 0x05);
writeRegister(MPR121_NCLF, 0x01);
writeRegister(MPR121_FDLE, 0x00);
writeRegister(MPR121_NHDT, 0x00);
writeRegister(MPR121_NCLT, 0x00);
writeRegister(MPR121_FDLE, 0x00);
    /* Οι τιμές των καταχωρητών λειτουργίας του φίλτρου 3ου επιπέδου. */
setThresholds(20, 5);
    /* Ορισμός ορίων για την ανίχνευση επαφής και απελευθέρωσης. */
writeRegister(MPR121_DEBOUNCE, 0);
    /* Ο αισθητήρας δε λαμβάνει υπόψιν του αναπηδήσεις. */

if(ct == true)
    setCurrentTime();
    /* Εάν η μεταβλητή ct είναι true τότε τίθενται διαφορετικές τιμές ρεύματος και
    χρόνου φόρτισης για κάθε ηλεκτρόδιο. Οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν στην
    παράγραφο 4.9. */

setConfigRegs(con1, con2, ecrv);
    /* Ορισμός τιμών των καταχωρητών AFE Configuration 1 & 2. */

return true;
    /* Επιστροφή true εάν η αρχικοποίηση του MPR121 είναι επιτυχής. */
}

void MPR121::setThresholds(uint8_t touch, uint8_t release) {
    /* Συνάρτηση ορισμού των ορίων για την ανίχνευση επαφής και
    απελευθέρωσης. Η συνάρτηση χρησιμοποιεί τις ίδιες τιμές για όλα τα
    ηλεκτρόδια, τακτική που καλύπτει τις ανάγκες της εφαρμογής που εξετάζεται.
    */
    for (uint8_t i=0; i<12; i++) {
        writeRegister(MPR121_TOUCHTH_0 + 2*i, touch);
        writeRegister(MPR121_RELEASETH_0 + 2*i, release);
    }
}

void MPR121::setConfigRegs(uint8_t con1, uint8_t con2, uint8_t ecrv) {

```

```

        /* Συνάρτηση ορισμού τιμών των καταχωρητών AFE Configuration 1 & 2. */
writeRegister(MPR121_ECR, 0x0);
writeRegister(MPR121_CONFIG1, con1);
writeRegister(MPR121_CONFIG2, con2);
writeRegister(MPR121_ECR, ecvr);
        /*Ορισμός τιμής του καταχωρητή Electrode Configuration. Στη συγκεκριμένη
εφαρμογή τίθεται σε 0x4F, απενεργοποιώντας την ανίχνευση τιμών βάσης ως
έξοδος του φίλτρου 3ου επιπέδου. Οι λόγοι αναλύονται την παράγραφο Χ.2.
Επίσης, ενεργοποιείται η μέτρηση χωρητικότητας στα δώδεκα ηλεκτρόδια. */
    }

void MPR121::setCurrentTime(void) {
    /* Συνάρτηση ορισμού τιμών ρεύματος και χρόνου φόρτισης για κάθε
ηλεκτρόδιο ξεχωριστά. Οι τιμές αφορούν τις ανάγκες της συγκεκριμένης
εφαρμογής. */
writeRegister(0x5F, 35);
writeRegister(0x60, 36);
writeRegister(0x61, 35);
writeRegister(0x62, 37);
writeRegister(0x63, 36);
writeRegister(0x64, 27);
writeRegister(0x65, 36);
writeRegister(0x67, 36);
writeRegister(0x68, 35);
writeRegister(0x69, 36);
writeRegister(0x6A, 37);
        /* Καταχωρητές ορισμού ρεύματος φόρτισης των ηλεκτροδίων. */

writeRegister(0x6C, 17);
writeRegister(0x6D, 17);
writeRegister(0x6E, 17);
writeRegister(0x6F, 17);
writeRegister(0x70, 17);
writeRegister(0x71, 17);
        /* Καταχωρητές ορισμού χρόνου φόρτισης των ηλεκτροδίων. Εδώ, επειδή
χρησιμοποιούνται οι ίδιες τιμές για κάθε ηλεκτρόδιο, ο προγραμματισμός των
καταχωρητών αυτών θα μπορούσε να παραληφθεί και να χρησιμοποιηθεί η
καθολική τιμή του καταχωρητή 0x5D. Αυτό δεν έγινε για διευκόλυνση σε
περίπτωση επιλογής άλλης ρύθμισης. */
    }

void MPR121::setBaseline(uint16_t v) {
    /* Συνάρτηση ορισμού της τιμής βάσης των ενεργών ηλεκτροδίων στη
μετρούμενη τιμή του ηλεκτροδίου αναφοράς ώστε να γίνεται η ανίχνευση
επαφής και απελευθέρωσης σύμφωνα με αυτή. */
    v = v >> 2;
writeRegister(MPR121_ECR, 0x0);
for (uint8_t i=1; i<12; i++) {
    writeRegister(MPR121_BASELINE_0 + i, v);
}
writeRegister(MPR121_ECR, 0x4F);
}

uint16_t MPR121::touched(void) {
    /* Συνάρτηση ανάγνωσης της κατάστασης των ηλεκτροδίων. Η συνάρτηση
επιστρέφει το περιεχόμενο των καταχωρητών στις διευθύνσεις 0x00 και 0x01,
διατηρώντας τα bit ενδιαφέροντος. */

```

```

uint16_t t = readRegister16(MPR121_TOUCHSTATUS_L);
return t & 0x0FFF;
}

uint16_t MPR121::filteredData(uint8_t t) {
    /* Συνάρτηση που επιστρέφει την τιμή που αντιστοιχεί στο ηλεκτρόδιο t. */
    if (t > 12) return 0;
    return readRegister16(MPR121_FILTDATA_0L + t*2);
}

uint16_t MPR121::baselineData(uint8_t t) {
    /* Συνάρτηση που επιστρέφει την τιμή βάσης που αντιστοιχεί στο ηλεκτρόδιο
    t. */
    if (t > 12) return 0;
    uint16_t bl = readRegister8(MPR121_BASELINE_0 + t);
    return (bl << 2);
}

uint8_t MPR121::readRegister8(uint8_t reg) {
    /* Συνάρτηση ανάγνωσης ενός byte, η τιμή του οποίου περιέχεται στον
    καταχωρητή reg. */
    TinyWireM.beginTransaction(_i2caddr);
    TinyWireM.write(reg);
    TinyWireM.endTransmission(false);
    TinyWireM.requestFrom(_i2caddr, 1);
    return (TinyWireM.read());
}

uint16_t MPR121::readRegister16(uint8_t reg) {
    /* Συνάρτηση ανάγνωσης δύο byte, οι τιμές των οποίων περιέχονται στον
    καταχωρητή reg και στον αμέσως επόμενο βάσει διευθυνσιοδότησης. */
    TinyWireM.beginTransaction(_i2caddr);
    TinyWireM.write(reg);
    TinyWireM.endTransmission(false);
    TinyWireM.requestFrom(_i2caddr, 2);
    uint16_t v = TinyWireM.read();
    v |= ((uint16_t) TinyWireM.read()) << 8;
    return v;
}

void MPR121::writeRegister(uint8_t reg, uint8_t value) {
    /* Συνάρτηση αποστολής ενός byte προς τη συσκευή slave. */
    TinyWireM.beginTransaction(_i2caddr);
    TinyWireM.write((uint8_t)reg);
    TinyWireM.write((uint8_t)(value));
    TinyWireM.endTransmission();
}

```

Ο κώδικας ελέγχου του μικροελεγκτή

Το πρόγραμμα που παρουσιάζεται παρακάτω, αναλαμβάνει την επικοινωνία με τον αισθητήρα αφής και τη συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων από αυτό, μέσω των οποίων αποφασίζει για την κατάσταση στην οποία πρέπει να τεθεί η παροχή οξυγόνου, δηλαδή, εάν θα πρέπει η βαλβίδα του οξυγόνου να είναι ανοιχτή ή κλειστή. Η τελευταία ελέγχεται από μία από τις ψηφιακές επαφές εισόδου/εξόδου (I/O pins) του μικροελεγκτή, με αντιστοίχιση HIGH για ανοιχτή και LOW για κλειστή.

Ο αλγόριθμος ελέγχου που υλοποιείται στο παρακάτω πρόγραμμα, παρουσιάζεται σε μορφή ψευδοκώδικα, στην παράγραφο 4.10.

```
#include "TinyWireM.h"
#include "MPR121.h"
    /* Εισαγωγή βιβλιοθηκών. */

#define OUTPUT_PIN 1
    /* Ορισμός της εξόδου ελέγχου της βαλβίδας. */
#define REFELE 5
    /* Ορισμός του ηλεκτροδίου αναφοράς. */

MPR121 sensor = MPR121 ();
    /* Δημιουργία ενός αντικειμένου που αντιστοιχεί στον αισθητήρα MPR121. */

uint16_t blvPre, blvNow;
    /* Μεταβλητές ελέγχου για τη τιμή βάσης των ηλεκτροδίων. */
boolean wasTouched = false;
    /* Μεταβλητή ορισμού της προηγούμενης κατάστασης της μάσκας. Ορίζεται
    οικονομία στον αριθμό εντολών που εκτελεί ο μικροελεγκτής. Εάν η μάσκα
    είναι και ήταν ή δεν είναι και δεν ήταν τοποθετημένη δεν εκτελείται καμία
    ενέργεια. */

void setup() {
    /* Αρχική Συνάρτηση. Πραγματοποιούνται αρχικές ρυθμίσεις και ορισμοί. */
    pinMode(OUTPUT_PIN, OUTPUT);
    /* Ορισμός της επαφής όπου συνδέεται η βαλβίδα οξυγόνου ως έξοδος. */
    digitalWrite(OUTPUT_PIN, LOW);
    /* Ορισμός της αρχικής κατάστασης της βαλβίδας ως απενεργοποιημένη. */

    while(!sensor.begin(0x5A, 0x4F, 0x10, 0x20, true));
    /* Εκκίνηση του αισθητήρα MPR121. Το πρόγραμμα δεν συνεχίζει εάν δε
    διαπιστωθεί η ολοκλήρωση της διαδικασίας. */

    blvPre = sensor.filteredData(REFELE);
    sensor.setBaseline(blvPre);
    /* Αρχικός ορισμός της τιμής βάση των ηλεκτροδίων ελέγχου με βάση τη
    μετρούμενη τιμή στο ηλεκτρόδιο αναφοράς. */
}

void loop() {
    /* Κύρια Συνάρτηση. Η συνάρτηση αυτή μετά την ολοκλήρωσή της
    επαναλαμβάνεται καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του μικροελεγκτή. */
    blvNow = sensor.filteredData(REFELE);
    if(blvNow > (blvPre + 5) || blvNow < (blvPre - 5)) {
```

```

    sensor.setBaseline(blwNow);
    blwPre = blwNow;
}

/* Σύγκριση της προηγούμενης τιμής του ηλεκτροδίου αναφοράς με αυτή που
μόλις λήφθηκε. Εάν υπάρχει αρκετή διαφορά, θετική ή αρνητική, τότε η τιμή
βάσης των ηλεκτροδίων ελέγχου ανανεώνεται. Με αυτόν τον τρόπο
αποφεύγονται οι περιττές εγγραφές των καταχωρητών. */

/* Έναρξη κώδικα ελέγχου. */
if(isTouched() && !wasTouched) {
    /* Εάν η μάσκα είναι σωστά τοποθετημένη στο πρόσωπο (και προηγουμένως
δεν ήταν) τότε... */
    digitalWrite(OUTPUT_PIN, HIGH);
    /* ...ενεργοποίηση της βαλβίδας οξυγόνου, και... */
    wasTouched = true;
    /* ...ενημέρωση της μεταβλητής προηγούμενης κατάστασης της μάσκας. */
}
else if(!isTouched() && wasTouched) {
    /* Εάν η μάσκα δεν είναι σωστά τοποθετημένη στο πρόσωπο (και
προηγουμένως ήταν) τότε... */
    digitalWrite(OUTPUT_PIN, LOW);
    /* ...απενεργοποίηση της βαλβίδας οξυγόνου, και... */
    wasTouched = false;
    /* ...ενημέρωση της μεταβλητής προηγούμενης κατάστασης της μάσκας. */
}

delay(10);
/* Εισαγωγή μικρής καθυστέρησης για την ομαλότερη λειτουργία του
συστήματος μεταξύ των επαναλήψεων της κύριας συνάρτησης. */
}

boolean isTouched() {
    /* Συνάρτηση ελέγχου της κατάστασης των ομάδων των ηλεκτροδίων. */
    uint16_t touchedEle = sensor.touched();
    /* Λήψη κατάστασης των ηλεκτροδίων. */

    if((touchedEle & 0x7) && (touchedEle & 0x18)
        && (touchedEle & 0x140) && (touchedEle & 0xE00))
        /* Απομόνωση των bit κατάστασης που αντιστοιχούν σε κάθε ομάδα
ξεχωριστά. Εάν όλες οι ομάδες έχουν τουλάχιστον ένα ηλεκτρόδιο σε επαφή, η
συνάρτηση επιστρέφει true, υποδηλώνοντας ότι διαπιστώθηκε η σωστή
τοποθέτηση της μάσκας. Σε αντίθετη περίπτωση επιστρέφει false */
        return true;
    else
        return false;
}

```

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα και βελτιώσεις

Σε αυτό το κεφάλαιο συζητείται η τελική υλοποίηση του συστήματος ελέγχου της παροχής οξυγόνου, όπως ολοκληρώθηκε με το πέρας του προηγούμενου κεφαλαίου. Η κατασκευή αν και λειτουργική επιδέχεται πολλές βελτιώσεις που δεν ήταν εφικτό να πραγματοποιηθούν στο πειραματικό επίπεδο όπου κινείται αυτή η διπλωματική εργασία.

5.1 – Συμπεράσματα

Βάσει αυτών που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, φαίνεται ότι η ανάπτυξη ενός συστήματος το οποίο θα ελέγχει την παροχή οξυγόνου ανιχνεύοντας, μέσω αισθητήρων αφής, τα σημεία επαφής μίας αναλώσιμης μάσκας οξυγόνου στο πρόσωπο ενός ασθενή (τοποθετημένη ή μη), για την αποφυγή κυρίως εγκουμάτων από την ανάφλεξη του οξυγόνου, είναι δυνατή.

Το σύστημα του οποίου η υλοποίηση παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4, μπόρεσε να ανιχνεύσει ικανοποιητικά την επαφή ή μη με το δέρμα του ασθενούς, της μάσκας προσώπου και βάσει αυτής να επιτρέπει ή όχι τη ροή του οξυγόνου προς αυτήν.

Έγιναν προσπάθειες να καλυφθεί η (παράλογη) περίπτωση ηθελημένης ανάφλεξης του οξυγόνου μέσω μερικής απομάκρυνσης της μάσκας, τοποθετώντας πολλαπλά σημεία ελέγχου στην περιφέρειά της, ενώ παράλληλα να αποφεύγονται λάθη στην εκτίμηση της επαφής της μάσκας.

Επίσης, το συνολικό κόστος της τελικής κατασκευής, λαμβάνοντας υπόψιν τις τιμές λιανικής αγοράς που ήταν διαθέσιμες στο συγγραφέα, δεν ξεπερνά τα 10€. Πιο αναλυτικά τα κόστη των κυριότερων στοιχείων της κατασκευής κυμαίνονται ως εξής:

Πίνακας 5.1 – Κόστη υλικών τελικής κατασκευής

Μάσκα προσώπου	2€
Αισθητήρας αφής MPR121	1,5€
Μικροελεγκτής AVR ATtiny85	2€
Πυκνωτές	0,15€
Αντιστάσεις	~0,03€
Λοιπά ηλεκτρονικά στοιχεία (συνδέσεις, καλώδια, διακόπτες, led, διάτρητες πλακέτες, κ.τ.λ.)	~3€
Μπαταρία & βάση	1€
Σύνολο	~9,68€

Η μόνη σοβαρή αδυναμία του συστήματος, είναι η εφαρμογή της για κάθε τύπο προσώπου. Στην παρούσα υλοποίηση, τα σημεία ελέγχου που επιλέχθηκαν είναι κατάλληλα για το πρόσωπο του συγγραφέα. Από μία πρόχειρη προσπάθεια γενίκευσης των σημείων αυτών για κάθε τύπο προσώπου, φάνηκε ότι κάτι τέτοιο ίσως να είναι και αδύνατο, καθώς υπάρχουν μεγάλες διαφοροποιήσεις κυρίως μεταξύ ανδρών και γυναικών, αλλά και ανάμεσα σε άτομα διαφορετικών λαών.

Παρόλα αυτά, η χρήση της μεθόδου θα μπορούσε να είναι εφαρμόσιμη είτε ύστερα από ρύθμιση των παραμέτρων της για διαφορετικές ομάδες ατόμων, είτε με εισαγωγή περισσότερων σημείων ελέγχου και χρήση διαφορετικού αισθητήρα αφής.

5.2 – Βελτιώσεις

Το σύστημα της διπλωματικής, όπως αναπτύχθηκε κινείται προφανώς σε ερευνητικά – πειραματικά πλαίσια. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να δεχθεί βελτιώσεις πριν θεωρηθεί ότι πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο προϊόν.

Στο τελευταίο αυτό κομμάτι του κύριου μέρους της εργασίας θα συζητηθούν κάποιες από αυτές τις βελτιώσεις.

Τα ηλεκτρόδια ελέγχου

Όπως αναφέρεται στην παράγραφο 4.6, τα ηλεκτρόδια της μάσκας κατασκευάστηκαν από φύλλο χαλκού, υλικό το οποίο αν και είναι φθινό και εύχρηστο, δεν συνιστάται για επαφή με το δέρμα. Οι περισσότερες συσκευές αυτού του τύπου, όπως οι επαφές παρακολούθησης βιολογικών σημάτων ασθενών, έχουν επίστρωση αργύρου που είναι πιο φιλικό υλικό για την επιδερμίδα. Έτσι, η αλλαγή του υλικού των ηλεκτροδίων είναι η πρώτη και απαραίτητη βελτίωση που προτείνεται.

Ακόμα τα καλώδια των ηλεκτροδίων που τα συνδέουν με τον αισθητήρα και τα οποία εδώ έχουν κολληθεί στο εξωτερικό της μάσκας θα μπορούσαν να ενσωματωθούν σε αυτή. Δηλαδή, στην περίπτωση βιομηχανικής παραγωγής ενός τέτοιου συστήματος, τα καλώδια αυτά θα μπορούσαν να βρίσκονται εντός του υλικού της μάσκας. Με αυτό τον τρόπο θα ήταν καλύτερα προστατευμένα και πιθανόν να μην είχαν και την ανάγκη του μονωτικού περιβλήματός τους καθώς το υλικό της μάσκας είναι διηλεκτρικό.

Τέλος αναφέρεται ότι, λαμβάνοντας τις απαραίτητες ρυθμίσεις γύρω από την ευαισθησία του ανιχνευτή αφής, οι επαφές των ηλεκτροδίων ίσως να μπορούν να ενσωματωθούν και αυτές εντός του υλικού της μάσκας διατηρώντας τη λειτουργία τους. Αυτό όμως απαιτεί ξεχωριστή μελέτη για διαφύλαξη της ορθότητας των αποτελεσμάτων.

Διατήρηση της αναλωσιμότητας της μάσκας

Η μάσκα προσώπου, αποτελούν αναλώσιμο προϊόν. Ο κύριος λόγος για αυτό είναι ότι ένας ασθενής πιθανόν να υποφέρει από κάποια σοβαρή και μεταδοτική ασθένεια, και θα ήταν παράλογο ένα αντικείμενο στο οποίο έχει εκπνεύσει και μάλιστα επανειλημμένα να δοθεί

για χρήση σε κάποιον άλλο. Επίσης, η διαδικασία αποστείρωσης απαιτεί κάποιο χρόνο και κάποιο κόστος, τα οποία θα ήταν επιθυμητό να αποφευχθούν.

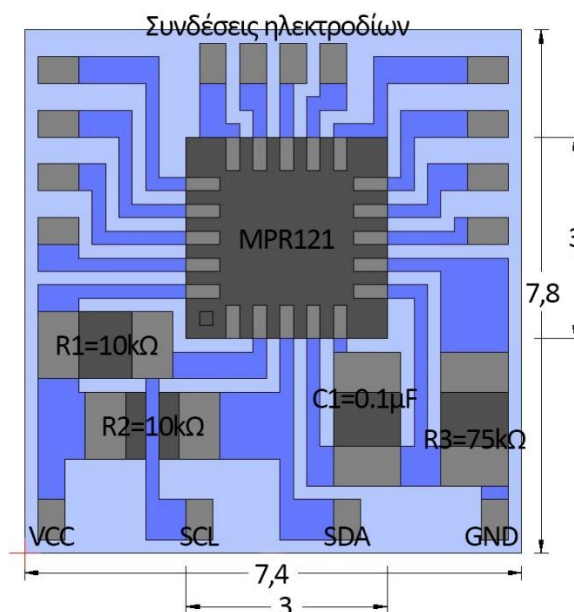
Για αυτούς τους λόγους η μάσκα οξυγόνου που θα υιοθετεί το σύστημα ελέγχου που υλοποιήθηκε εδώ, θα πρέπει να παραμείνει αναλώσιμη. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να διαθέτει όσο το δυνατόν λιγότερα στοιχεία του συνολικού κυκλώματος. Αυτό μας οδηγεί στην εξής προσέγγιση:

Η μάσκα θα έχει μόνο τα ηλεκτρόδια (ελέγχου και αναφοράς) και τα καλώδια αυτών, τα οποία θα καταλήγουν σε ένα βύσμα μέσω του οποίου θα συνδέεται το υπόλοιπο κύκλωμα. Η ιδέα αυτή συνίσταται ότι το μήκος των καλωδίων των ηλεκτροδίων συμπεριλαμβανομένης και της σύνδεσης αυτής ίσως να είναι μεγαλύτερο από ότι στη μελέτη του προηγήθηκε, πράγμα το οποίο, όπως φάνηκε στην αρχή του κεφαλαίου 4, ίσως μειώσει την ευαισθησία του συστήματος. Όμως, όπως θα φανεί στη συνέχεια αυτό θα μπορούσε να επιλυθεί λόγω του μικρού μεγέθους των ηλεκτρονικών στοιχείων.

Ο αισθητήρας αφής και το κύκλωμα επεξεργασίας

Το κύκλωμα του MPR121 που κατασκευάστηκε στην παράγραφο 4.3, καταλαμβάνει επιφάνεια περίπου 8 cm². Φυσικά το μέγεθος αυτό είναι υπερβολικά μεγάλο για μία εμπορική υλοποίηση αλλά το μικρότερο δυνατό σε πειραματικό επίπεδο. Εάν χρησιμοποιηθεί τεχνολογία επιφανειακής τοποθέτησης (Surface Mount Technology, SMD), το μέγεθος του συγκεκριμένου κυκλώματος θα μπορούσε να γίνει πολύ μικρότερο. Σε μία πρόχειρη απόπειρα σχεδίασής του βρέθηκε να μπορεί να έχει διαστάσεις 7,8 x 7,4 mm, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.1.

Με τέτοιο μέγεθος, το κύκλωμα αυτό θα μπορούσε να τοποθετηθεί μέσα στο βύσμα σύνδεσης με τη μάσκα προσώπου, σύμφωνα με όσα συζητήθηκαν προηγουμένως. Με αυτό τον τρόπο το κομμάτι ανίχνευσης του συστήματος θα μπορούσε να είναι ανεξάρτητο της μάσκας, επιτρέποντας σε αυτή να παραμείνει αναλώσιμο προϊόν.



Εικόνα 5.1 – Το κύκλωμα του MPR121 σχεδιασμένο με τεχνολογία SMD (διαστάσεις σε χιλιοστά)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο μικροελεγκτής επεξεργασίας και ελέγχου του συστήματος θα μπορούσε να είναι άλλος από τον ATtiny85 που επιλέχθηκε εδώ. Πιθανόν, να υπάρχουν καλύτερες και οικονομικότερες λύσεις οι οποίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν τελικά. Το πιο απλό παράδειγμα είναι ο μικροελεγκτής ATtiny85V. Πρόκειται φυσικά για τον ίδιο μικροελεγκτή, σε διαφορετικό πακετάρισμα μικρότερων διαστάσεων και με χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις.

Οι παραπάνω μικροελεγκτές έχουν κατασκευαστεί ως συσκευές γενικού σκοπού και είναι πολύ σπάνιο να χρησιμοποιηθεί ένα τέτοιο κύκλωμα σε κάποιο εμπορικό προϊόν. Σε αυτές τις περιπτώσεις σχεδιάζονται κυκλώματα ειδικού σκοπού στα οποία γίνεται προσπάθεια να συμπυκνωθεί όσο περισσότερο υλικό γίνεται, καταλήγοντας με ένα πλήρες σύστημα σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα (System on a Chip, SoC). Κατά τη σχεδίαση ενός τέτοιου κυκλώματος διατηρούνται μόνο τα απαραίτητα στοιχεία για την εφαρμογή που εξετάζεται.

Στην περίπτωση του συστήματος του κεφαλαίου 4, ο αισθητήρας MPR121 και ο μικροελεγκτής ATtiny85, θα συνδυάζονταν σε ένα chip, το οποίο θα πραγματοποιούσε και την ανίχνευση αφής των ηλεκτροδίων, και την επεξεργασία των δεδομένων από αυτά, αλλά και τον έλεγχο της βαλβίδας οξυγόνου. Αυτό το κύκλωμα δε θα είχε ανάγκη για κάποιο πρωτόκολλο μεταφοράς δεδομένων, ούτε για προγραμματιζόμενη μνήμη κώδικα εκτέλεσης (αφού ο αλγόριθμος θα ήταν ενσωματωμένος στο υλικό), και φυσικά όλες οι δυνατότητες και του αισθητήρα και του μικροελεγκτή που εδώ δε χρησιμοποιήθηκαν θα μπορούσαν να παραληφθούν.

Εάν όλο το κύκλωμα τοποθετούνταν σε ένα βύσμα όπως προαναφέρθηκε, η τελική κατασκευή θα αποτελούνταν από την μάσκα με τα ηλεκτρόδια, το βύσμα σύνδεσης που θα περιέχει τα ηλεκτρονικά μέρη του συστήματος και το καλώδιο που θα εκτείνεται από αυτό προς τη βαλβίδα οξυγόνου και το οποίο θα μετέφερε τις δύο γραμμές τροφοδοσίας VCC και GND και τη γραμμή ψηφιακού σήματος ελέγχου της παροχής.

Παράρτημα Α

Υλικό και λογισμικό

Στο πρώτο αυτό παράρτημα περιλαμβάνονται όλα τα κυκλώματα και οι εφαρμογές που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια ανάπτυξης του συστήματος ελέγχου παροχής οξυγόνου. Τα πιο σημαντικά περιγράφονται στις σελίδες που ακολουθούν ενώ τα υπόλοιπα αναφέρονται στην επόμενη λίστα.

- Microsoft Word 2016
Επεξεργαστής κειμένου
- Microsoft Excel 2016
Επεξεργαστής λογιστικών φύλλων
- Microsoft Power Point 2016
Εφαρμογή ανάπτυξης παρουσιάσεων
- draw.io
Διαδικτυακή εφαρμογή ανάπτυξης μπλοκ διαγραμμάτων (www.draw.io)
- GIMP 2.8.22
Εφαρμογή επεξεργασίας εικόνων
- Autodesk EAGLE 8.2.2
Εφαρμογή σχεδιασμού ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και πλακετών
- LibreCAD 2.1.3
Πρόγραμμα σχεδίασης υποβοηθούμενης από τον υπολογιστή
- Mendeley 1.17.10
Εφαρμογή διαχείρισης και διαμοιρασμού ερευνητικών δημοσιεύσεων

A.1 – Arduino Uno και Arduino IDE

Το Arduino είναι μία πλατφόρμα ηλεκτρονικής ανοιχτού κώδικα βασισμένη στην ιδέα της εύκολης χρήσης υλικού και λογισμικού. Τα κυκλώματα Arduino έχουν δυνατότητα ανάγνωσης εισόδων (π.χ. ένταση φωτός σε έναν αισθητήρα, το πάτημα ενός διακόπτη, ή και τη λήψη ενός μηνύματος κοινωνικού δικτύου) και τη μετατροπή τους σε έξοδο (π.χ. ενεργοποίηση ενός κινητήρα, άναμμα ενός led, πραγματοποίηση μίας δημοσίευσης στο internet). Το κύκλωμα γνωρίζει τι να κάνει εκτελώντας ένα πακέτο εντολών (πρόγραμμα) το οποίο αποστέλλεται στον μικροελεγκτή του κυκλώματος.

Το Arduino γεννήθηκε στο Interaction Design Institute, στην Ivrea της Ιταλίας σαν εργαλείο για γρήγορη ανάπτυξη πρωτοτύπων, απευθυνόμενο σε σπουδαστές χωρίς εμπειρία στην ηλεκτρονική και στον προγραμματισμό. Όμως, αγγίζοντας μία ευρύτερη κοινότητα, το κύκλωμα του Arduino άρχισε να αλλάζει και να προσαρμόζεται σε νέες ανάγκες και προκλήσεις, καλύπτοντας από απλά κυκλώματα των 8 bit έως προϊόντα για IoT εφαρμογές, εκτύπωση 3D, και ενσωματωμένα συστήματα. [18]

Arduino Uno

Το Arduino Uno είναι ένα κύκλωμα μικροελεγκτή βασισμένο στον ATmega328P. Διαθέτει 14 επαφές ψηφιακών εισόδων/εξόδων (από τις οποίες οι 6 μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως PWM έξοδοι), 6 αναλογικές εισόδους, και χρησιμοποιεί ρολόι κρυσταλλικού ταλαντωτή στα 16 MHz. [19]

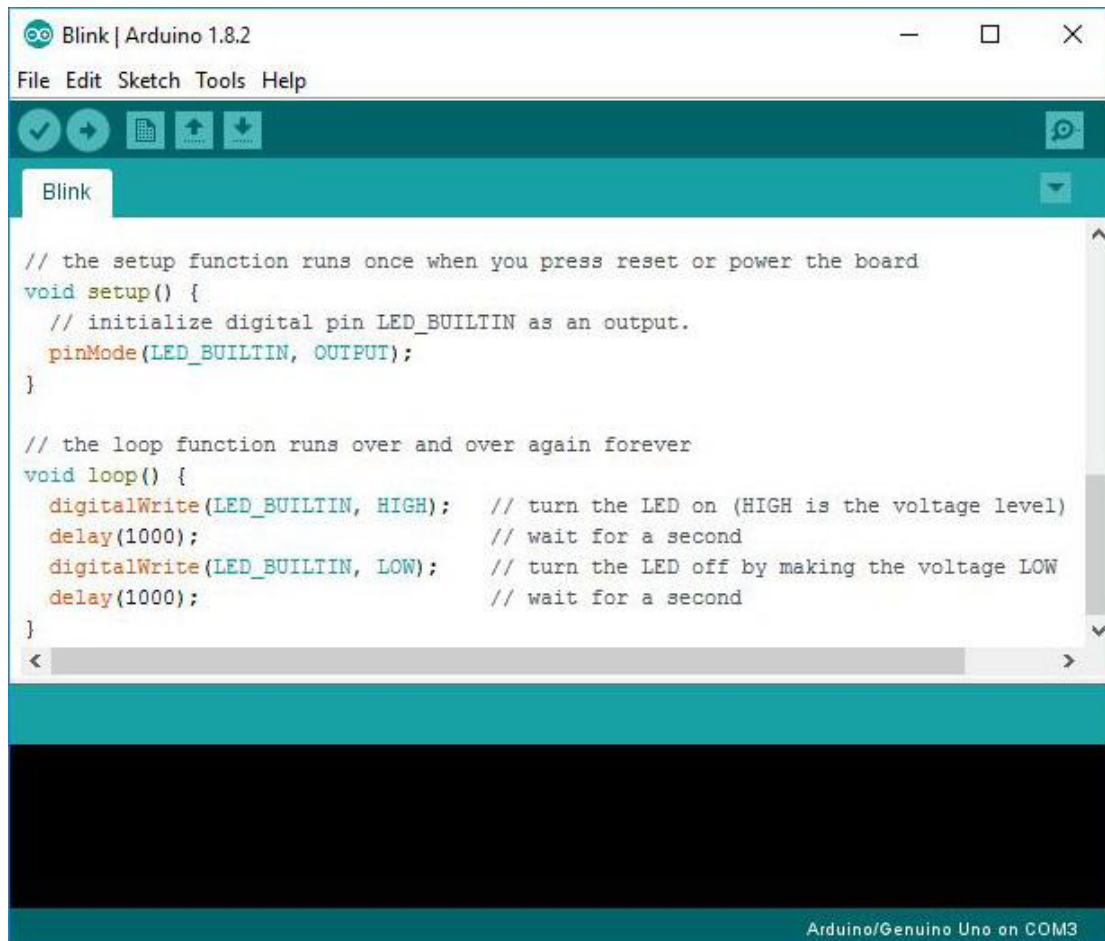
Το Arduino Uno χρησιμοποιήθηκε ευρύτατα κατά την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Οι κύριοι λόγοι της επιλογής αυτής είναι ότι πρόκειται για μία ευρέως διαδεδομένη πλατφόρμα που απολαμβάνει πολύ μεγάλη υποστήριξη και επίσημα από την εταιρία ανάπτυξής της αλλά κυρίως από την παγκόσμια κοινότητα που την χαρακτηρίζει. Ακόμα, διαθέτει δυνατότητα επικοινωνίας με ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω θύρας USB, και είναι ένα πολύ εύχρηστο και οικονομικό κύκλωμα. Τέλος, όπως παρουσιάστηκε στην αρχή του κεφαλαίου 4, ο αισθητήρας αφής MPR121 που χρησιμοποιήθηκε υπήρχε διαθέσιμος σε κύκλωμα άμεσα συμβατό με το Arduino Uno.

Arduino IDE

Η ανάπτυξη των προγραμμάτων έγινε μέσω του ολοκληρωμένου περιβάλλοντος ανάπτυξης εφαρμογών (integrated development environment, IDE) του Arduino. Το λογισμικό αυτό είναι βασισμένο στο Processing (μία άλλη πλατφόρμα ανάπτυξης προγραμμάτων), και σχεδιάστηκε ώστε να χρησιμοποιείται παράλληλα με τα κυκλώματα Arduino. Όμως, τα τελευταία χρόνια, η εφαρμογή έχει εξελιχθεί έτσι ώστε να υποστηρίζει και άλλα κυκλώματα και μικροελεγκτές πέρα από αυτούς που περιλαμβάνονται στις επίσημες πλακέτες Arduino.

Η γλώσσα με την οποία γράφονται τα προγράμματα (ή sketch, όπως αναφέρονται) στο συγκεκριμένο περιβάλλον ονομάζεται απλά γλώσσα προγραμματισμού Arduino. Είναι βασισμένη στη γλώσσα Wiring και αποτελείται από ένα σύνολο C/C++ συναρτήσεων. [20]

Η έκδοση του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε εδώ είναι η 1.8.2, η πιο πρόσφατη τη στιγμή της εγγραφής της διπλωματικής.



Εικόνα A.1 – Το Arduino IDE με φορτωμένο το παράδειγμα Blink

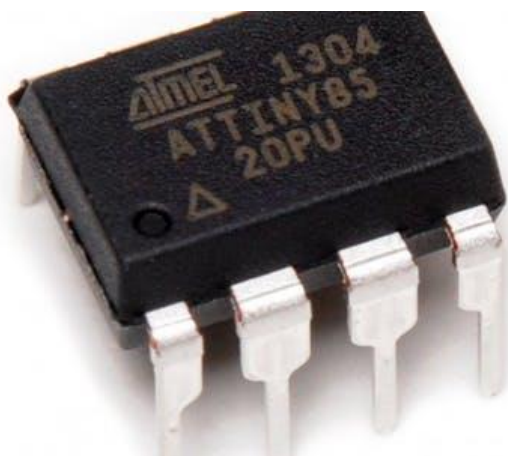
Μέσω του Arduino IDE γράφτηκε και το πρόγραμμα ελέγχου που εκτελείται από τον μικροελεγκτή ATtiny85, επειδή όμως ο μικροελεγκτής αυτός δε χρησιμοποιείται σε κάποια επίσημη πλακέτα Arduino, για να μπορέσει να προγραμματιστεί μέσω του Arduino IDE, πρέπει σε αυτό να προστεθούν κατάλληλα αρχεία/βιβλιοθήκες ώστε να γνωρίζει πώς να επικοινωνεί με τον μικροελεγκτή και πώς να γίνει σωστά η μεταγλώττιση του προγράμματος. Τα συγκεκριμένα αρχεία προέρχονται από ανεπίσημες πηγές και πρέπει πάντα να ελέγχεται η σωστή λειτουργία τους. Εδώ, οι βιβλιοθήκες που χρησιμοποιήθηκαν έχουν γραφεί από τον David A. Mellis και βρέθηκαν στην παρακάτω ιστοσελίδα που διατηρεί μία λίστα από πολλές ανεπίσημες πηγές για την υποστήριξη διάφορων μικροελεγκτών.

<https://github.com/arduino/Arduino/wiki/Unofficial-list-of-3rd-party-boards-support-urls>



Εικόνα A.2 – Αναφορά των πρόσθετων βιβλιοθηκών για υποστήριξη μικροελεγκτών ATtiny

A.2 – Ο μικροελεγκτής AVR ATtiny85 [21]



Εικόνα A.3 – AVR ATtiny85¹⁷

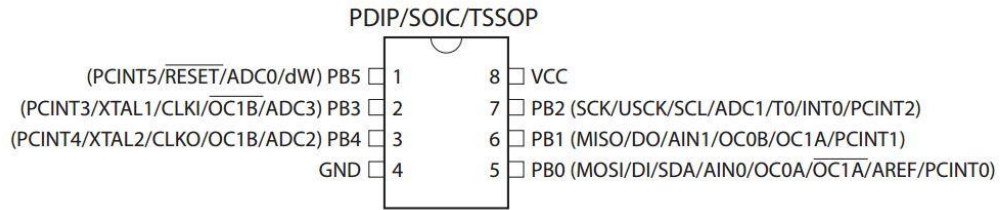
Ο μικροελεγκτής που επιλέχθηκε για τον έλεγχο του αισθητήρα αφής MPR121, την ανάλυση των δεδομένων από αυτόν και τη λειτουργία της εικονικής βαλβίδας παροχής οξυγόνου είναι ο AVR ATtiny85 της εταιρίας Microchip/Atmel. Επιλέχθηκε αρχικά επειδή καλύπτει πλήρως τις ανάγκες της εφαρμογής που εξετάζεται, αλλά και για το μικρό του μέγεθος, το χαμηλό κόστος αγοράς, το γεγονός ότι είναι ένα ευρέως διαδεδομένο κύκλωμα με αποτέλεσμα τη μεγάλη υποστήριξη του όχι μόνο από την κατασκευάστρια εταιρία αλλά και από πλήθος χρηστών. Τέλος λήφθηκε υπόψιν και η δυνατότητα προγραμματισμού του μικροελεγκτή μέσω του περιβάλλοντος της πλατφόρμας Arduino που πρόκειται για μία ιδιαίτερα εύχρηστη λύση για την ανάπτυξη εφαρμογών βασισμένων σε μικροελεγκτές AVR.

Κύρια Χαρακτηριστικά

Ο μικροελεγκτής ATtiny85 είναι βασισμένος στην αρχιτεκτονική RISC που διαθέτει μεγάλο σύνολο εντολών εκτέλεσης κυρίως σε ένα κύκλο ρολογιού. Περιέχει 8KB προγραμματιζόμενης μνήμης Flash για την αποθήκευση του κώδικα εκτέλεσης, 512B προγραμματιζόμενης EEPROM, και 512B εσωτερικής SRAM. Λειτουργεί σε εύρος τάσης 2.7V – 5.5V, και έχει δυνατότητα χρήσης εξωτερικού κυκλώματος ρολογιού μέγιστης συχνότητας 20MHz ή εσωτερικού RC ταλαντωτή στα 1MHz ή 8MHz. Διατίθεται σε διάφορες μορφές πακεταρίσματος από τις οποίες χρησιμοποιήθηκε η PDIP, καθώς είναι η πιο διαδεδομένη και εύχρηστη για περιπτώσεις πρότυπων κατασκευών. Άλλες διαθέσιμες μορφές είναι οι SOIC, QFN και MLF. Σε κάθε περίπτωση το ολοκληρωμένο έχει 8 ενεργές επαφές από τις οποίες οι δύο είναι είσοδοι τροφοδοσίας και οι υπόλοιπες έξι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε γραμμές εισόδου/εξόδου γενικού σκοπού. Τέλος μπορεί να επικοινωνεί με άλλες συσκευές μέσω του πρωτοκόλλου I²C, δυνατότητα απαραίτητη για τον έλεγχο του MPR121.

Ο μικροελεγκτής ATtiny85 έχει πολλές άλλες δυνατότητες οι οποίες όμως δεν χρησιμοποιούνται στην παρούσα εφαρμογή. Για τον πλήρη κατάλογο των χαρακτηριστικών του ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στο αντίστοιχο datasheet.

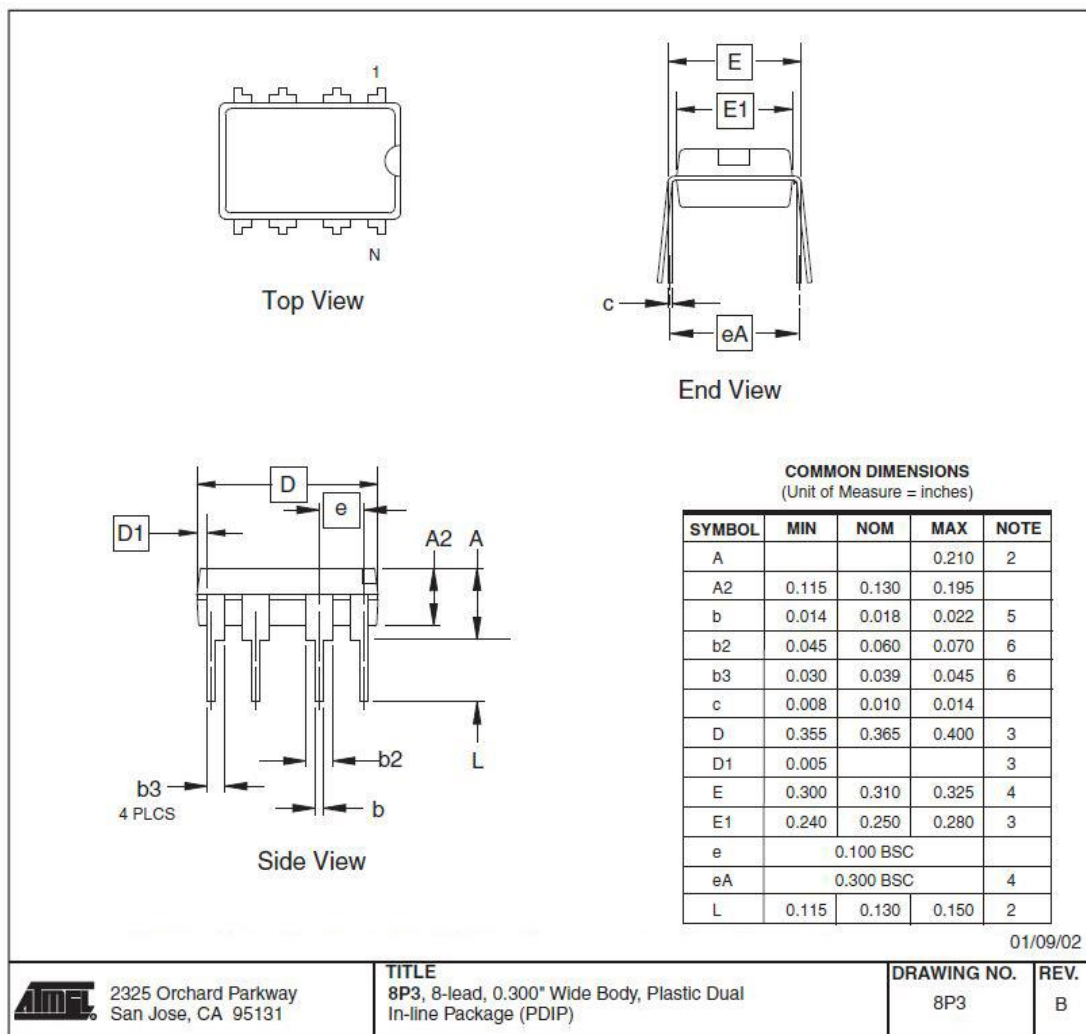
¹⁷ https://hackster.imgix.net/uploads/cover_image/file/154937/ATtiny85-500x500.jpg



Εικόνα Α.4 – Οι επαφές του μικροελεγκτή ATtiny85

Διαστάσεις Συσκευής

Οι διαστάσεις του μικροελεγκτή AVR ATtiny85 που χρησιμοποιήθηκε, όπως δίδονται από την κατασκευάστρια εταιρία παρουσιάζονται στο επόμενο σχέδιο.



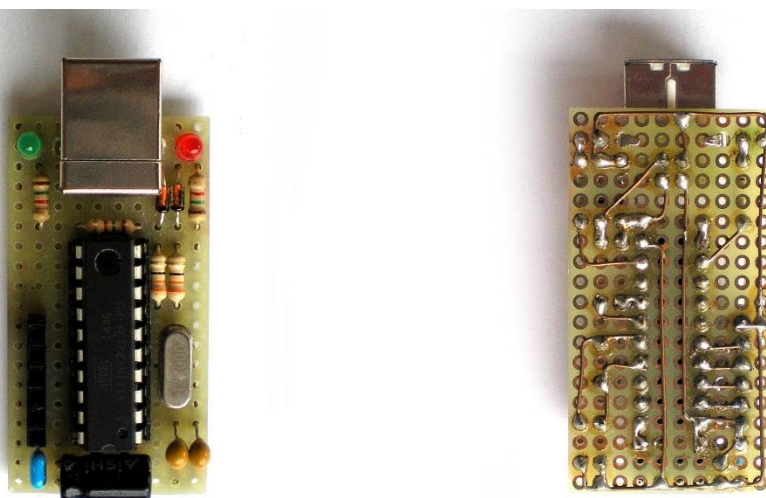
Εικόνα Α.5 – Σχέδιο διαστάσεων του ATtiny85

A.3 – Προγραμματιστής AVR, USBtinyISP [22] [23]

Το κύκλωμα και το λογισμικό του Arduino επικοινωνούν μέσω του ολοκληρωμένου ATmega16U2 το οποίο έχει τη δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων ανάμεσα στις συνδέσεις USB του υπολογιστή και τη σειριακή σύνδεση (RX/TX) του μικροελεγκτή. Επίσης, το ATmega328P περιέχει κατάλληλο πρόγραμμα (bootloader) που επιτρέπει την επικοινωνία αυτή.

Τα παραπάνω έχουν προστεθεί στα κυκλώματα Arduino ώστε να είναι πιο εύκολη η επικοινωνία με τον υπολογιστή και η μεταφορά δεδομένων μεταξύ τους. Στη γενική περίπτωση όμως των μικροελεγκτών AVR, ο προγραμματισμός γίνεται με διαφορετικές μεθόδους.

Για το μικροελεγκτή ATtiny85 ο πιο συνηθισμένος τρόπος προγραμματισμού είναι μέσω σειριακής περιφερειακής διεπαφής (Serial Peripheral Interface, SPI). Για να επιτευχθεί αυτό απαιτείται η χρήση ενός ειδικού κυκλώματος προγραμματιστή. Εδώ, χρησιμοποιήθηκε μία παραλλαγή του προγραμματιστή USBtinyISP, σχεδιασμένου από την εταιρία Adafruit, ο οποίος στις τελευταίες εκδόσεις του Arduino IDE υποστηρίζεται επίσημα και συμπεριλαμβάνεται στο λογισμικό. Ο προγραμματιστής αυτός εκμεταλλεύεται τη ικανότητα των μικροελεγκτών AVR για προγραμματισμό ενώ είναι εγκατεστημένοι σε σύστημα (in-system programming, ISP). Η δυνατότητα αυτή διευκολύνει πολύ την ανάπτυξη εφαρμογών.



Εικόνα A.5 – Ο προγραμματιστής USBtinyISP

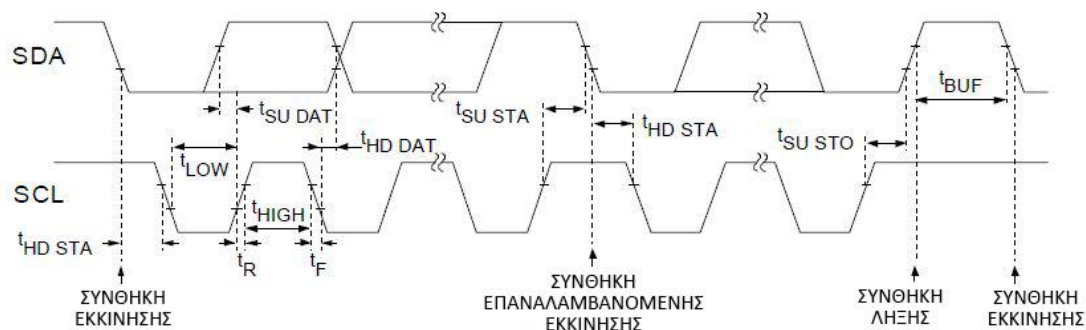
Παράρτημα Β

Το πρωτόκολλο επικοινωνίας I²C [24]

Η επικοινωνία μεταξύ του αισθητήρα αφής MPR121 και του μικροελεγκτή ATtiny45 γίνεται με χρήση του πρωτοκόλλου I²C. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή ο μικροελεγκτής τίθεται σε κατάσταση master έχοντας τον έλεγχο των γραμμών επικοινωνίας και το MPR121 σε slave ανταποκρινόμενο στα αιτήματα που δέχεται κατά τη λειτουργία της κατασκευής.

B.1 Γενικά

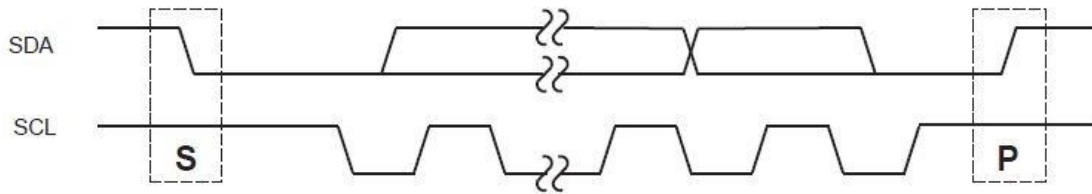
Το πρωτόκολλο I²C χρησιμοποιεί δύο καλώδια για την αμφίδρομη επικοινωνία των συνδεδεμένων συσκευών. Τη γραμμή Serial Data (SDA) και τη γραμμή Serial Clock (SCL). Μία από τις συσκευές σε κατάσταση master ξεκινά τη μεταφορά δεδομένων προς και από κάποια άλλη συσκευή (είτε master, είτε slave), και παράγει το ρολόι SCL για το συγχρονισμό της μεταφοράς των δεδομένων. Η γραμμή SDA μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως είσοδος και ως έξοδος από όλες τις συσκευές.



Εικόνα Β.1 – Χαρακτηριστικά χρονισμού σειριακής διεπαφής

B.2 Συνθήκες Εκκίνησης και Λήξης

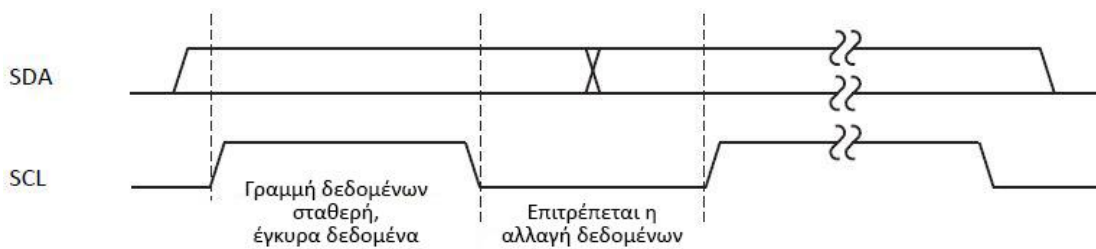
Η κάθε μετάδοση δεδομένων αποτελείται από μία συνθήκη εκκίνησης (S) που σηματοδοτείται από μία master συσκευή, ακολουθούμενη από τη διεύθυνση της συσκευής slave με ένα bit ανάγνωσης ή εγγραφής (R/\bar{W}), ένα byte διεύθυνσης καταχωρητή, ένα ή περισσότερα byte δεδομένων, και τελικά μία συνθήκη λήξης (P). Όταν το σύστημα δεν είναι απασχολημένο, και οι δύο γραμμές SDA και SCL παραμένουν σε κατάσταση HIGH, μία συσκευή master ξεκινά τη μετάδοση με μία συνθήκη εκκίνησης (S) μεταβάλλοντας το SDA από HIGH σε LOW, ενώ το SCL είναι σε HIGH. Όταν η επικοινωνία έχει τελειώσει η συσκευή master θέτει μία συνθήκη λήξης (P) μεταβάλλοντας το SDA από LOW σε HIGH, ενώ το SCL είναι σε HIGH. Τότε ο διάυλος είναι ελεύθερος για νέα μετάδοση.



Εικόνα B.2 – Συνθήκες εκκίνησης και λήξης

B.3 Μετάδοση Bit

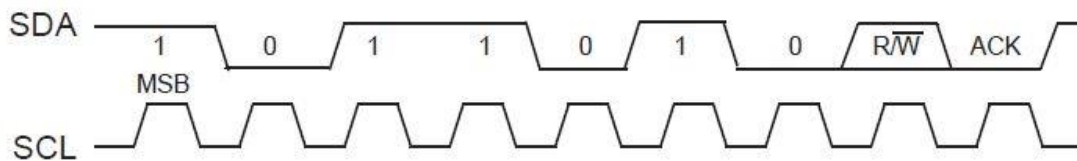
Κάθε bit δεδομένων μεταδίδεται κατά τη διάρκεια ενός παλμού του ρολογιού. Τα δεδομένα στο SDA πρέπει να παραμένουν σταθερά ενώ το SCL είναι σε HIGH.



Εικόνα B.3 – Μετάδοση bit

B.4 Η Διεύθυνση Slave και τα bit R/\bar{W}

Μία συσκευή slave ελέγχει το δίαυλο, περιμένοντας για μία συνθήκη εκκίνησης ακολουθούμενη από τη διεύθυνση της. Το επόμενο bit είναι το R/\bar{W} bit, το οποίο είναι HIGH για μία εντολή ανάγνωσης και LOW για μία εντολή εγγραφής. Όταν η συσκευή slave εντοπίσει τη διεύθυνσή της, την αναγνωρίζει και είναι έτοιμη για συνεχή επικοινωνία.

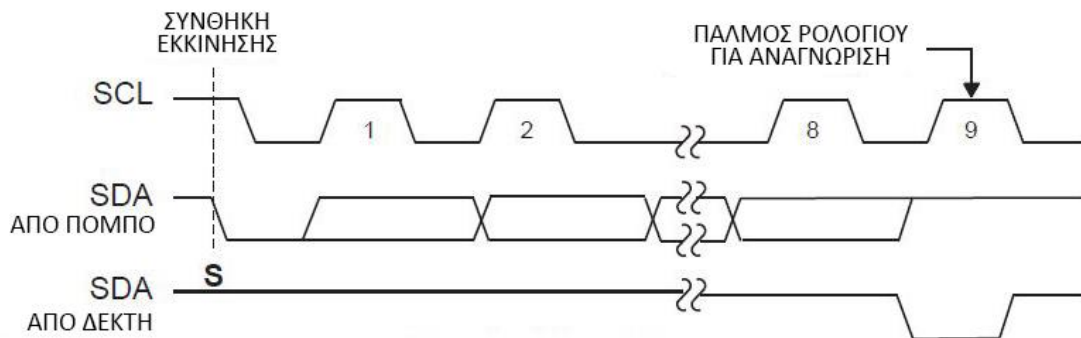


Εικόνα B.4 – Διεύθυνση συσκευής slave

Το MPR121 χρησιμοποιεί διεύθυνση slave των 7-bit η οποία μπορεί να λάβει διαφορετικές τιμές ανάλογα με τη σύνδεση του pin ADDR. Στην παρούσα εφαρμογή η διεύθυνση που χρησιμοποιείται είναι η 0x5A.

B.5 Αναγνώριση

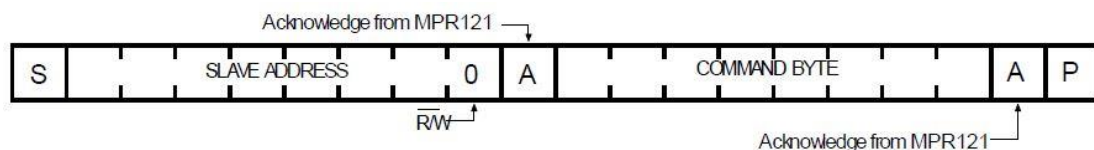
Το bit αναγνώρισης είναι ένα σύγχρονο με το ρολόι ένατο bit το οποίο ο αποδέκτης ενός αιτήματος χρησιμοποιεί για πραγματοποιήσει μία χειραψία απόδειξης για κάθε byte δεδομένων. Οπότε το κάθε byte που μεταδίδεται απαιτεί ουσιαστικά 9 bits. Η συσκευή master παράγει τον 9^ο παλμό του ρολογιού, και ο αποδέκτης μεταβάλλει σε LOW τη γραμμή SDA κατά τη διάρκεια του παλμού ρολογιού αναγνώρισης, έτσι ώστε το SDA να είναι σταθερά σε LOW όσο ο παλμός στο SCL είναι σε HIGH. Το bit αναγνώρισης μπορεί να το παράγει είτε η συσκευή master είτε η slave, ανάλογα με το ποια είναι ο αποδέκτης των δεδομένων μετάδοσης.



Εικόνα B.5 – Αναγνώριση

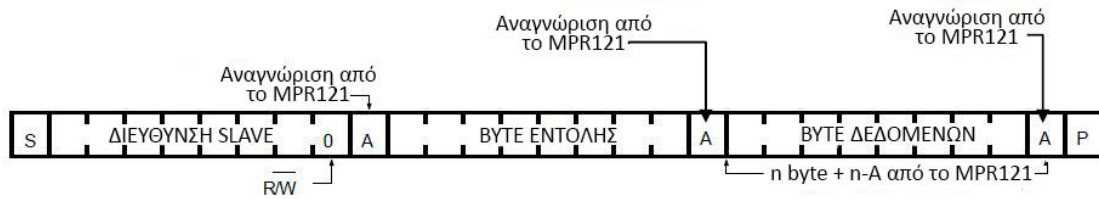
B.6 Διάταξη Εγγραφής

Μία εγγραφή σε μία συσκευή slave αποτελείται από τη μετάδοση της διεύθυνσης της συσκευής με το bit R/\overline{W} σε λογικό 0, ακολουθούμενο από τουλάχιστον ένα byte πληροφορίας. Το πρώτο byte πληροφορίας είναι το byte εντολής. Το byte εντολής ορίζει ποιος καταχωρητής θα γραφεί από το επόμενο byte, εάν ληφθεί. Εάν ανιχνευθεί μία συνθήκη λήξης ύστερα από τη λήψη του byte εντολής, τότε αυτό αποθηκεύεται στο δείκτη καταχωρητών και δε λαμβάνεται καμία άλλη ενέργεια.



Εικόνα B.6 – Διάταξη εγγραφής με byte εντολής μόνο

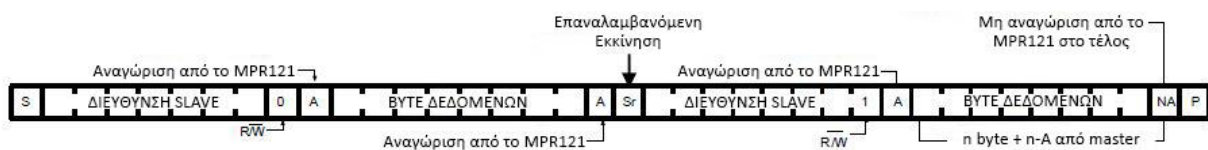
Όποια byte ληφθούν ύστερα από το byte εντολής είναι byte δεδομένων. Το πρώτο byte δεδομένων αποθηκεύεται στον εσωτερικό καταχωρητή που επιλέχθηκε από το byte εντολής. Εάν μεταδοθούν περισσότερα του ενός byte πριν αποδοθεί μία συνθήκη λήξης, συνήθως αποθηκεύονται σε διαδοχικούς καταχωρητές, ανάλογα με τον τύπο συσκευής του αποδέκτη. Στο MPR121 η διεύθυνση του καταχωρητή που δόθηκε από το byte εντολής, αυξάνεται αυτόματα για την αποθήκευση διαδοχικών byte πληροφορίας.



Εικόνα Β.7 – Διάταξη εγγραφής με byte εντολής και δεδομένων

B.7 Διάταξη Ανάγνωσης

Για να πραγματοποιηθεί μία ανάγνωση θα πρέπει αρχικά η διεύθυνση του καταχωρητή του οποίου το περιεχόμενο επιθυμείται να ληφθεί να τοποθετηθεί στο δείκτη καταχωρητών μέσω μίας εγγραφής όπως περιεγράφηκε προηγουμένως. Σε αυτήν την περίπτωση όμως αντί για μία συνθήκη λήξης η συσκευή master θα πραγματοποιήσει επαναλαμβανόμενη εκκίνηση με μία νέα συνθήκη εκκίνησης, ακολουθούμενη ξανά από τη διεύθυνση της συσκευής slave και το bit R/\overline{W} σε λογικό 1 σηματοδοτώντας την ανάγνωση. Έπειτα η συσκευή master μπορεί να λαμβάνει διαδοχικά byte δεδομένων εάν πραγματοποιεί μία αναγνώριση μετά από τη λήψη κάθε byte. Το πρώτο byte που θα ληφθεί θα ανήκει στον καταχωρητή του οποίου η διεύθυνση δόθηκε στο byte εντολής κατά την αρχική εγγραφή, και τα επόμενα σε καταχωρητές διαδοχικών διευθύνσεων. Η ανάγνωση σταματά όταν αποδοθεί μία μη-αναγνώριση και μία συνθήκη λήξης.



Εικόνα Β.8 – Διάταξη ανάγνωσης με byte εντολής και δεδομένων

Παράρτημα Γ

Μετρήσεις ηλεκτροδίων της μάσκας

Στις επόμενες σελίδες περιλαμβάνονται οι πίνακες με τις μετρήσεις του ηλεκτροδίου αναφοράς και των ηλεκτροδίων ελέγχου της τελικής κατασκευής της μάσκας για όλες τις πιθανές τιμές ρεύματος (I) και χρόνου (T) φόρτισης.

Η κύρια χρήση των δεδομένων αυτών αφορούσε την επιλογή των I και T για κάθε ηλεκτρόδιο ώστε η μετρούμενη τιμή τάσης των 10 bit που θα αντιστοιχεί σε αυτά να είναι η επιθυμητή. Συγκεκριμένα, όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 4.9, για το ηλεκτρόδιο ελέγχου επιλέχθηκε η τιμή 600 και για τα ηλεκτρόδια ελέγχου η τιμή 700. Η τιμές αυτές είναι χρωματισμένες στους επόμενους πίνακες.

Επίσης, συμπεριλαμβάνονται οι πίνακες για τιμές των ηλεκτροδίων ελέγχου όταν βρίσκονται σε επαφή ώστε να μπορεί να φανεί η διαφορά ανάμεσα στις καταστάσεις των ηλεκτροδίων και να επιβεβαιωθεί η δυνατότητα ανίχνευσης αφής σε αυτά. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι σε όλες τις περιπτώσεις η διαφορά αυτή είναι πολύ μεγάλη.

Τέλος, φαίνεται ότι υπάρχουν και άλλοι συνδυασμοί των I και T για τα οποία θα επιτυγχάνονταν παρόμοιες τιμές, χωρίς όμως καμία διαφορά στη λειτουργία του συστήματος ή τον προγραμματισμό του.

Αν και από κάθε έναν από τους πίνακες αυτού του παραρτήματος χρησιμοποιήθηκε μόνο μία τιμή, εδώ περιλαμβάνονται ολόκληροι για λόγους ανάλυσης και πληρότητας της εργασίας.

Σημείωση: Υπενθυμίζεται ότι οι επισημασμένες με κόκκινο τιμές δε λαμβάνουν μέρος στον υπολογισμό της χωρητικότητας του ηλεκτροδίου αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν (εκτός των ακραίων) στην ανίχνευση επαφής/απελευθέρωσης. Οι τιμές χωρητικότητας που αντιστοιχούν στους επόμενους πίνακες φαίνονται στον πίνακα 4.11.

Πίνακας Γ.1 – Τιμές ηλεκτροδίου αναφοράς

		Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)									Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)							
		0,5	1	2	4	8	16	32			0,5	1	2	4	8	16	32	
Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	1	20	45	94	194	383	712	1022	Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	33	705	1021	1023	1023	1023	1023	1023	
	2	45	95	194	385	711	1022	1023		34	722	1021	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	3	70	145	295	550	999	1022	1023		35	739	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	4	95	195	387	712	1022	1023	1023		36	757	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	5	120	246	469	876	1022	1023	1023		37	772	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	6	146	296	550	996	1023	1023	1023		38	790	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	7	171	345	630	1019	1023	1023	1023		39	805	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	8	196	389	710	1022	1023	1023	1023		40	824	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	9	222	430	790	1022	1023	1023	1023		41	837	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	10	247	470	869	1023	1023	1023	1023		42	854	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	11	272	510	941	1023	1023	1023	1023		43	867	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	12	298	549	990	1023	1023	1023	1023		44	884	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	13	323	587	1010	1023	1023	1023	1023		45	897	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	14	347	626	1018	1023	1023	1023	1023		46	911	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	15	369	663	1021	1023	1023	1023	1023		47	922	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	16	390	703	1022	1023	1023	1023	1023		48	941	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	17	410	740	1022	1023	1023	1023	1023		49	949	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	18	430	779	1022	1023	1023	1023	1023		50	959	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	19	450	816	1022	1023	1023	1023	1023		51	966	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	20	470	855	1022	1023	1023	1023	1023		52	976	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	21	488	889	1023	1023	1023	1023	1023		53	981	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	22	507	923	1023	1023	1023	1023	1023		54	987	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	23	526	950	1023	1023	1023	1023	1023		55	991	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	24	546	976	1023	1023	1023	1023	1023		56	998	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	25	564	991	1023	1023	1023	1023	1023		57	1000	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	26	583	1002	1023	1023	1023	1023	1023		58	1004	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	27	600	1009	1023	1023	1023	1023	1023		59	1006	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	28	619	1014	1023	1023	1023	1023	1023		60	1009	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	29	636	1017	1023	1023	1023	1023	1023		61	1010	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	30	654	1019	1023	1023	1023	1023	1023		62	1012	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	31	670	1020	1023	1023	1023	1023	1023		63	1013	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	32	689	1021	1023	1023	1023	1023	1023										

Πίνακας Γ.2 – Τιμές ηλεκτροδίου ελέγχου 1 ελεύθερο

		Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)									Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)							
		0,5	1	2	4	8	16	32			0,5	1	2	4	8	16	32	
Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	1	18	40	83	171	345	641	1021	Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	33	644	1017	1023	1023	1023	1023	1023	
	2	40	84	172	346	642	1021	1022		34	659	1019	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	3	62	128	261	496	937	1023	1023		35	674	1020	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	4	84	173	347	643	1021	1022	1023		36	691	1021	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	5	107	217	423	790	1022	1023	1023		37	705	1021	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	6	129	262	497	934	1022	1023	1023		38	720	1021	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	7	151	306	570	1008	1023	1023	1023		39	735	1021	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	8	174	349	642	1020	1023	1023	1023		40	752	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	9	196	388	713	1022	1023	1023	1023		41	765	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	10	218	425	785	1022	1023	1023	1023		42	781	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	11	241	462	857	1023	1023	1023	1023		43	795	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	12	263	498	926	1022	1023	1023	1023		44	811	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	13	286	533	976	1023	1023	1023	1023		45	824	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	14	308	568	1003	1023	1023	1023	1023		46	839	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	15	329	602	1014	1023	1023	1023	1023		47	851	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	16	351	638	1019	1023	1023	1023	1023		48	872	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	17	370	671	1021	1023	1023	1023	1023		49	883	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	18	389	705	1022	1023	1023	1023	1023		50	897	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	19	407	739	1022	1023	1023	1023	1023		51	907	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	20	426	775	1022	1023	1023	1023	1023		52	921	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	21	443	808	1022	1023	1023	1023	1023		53	930	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	22	461	842	1022	1023	1023	1023	1023		54	940	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	23	478	873	1023	1023	1023	1023	1023		55	947	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	24	496	909	1023	1023	1023	1023	1023		56	960	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	25	513	936	1023	1023	1023	1023	1023		57	966	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	26	530	959	1023	1023	1023	1023	1023		58	973	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	27	546	977	1023	1023	1023	1023	1023		59	978	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	28	564	992	1023	1023	1023	1023	1023		60	985	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	29	580	1001	1023	1023	1023	1023	1023		61	988	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	30	596	1008	1023	1023	1023	1023	1023		62	993	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	31	612	1012	1023	1023	1023	1023	1023		63	996	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	32	629	1015	1023	1023	1023	1023	1023										

Πίνακας Γ.3 – Τιμές ηλεκτροδίου ελέγχου 1 σε επαφή

		Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)									Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)						
		0,5	1	2	4	8	16	32			0,5	1	2	4	8	16	32
Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	1	0	0	0	2	5	11	20	Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	33	23	36	61	106	190	345	616
	2	0	1	3	6	11	22	40		34	24	37	63	109	196	355	634
	3	1	2	4	8	17	33	60		35	25	38	64	112	202	365	651
	4	2	3	6	12	23	43	79		36	26	40	66	115	207	375	669
	5	3	4	8	15	29	54	99		37	26	41	68	118	213	386	686
	6	3	5	10	19	35	65	118		38	27	42	70	122	218	396	704
	7	4	7	12	22	41	75	137		39	28	43	72	125	224	406	721
	8	4	8	14	26	47	86	156		40	29	44	74	128	230	416	738
	9	5	9	16	29	53	96	175		41	29	45	75	131	235	426	756
	10	6	10	18	32	59	107	194		42	30	46	77	134	241	435	773
	11	7	11	20	36	64	118	214		43	31	47	79	138	246	446	790
	12	8	12	21	39	70	128	233		44	32	49	81	141	252	456	807
	13	8	14	23	42	76	138	251		45	32	50	83	144	258	466	824
	14	9	15	25	45	82	149	271		46	33	51	84	147	264	475	841
	15	10	16	27	48	87	160	289		47	34	52	86	150	269	485	857
	16	11	17	29	52	93	170	308		48	35	53	88	153	275	495	874
	17	11	18	31	55	99	180	326		49	35	54	90	156	280	505	891
	18	12	19	33	58	104	191	344		50	36	55	92	160	286	515	906
	19	13	20	35	61	110	201	363		51	37	56	94	163	292	525	920
	20	14	22	36	64	116	211	382		52	38	58	95	166	297	535	932
	21	14	23	38	68	122	222	400		53	38	59	97	169	303	544	944
	22	15	24	40	71	128	232	419		54	39	60	99	172	308	554	953
	23	16	25	42	74	133	243	437		55	40	61	101	175	314	564	961
	24	17	26	44	78	139	253	456		56	40	62	103	178	319	574	968
	25	18	27	46	81	145	264	474		57	41	63	105	182	325	584	973
	26	19	28	48	84	151	274	492		58	42	64	107	185	330	593	978
	27	19	30	50	87	156	285	511		59	43	65	108	188	336	603	981
	28	20	31	52	90	162	295	528		60	43	66	110	191	341	612	985
	29	20	32	53	93	168	305	546		61	44	68	112	194	347	622	987
	30	21	33	55	96	173	315	564		62	45	69	114	197	352	631	989
	31	22	34	57	100	179	325	582		63	46	70	115	200	358	641	991
	32	23	35	59	103	184	335	598									

Πίνακας Γ.4 – Τιμές ηλεκτροδίου ελέγχου 2 ελεύθερο

		Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)									Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)							
		0,5	1	2	4	8	16	32			0,5	1	2	4	8	16	32	
Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	1	18	40	84	174	349	649	1021	Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	33	651	1018	1023	1023	1023	1023	1023	
	2	40	85	174	350	649	1021	1023		34	666	1019	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	3	63	130	264	502	947	1022	1023		35	682	1020	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	4	85	175	352	651	1021	1022	1023		36	699	1021	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	5	108	220	428	799	1022	1023	1023		37	712	1021	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	6	130	265	503	943	1022	1022	1023		38	729	1021	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	7	153	310	576	1010	1023	1023	1023		39	743	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	8	176	354	650	1021	1023	1023	1023		40	761	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	9	198	393	722	1022	1023	1023	1023		41	774	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	10	221	430	795	1022	1023	1023	1023		42	790	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	11	244	467	867	1023	1023	1023	1023		43	803	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	12	267	503	935	1022	1023	1023	1023		44	820	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	13	289	539	982	1023	1023	1023	1023		45	832	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	14	312	575	1006	1023	1023	1023	1023		46	848	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	15	334	609	1016	1023	1023	1023	1023		47	860	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	16	355	645	1020	1023	1023	1023	1023		48	881	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	17	375	679	1021	1023	1023	1023	1023		49	892	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	18	394	714	1022	1023	1023	1023	1023		50	905	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	19	412	747	1022	1023	1023	1023	1023		51	915	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	20	431	784	1022	1023	1023	1023	1023		52	929	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	21	448	817	1022	1023	1023	1023	1023		53	937	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	22	466	851	1022	1023	1023	1023	1023		54	947	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	23	483	883	1022	1023	1023	1023	1023		55	954	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	24	502	919	1023	1023	1023	1023	1023		56	966	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	25	519	944	1023	1023	1023	1023	1023		57	971	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	26	536	966	1023	1023	1023	1023	1023		58	978	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	27	553	983	1023	1023	1023	1023	1023		59	983	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	28	570	996	1023	1023	1023	1023	1023		60	989	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	29	586	1004	1023	1023	1023	1023	1023		61	992	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	30	603	1010	1023	1023	1023	1023	1023		62	996	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	31	619	1014	1023	1023	1023	1023	1023		63	999	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	32	636	1017	1023	1023	1023	1023	1023										

Πίνακας Γ.5 – Τιμές ηλεκτροδίου ελέγχου 2 σε επαφή

		Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)									Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)						
		0,5	1	2	4	8	16	32			0,5	1	2	4	8	16	32
Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	1	0	0	0	1	3	7	14	Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	33	20	29	48	81	143	253	443
	2	0	0	2	4	8	16	29		34	20	30	49	83	147	261	456
	3	0	1	3	6	13	24	44		35	21	31	51	86	151	269	468
	4	1	2	5	9	17	32	57		36	21	32	52	88	155	276	481
	5	2	3	6	12	22	40	71		37	22	33	53	91	159	284	493
	6	2	4	8	14	26	48	85		38	23	34	55	93	164	291	506
	7	3	5	9	17	31	56	99		39	23	35	56	96	168	298	518
	8	4	6	11	19	35	63	113		40	24	36	58	98	172	306	531
	9	4	7	12	22	40	71	127		41	25	37	59	101	177	313	543
	10	5	8	14	24	44	79	140		42	25	38	61	103	181	321	555
	11	6	9	15	27	48	87	154		43	26	38	62	105	185	328	568
	12	6	10	17	29	53	94	167		44	26	39	64	108	189	335	580
	13	7	11	18	32	57	102	181		45	27	40	65	110	193	342	592
	14	8	12	20	34	61	110	195		46	28	41	66	113	197	350	604
	15	8	12	21	37	66	117	208		47	28	42	68	115	202	357	616
	16	9	14	23	39	70	125	221		48	29	43	69	117	206	364	628
	17	10	14	24	42	74	132	235		49	30	44	71	120	210	372	640
	18	10	15	26	44	79	140	248		50	30	45	72	122	214	379	652
	19	11	16	27	47	83	148	262		51	31	46	74	125	219	386	664
	20	11	17	29	49	87	156	275		52	32	47	75	127	223	393	677
	21	12	18	30	52	92	163	288		53	32	48	76	129	227	401	688
	22	13	19	32	54	96	171	302		54	33	48	78	132	231	408	700
	23	13	20	33	57	100	179	315		55	34	49	79	134	235	415	711
	24	14	21	35	59	104	186	328		56	34	50	81	137	239	422	723
	25	15	22	36	62	109	193	341		57	35	51	83	139	243	430	735
	26	15	23	37	64	113	201	354		58	35	52	84	141	248	436	746
	27	16	24	39	67	117	209	367		59	36	53	85	144	252	443	758
	28	16	25	40	69	122	216	380		60	36	54	87	146	256	451	769
	29	17	26	42	71	126	224	393		61	37	55	88	149	260	457	781
	30	18	27	43	74	130	231	406		62	38	56	89	151	264	465	792
	31	18	27	45	76	134	239	418		63	39	57	91	154	268	472	804
	32	19	29	46	79	138	246	430									

Πίνακας Γ.6 – Τιμές ηλεκτροδίου ελέγχου 3 ελεύθερο

		Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)									Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)							
		0,5	1	2	4	8	16	32			0,5	1	2	4	8	16	32	
Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	1	18	41	86	178	357	663	1022	Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	33	663	1019	1023	1023	1023	1023	1023	
	2	41	87	178	358	663	1022	1022		34	679	1020	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	3	64	133	271	513	963	1022	1023		35	694	1021	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	4	87	179	360	665	1022	1023	1023		36	711	1021	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	5	111	226	438	817	1022	1023	1023		37	726	1021	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	6	134	272	513	959	1022	1023	1023		38	742	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	7	157	318	588	1014	1023	1023	1023		39	757	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	8	181	362	663	1021	1023	1023	1023		40	775	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	9	204	401	737	1022	1023	1023	1023		41	789	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	10	227	439	812	1022	1023	1023	1023		42	804	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	11	250	476	885	1022	1023	1023	1023		43	818	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	12	274	514	951	1022	1023	1023	1023		44	835	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	13	297	550	991	1023	1023	1023	1023		45	848	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	14	320	586	1010	1023	1023	1023	1023		46	863	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	15	342	621	1018	1023	1023	1023	1023		47	875	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	16	363	658	1021	1023	1023	1023	1023		48	896	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	17	383	693	1022	1023	1023	1023	1023		49	907	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	18	402	728	1022	1023	1023	1023	1023		50	920	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	19	421	763	1022	1023	1023	1023	1023		51	929	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	20	440	800	1022	1023	1023	1023	1023		52	941	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	21	457	833	1022	1023	1023	1023	1023		53	948	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	22	475	868	1023	1023	1023	1023	1023		54	958	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	23	493	900	1023	1023	1023	1023	1023		55	965	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	24	512	934	1023	1023	1023	1023	1023		56	975	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	25	529	957	1023	1023	1023	1023	1023		57	980	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	26	546	977	1023	1023	1023	1023	1023		58	986	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	27	563	991	1023	1023	1023	1023	1023		59	990	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	28	581	1002	1023	1023	1023	1023	1023		60	995	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	29	598	1008	1023	1023	1023	1023	1023		61	997	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	30	614	1013	1023	1023	1023	1023	1023		62	1001	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	31	630	1016	1023	1023	1023	1023	1023		63	1003	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	32	648	1018	1023	1023	1023	1023	1023										

Πίνακας Γ.7 – Τιμές ηλεκτροδίου ελέγχου 3 σε επαφή

		Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)									Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)						
		0,5	1	2	4	8	16	32			0,5	1	2	4	8	16	32
Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	1	0	0	0	0	2	4	8	Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	33	17	23	35	56	92	153	256
	2	0	0	1	2	5	10	17		34	17	24	36	58	95	158	263
	3	0	1	2	4	8	15	26		35	18	25	37	59	97	162	270
	4	1	1	3	6	11	20	34		36	18	25	38	61	100	167	278
	5	1	2	4	8	14	25	42		37	19	26	39	63	103	171	285
	6	2	3	5	10	17	30	50		38	19	27	41	65	106	176	292
	7	2	4	7	12	20	35	59		39	20	27	42	66	108	181	300
	8	3	5	8	13	23	39	66		40	20	28	43	68	111	185	307
	9	4	5	9	15	26	44	74		41	21	29	44	70	114	189	314
	10	4	6	10	17	29	49	82		42	21	30	45	71	117	194	322
	11	4	7	11	18	31	54	90		43	22	30	46	73	119	198	328
	12	5	8	12	20	34	58	98		44	22	31	47	74	122	203	335
	13	6	8	13	22	37	63	105		45	23	32	48	76	124	207	343
	14	6	9	14	24	40	68	113		46	23	33	49	78	127	211	350
	15	7	10	16	25	43	72	121		47	24	33	50	80	130	216	357
	16	7	11	17	27	46	77	128		48	25	34	51	81	132	220	364
	17	8	11	18	29	49	81	136		49	25	35	52	83	135	224	371
	18	8	12	19	31	51	86	143		50	26	35	53	84	138	229	378
	19	9	13	20	32	54	91	151		51	26	36	54	86	141	233	385
	20	10	14	21	34	57	95	159		52	27	37	55	87	143	237	393
	21	10	14	22	36	60	100	166		53	27	38	56	89	146	242	399
	22	11	15	23	37	62	104	174		54	28	38	58	91	148	246	406
	23	11	16	24	39	65	109	182		55	28	39	59	92	151	251	413
	24	12	16	25	41	68	113	189		56	29	40	60	94	154	255	420
	25	12	17	27	42	70	118	196		57	29	40	61	96	156	260	427
	26	13	18	28	44	73	122	204		58	30	41	62	97	159	264	434
	27	13	19	29	46	76	127	212		59	31	42	63	99	162	268	441
	28	14	19	30	48	79	131	219		60	31	43	64	100	164	273	448
	29	14	20	31	50	81	136	226		61	32	43	65	102	167	277	455
	30	15	21	32	51	84	141	234		62	32	44	66	104	169	281	462
	31	15	22	33	53	87	145	241		63	33	45	67	106	172	285	468
	32	16	22	34	54	90	149	248									

Πίνακας Γ.8 – Τιμές ηλεκτροδίου ελέγχου 4 ελεύθερο

		Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)									Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)							
		0,5	1	2	4	8	16	32			0,5	1	2	4	8	16	32	
Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	1	18	40	85	176	351	653	1021	Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	33	656	1019	1023	1023	1023	1023	1023	
	2	41	86	176	353	654	1021	1022		34	672	1019	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	3	64	131	267	506	952	1022	1023		35	687	1020	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	4	86	177	355	655	1021	1022	1023		36	704	1021	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	5	109	222	432	806	1022	1023	1023		37	718	1021	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	6	132	268	507	949	1022	1023	1023		38	735	1021	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	7	155	314	581	1011	1023	1023	1023		39	749	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	8	178	357	655	1021	1022	1023	1023		40	767	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	9	201	396	727	1022	1023	1023	1023		41	780	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	10	224	434	801	1022	1023	1023	1023		42	796	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	11	247	471	874	1022	1023	1023	1023		43	810	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	12	270	508	941	1022	1023	1023	1023		44	827	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	13	292	543	986	1022	1023	1023	1023		45	839	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	14	315	579	1007	1023	1023	1023	1023		46	854	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	15	338	614	1016	1022	1023	1023	1023		47	866	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	16	359	650	1020	1023	1023	1023	1023		48	887	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	17	378	684	1021	1022	1023	1023	1023		49	898	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	18	398	720	1022	1023	1023	1023	1023		50	911	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	19	416	754	1022	1023	1023	1023	1023		51	922	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	20	435	790	1022	1023	1023	1023	1023		52	935	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	21	452	824	1022	1023	1023	1023	1023		53	942	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	22	470	858	1022	1023	1023	1023	1023		54	951	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	23	487	890	1022	1023	1023	1023	1023		55	959	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	24	506	925	1022	1023	1023	1023	1023		56	970	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	25	523	950	1022	1023	1023	1023	1023		57	975	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	26	540	971	1023	1023	1023	1023	1023		58	982	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	27	557	987	1023	1023	1023	1023	1023		59	986	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	28	575	999	1023	1023	1023	1023	1023		60	992	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	29	591	1006	1023	1023	1023	1023	1023		61	995	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	30	608	1011	1023	1023	1023	1023	1023		62	998	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	31	624	1015	1023	1023	1023	1023	1023		63	1001	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	32	641	1017	1023	1023	1023	1023	1023										

Πίνακας Γ.9 – Τιμές ηλεκτροδίου ελέγχου 4 σε επαφή

		Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)									Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)						
		0,5	1	2	4	8	16	32			0,5	1	2	4	8	16	32
Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	1	0	0	0	1	3	7	13	Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	33	21	31	49	80	134	226	371
	2	0	1	2	4	8	15	26		34	22	32	50	83	138	232	383
	3	1	2	3	6	12	22	38		35	22	33	52	85	142	240	394
	4	2	3	5	9	17	29	50		36	23	34	54	88	147	246	405
	5	2	4	6	12	21	36	62		37	24	35	55	90	151	253	416
	6	3	4	8	14	25	44	73		38	24	36	56	92	155	259	425
	7	3	5	9	17	29	51	85		39	25	37	58	94	158	266	434
	8	4	7	11	19	33	58	97		40	26	38	59	97	162	272	445
	9	5	8	13	22	38	65	108		41	26	38	61	99	166	278	455
	10	6	8	14	24	42	72	120		42	27	40	62	102	170	284	465
	11	6	10	16	27	46	78	131		43	28	40	64	104	174	291	475
	12	7	11	17	29	50	85	142		44	28	41	65	106	178	297	484
	13	7	11	19	32	54	92	154		45	29	42	66	108	181	303	494
	14	8	12	20	34	59	99	165		46	30	43	68	111	185	310	505
	15	9	13	22	37	62	106	176		47	30	44	69	113	189	316	515
	16	10	14	23	39	67	112	187		48	31	45	71	116	193	323	525
	17	11	15	25	42	70	119	198		49	32	46	72	118	197	329	534
	18	11	16	27	44	75	126	210		50	32	47	74	121	201	335	544
	19	12	17	28	46	79	132	221		51	33	48	75	123	205	341	554
	20	12	18	29	49	83	140	233		52	34	49	77	125	208	348	563
	21	13	19	31	51	87	147	244		53	34	50	78	127	212	354	573
	22	14	20	33	54	91	153	255		54	35	51	80	130	216	360	582
	23	14	21	34	56	95	160	266		55	36	52	81	132	220	366	592
	24	15	22	36	59	99	167	276		56	36	53	82	134	224	373	602
	25	16	23	37	61	103	173	287		57	37	54	84	137	227	379	611
	26	16	24	38	64	107	180	298		58	38	55	85	139	231	385	621
	27	17	25	40	66	111	187	308		59	38	56	87	141	235	391	630
	28	18	26	41	68	115	193	319		60	39	56	89	143	239	397	639
	29	18	27	43	71	119	200	330		61	40	58	90	146	243	403	649
	30	19	28	44	73	123	206	340		62	40	58	91	148	247	410	658
	31	20	29	46	75	127	213	351		63	41	59	92	150	250	415	668
	32	20	30	48	78	130	219	361									

Πίνακας Γ.10 – Τιμές ηλεκτροδίου 5 ελεύθερο

		Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)									Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)							
		0,5	1	2	4	8	16	32			0,5	1	2	4	8	16	32	
Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	1	18	40	84	173	347	645	1021	Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	33	649	1018	1023	1023	1023	1023	1023	
	2	40	85	173	349	646	1021	1023		34	665	1019	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	3	63	130	263	500	942	1022	1023		35	679	1020	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	4	85	174	350	647	1021	1023	1023		36	697	1021	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	5	107	219	427	796	1022	1023	1023		37	711	1021	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	6	130	264	501	939	1022	1023	1023		38	727	1021	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	7	153	309	574	1009	1023	1023	1023		39	741	1021	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	8	175	353	647	1021	1023	1023	1023		40	758	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	9	198	391	719	1022	1023	1023	1023		41	772	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	10	221	429	792	1022	1023	1023	1023		42	788	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	11	243	465	863	1022	1023	1023	1023		43	801	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	12	266	502	932	1022	1023	1023	1023		44	818	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	13	289	537	980	1022	1023	1023	1023		45	830	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	14	311	573	1005	1023	1023	1023	1023		46	845	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	15	333	607	1015	1023	1023	1023	1023		47	858	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	16	354	643	1019	1023	1023	1023	1023		48	879	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	17	374	677	1021	1023	1023	1023	1023		49	889	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	18	393	711	1022	1023	1023	1023	1023		50	903	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	19	411	745	1022	1023	1023	1023	1023		51	913	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	20	430	781	1022	1023	1023	1023	1023		52	927	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	21	447	814	1022	1023	1023	1023	1023		53	935	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	22	465	848	1022	1023	1023	1023	1023		54	945	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	23	482	880	1022	1023	1023	1023	1023		55	952	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	24	501	916	1022	1023	1023	1023	1023		56	964	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	25	517	941	1022	1023	1023	1023	1023		57	970	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	26	534	964	1022	1023	1023	1023	1023		58	977	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	27	551	981	1023	1023	1023	1023	1023		59	982	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	28	569	995	1023	1023	1023	1023	1023		60	988	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	29	585	1003	1023	1023	1023	1023	1023		61	991	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	30	601	1009	1023	1023	1023	1023	1023		62	995	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	31	617	1013	1023	1023	1023	1023	1023		63	998	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	32	634	1016	1023	1023	1023	1023	1023										

Πίνακας Γ.11 – Τιμές ηλεκτροδίου ελέγχου 5 σε επαφή

		Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)									Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)						
		0,5	1	2	4	8	16	32			0,5	1	2	4	8	16	32
Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	1	0	0	1	2	5	12	23	Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	33	26	40	67	116	209	379	680
	2	0	1	3	6	12	24	45		34	27	41	69	119	215	390	699
	3	1	2	5	10	19	36	66		35	27	42	71	123	221	401	718
	4	2	4	7	14	26	48	88		36	28	44	73	126	227	413	738
	5	3	5	9	17	32	60	109		37	29	45	75	130	233	424	757
	6	3	6	11	21	39	71	130		38	30	46	77	133	239	435	777
	7	4	7	13	24	45	83	151		39	31	48	79	137	246	446	796
	8	5	9	15	28	52	95	173		40	32	49	81	140	252	457	816
	9	6	10	18	32	58	106	194		41	32	50	83	144	258	468	835
	10	7	11	20	35	64	118	215		42	33	51	85	147	265	479	854
	11	8	12	22	39	71	129	236		43	34	52	87	151	270	490	873
	12	9	14	24	42	77	141	257		44	35	54	89	154	277	501	891
	13	9	15	26	46	83	152	277		45	36	55	91	158	283	512	909
	14	10	16	28	50	89	164	298		46	36	56	93	161	289	523	924
	15	11	18	30	53	96	175	319		47	37	57	95	164	295	534	939
	16	12	19	32	56	102	186	339		48	38	59	97	168	301	544	951
	17	13	20	34	60	108	198	360		49	39	60	99	172	308	555	960
	18	14	21	36	64	115	209	380		50	40	61	101	175	313	566	968
	19	15	23	38	67	121	221	401		51	41	62	103	178	319	576	975
	20	15	24	40	71	127	232	421		52	41	63	105	182	325	587	980
	21	16	25	42	74	133	244	441		53	42	65	107	185	332	598	984
	22	17	26	44	78	140	255	462		54	43	66	109	188	337	609	988
	23	18	28	46	81	146	266	482		55	44	67	111	192	344	620	991
	24	19	29	48	85	152	278	502		56	45	68	113	195	350	631	993
	25	19	30	51	88	159	289	522		57	45	69	115	199	356	641	995
	26	20	31	52	92	165	301	542		58	46	71	117	202	362	652	997
	27	21	33	55	95	171	312	562		59	47	72	119	206	368	663	998
	28	22	34	57	99	177	323	582		60	48	73	121	209	375	673	999
	29	23	35	59	102	184	334	602		61	49	74	123	212	381	684	1000
	30	23	36	61	106	190	345	621		62	49	76	125	216	387	694	1001
	31	24	38	63	109	196	357	641		63	50	77	127	219	392	705	1002
	32	25	39	64	113	202	368	660									

Πίνακας Γ.12 – Τιμές ηλεκτροδίου ελέγχου 6 ελεύθερο

		Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)									Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)							
		0,5	1	2	4	8	16	32			0,5	1	2	4	8	16	32	
Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	1	18	40	83	172	345	640	1021	Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	33	645	1017	1023	1023	1023	1023	1023	
	2	40	84	172	346	641	1021	1022		34	661	1019	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	3	62	128	261	496	936	1022	1023		35	676	1020	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	4	84	173	347	643	1021	1023	1023		36	693	1020	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	5	107	218	424	790	1022	1022	1023		37	707	1021	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	6	129	262	497	934	1022	1023	1023		38	722	1021	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	7	151	307	570	1007	1022	1023	1023		39	737	1021	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	8	174	350	643	1020	1023	1023	1023		40	754	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	9	196	389	714	1022	1023	1023	1023		41	767	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	10	219	426	786	1022	1023	1023	1023		42	783	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	11	241	462	857	1022	1023	1023	1023		43	797	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	12	264	499	926	1022	1023	1023	1023		44	814	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	13	286	534	976	1022	1023	1023	1023		45	826	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	14	308	569	1003	1022	1023	1023	1023		46	841	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	15	330	603	1015	1022	1023	1023	1023		47	854	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	16	352	639	1019	1023	1023	1023	1023		48	874	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	17	371	673	1021	1023	1023	1023	1023		49	885	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	18	390	707	1022	1023	1023	1023	1023		50	899	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	19	409	741	1022	1023	1023	1023	1023		51	910	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	20	427	776	1022	1023	1023	1023	1023		52	924	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	21	445	809	1022	1023	1023	1023	1023		53	932	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	22	462	843	1022	1023	1023	1023	1023		54	942	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	23	479	875	1022	1023	1023	1023	1023		55	950	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	24	498	911	1022	1023	1023	1023	1023		56	962	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	25	514	937	1022	1023	1023	1023	1023		57	968	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	26	531	961	1022	1023	1023	1023	1023		58	975	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	27	548	979	1022	1023	1023	1023	1023		59	980	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	28	566	993	1023	1023	1023	1023	1023		60	986	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	29	581	1002	1022	1023	1023	1023	1023		61	990	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	30	598	1008	1022	1023	1023	1023	1023		62	994	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	31	614	1013	1022	1023	1023	1023	1023		63	997	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	32	630	1016	1023	1023	1023	1023	1023										

Πίνακας Γ.13 – Τιμές ηλεκτροδίου ελέγχου 6 σε επαφή

		Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)									Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)						
		0,5	1	2	4	8	16	32			0,5	1	2	4	8	16	32
Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	1	0	0	0	2	5	10	19	Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	33	26	39	64	108	188	332	574
	2	0	1	3	6	11	21	39		34	26	40	66	111	194	342	592
	3	1	2	5	9	18	32	58		35	27	41	67	114	200	352	608
	4	2	4	7	13	24	43	75		36	28	43	69	118	205	361	624
	5	3	5	9	16	30	53	94		37	29	44	71	121	211	371	639
	6	4	6	11	20	36	63	112		38	30	45	73	124	216	379	654
	7	4	7	13	23	42	74	130		39	30	46	75	127	222	389	670
	8	6	9	15	27	47	84	148		40	31	47	77	130	227	398	685
	9	6	10	17	30	53	94	165		41	32	48	79	133	233	408	701
	10	7	11	19	33	59	104	183		42	33	50	81	137	238	418	719
	11	8	12	21	36	64	114	201		43	34	51	83	140	244	428	736
	12	9	14	23	40	70	124	219		44	35	52	85	144	250	438	751
	13	9	15	25	43	76	135	237		45	35	53	87	147	256	447	766
	14	10	16	27	47	82	145	255		46	36	54	88	150	261	456	781
	15	11	17	29	50	88	155	272		47	37	55	90	153	266	465	796
	16	12	18	31	53	93	165	290		48	38	57	92	156	271	474	809
	17	13	20	33	56	99	175	307		49	39	58	94	159	276	483	825
	18	13	21	35	60	105	185	324		50	39	59	96	162	282	492	840
	19	14	22	37	63	110	195	341		51	40	60	98	165	288	502	856
	20	15	23	39	66	116	204	358		52	41	62	100	169	294	512	872
	21	16	25	40	69	121	214	375		53	42	63	102	172	299	521	886
	22	17	26	43	73	127	224	392		54	42	64	103	175	304	530	900
	23	18	27	44	76	133	234	409		55	43	65	105	178	309	539	911
	24	18	28	46	79	139	245	427		56	44	66	107	181	315	548	923
	25	19	29	48	82	145	255	444		57	45	67	109	184	320	555	932
	26	20	31	50	86	150	265	461		58	46	68	111	187	325	564	941
	27	21	32	52	89	156	274	477		59	46	70	113	190	330	572	949
	28	22	33	54	92	161	284	493		60	47	71	115	193	335	581	955
	29	22	34	56	95	166	293	509		61	48	72	116	196	340	590	961
	30	23	35	58	98	172	303	525		62	49	73	118	200	346	600	967
	31	24	37	60	101	177	312	541		63	50	74	120	202	351	609	972
	32	25	38	62	105	183	321	557									

Πίνακας Γ.14 – Τιμές ηλεκτροδίου ελέγχου 7 ελεύθερο

		Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)									Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)							
		0,5	1	2	4	8	16	32			0,5	1	2	4	8	16	32	
Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	1	18	40	85	175	351	652	1021	Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	33	655	1019	1023	1023	1023	1023	1023	
	2	41	86	175	352	653	1021	1022		34	672	1019	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	3	64	131	267	506	951	1022	1023		35	686	1020	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	4	86	177	354	655	1021	1023	1023		36	703	1021	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	5	109	222	431	804	1022	1023	1023		37	718	1021	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	6	132	268	506	948	1022	1023	1023		38	734	1021	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	7	155	313	580	1011	1022	1023	1023		39	748	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	8	178	357	654	1021	1023	1023	1023		40	766	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	9	201	396	727	1022	1023	1023	1023		41	780	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	10	224	433	800	1022	1023	1023	1023		42	795	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	11	247	470	873	1022	1023	1023	1023		43	809	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	12	270	507	940	1022	1023	1023	1023		44	826	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	13	292	543	985	1022	1023	1023	1023		45	838	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	14	315	579	1007	1022	1023	1023	1023		46	853	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	15	337	614	1016	1023	1023	1023	1023		47	866	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	16	359	650	1020	1023	1023	1023	1023		48	887	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	17	378	684	1021	1023	1023	1023	1023		49	898	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	18	397	719	1022	1023	1023	1023	1023		50	911	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	19	416	754	1022	1023	1023	1023	1023		51	921	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	20	434	790	1022	1023	1023	1023	1023		52	934	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	21	452	823	1022	1023	1023	1023	1023		53	942	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	22	470	857	1022	1023	1023	1023	1023		54	951	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	23	487	889	1022	1023	1023	1023	1023		55	959	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	24	506	925	1022	1023	1023	1023	1023		56	970	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	25	523	949	1022	1023	1023	1023	1023		57	975	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	26	540	971	1023	1023	1023	1023	1023		58	981	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	27	557	986	1023	1023	1023	1023	1023		59	986	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	28	575	998	1023	1023	1023	1023	1023		60	992	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	29	591	1006	1023	1023	1023	1023	1023		61	995	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	30	608	1011	1023	1023	1023	1023	1023		62	998	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	31	623	1014	1023	1023	1023	1023	1023		63	1001	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	32	640	1017	1023	1023	1023	1023	1023										

Πίνακας Γ.15 – Τιμές ηλεκτροδίου ελέγχου 7 σε επαφή

		Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)									Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)						
		0,5	1	2	4	8	16	32			0,5	1	2	4	8	16	32
Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	1	0	0	0	1	3	6	11	Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	33	20	29	45	73	121	204	340
	2	0	0	2	4	7	13	24		34	21	30	46	75	125	210	350
	3	0	2	3	6	11	20	35		35	21	31	48	77	128	216	360
	4	1	2	4	8	15	27	46		36	22	32	49	79	131	221	369
	5	2	3	6	11	19	33	57		37	23	33	50	81	135	227	378
	6	3	4	7	13	23	40	68		38	23	33	52	83	139	233	387
	7	3	5	9	15	27	46	79		39	24	34	53	85	142	239	396
	8	4	6	10	18	30	53	89		40	25	35	54	87	145	245	405
	9	4	7	12	20	34	59	99		41	25	36	55	90	149	250	415
	10	5	8	13	22	38	65	110		42	26	37	57	91	152	256	424
	11	6	9	14	24	42	72	120		43	26	38	58	94	156	262	434
	12	7	10	16	27	45	78	131		44	27	39	59	96	159	268	444
	13	7	11	17	29	49	84	141		45	28	39	61	98	163	274	453
	14	8	12	19	31	53	90	153		46	29	40	62	100	167	279	462
	15	8	13	20	34	57	97	164		47	29	41	64	103	170	285	470
	16	9	14	22	36	61	103	174		48	30	42	65	104	173	290	479
	17	10	15	23	38	65	109	184		49	31	43	66	106	176	296	488
	18	10	15	24	40	68	115	194		50	31	44	67	108	180	301	497
	19	11	16	26	42	71	121	204		51	32	45	69	110	183	307	506
	20	12	17	27	45	75	127	214		52	32	45	70	112	187	313	515
	21	12	18	28	47	78	133	223		53	33	47	71	115	190	319	525
	22	13	19	30	49	82	139	234		54	33	48	72	117	193	325	535
	23	13	20	31	51	86	145	244		55	34	48	74	119	197	330	543
	24	14	21	33	54	90	152	256		56	35	49	75	121	200	336	552
	25	15	22	34	56	93	158	266		57	35	50	77	123	204	341	560
	26	16	23	36	58	97	164	276		58	36	51	78	125	207	347	569
	27	17	23	37	60	100	170	285		59	36	52	79	127	210	352	577
	28	17	24	38	62	104	175	294		60	37	53	81	129	214	357	586
	29	17	25	40	64	107	181	304		61	38	54	82	131	217	363	595
	30	18	26	41	66	110	187	313		62	38	54	83	133	220	368	604
	31	19	27	42	68	114	193	323		63	39	55	85	135	224	375	613
	32	19	28	43	70	118	198	331									

Πίνακας Γ.16 – Τιμές ηλεκτροδίου ελέγχου 8 ελεύθερο

		Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)									Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)							
		0,5	1	2	4	8	16	32			0,5	1	2	4	8	16	32	
Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	1	18	42	87	180	360	668	1022	Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	33	668	1019	1023	1023	1023	1023	1023	
	2	42	88	180	361	668	1022	1022		34	685	1020	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	3	65	135	274	517	967	1022	1023		35	700	1021	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	4	88	181	363	670	1022	1023	1023		36	717	1021	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	5	112	228	441	824	1022	1023	1023		37	732	1021	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	6	135	275	518	964	1022	1023	1023		38	748	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	7	159	321	593	1015	1023	1023	1023		39	763	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	8	182	365	669	1021	1023	1023	1023		40	781	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	9	206	405	743	1022	1023	1023	1023		41	795	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	10	230	443	818	1022	1023	1023	1023		42	811	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	11	253	480	891	1023	1023	1023	1023		43	825	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	12	277	518	957	1023	1023	1023	1023		44	842	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	13	300	555	994	1022	1023	1023	1023		45	854	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	14	323	591	1012	1022	1023	1023	1023		46	869	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	15	346	626	1018	1023	1023	1023	1023		47	882	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	16	367	664	1021	1023	1023	1023	1023		48	903	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	17	386	698	1022	1023	1023	1023	1023		49	913	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	18	406	735	1022	1022	1023	1023	1023		50	925	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	19	424	770	1022	1023	1023	1023	1023		51	935	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	20	443	807	1022	1023	1023	1023	1023		52	946	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	21	462	841	1022	1023	1023	1023	1023		53	954	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	22	480	875	1022	1023	1023	1023	1023		54	963	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	23	497	907	1022	1023	1023	1023	1023		55	969	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	24	516	940	1022	1023	1023	1023	1023		56	979	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	25	533	963	1022	1023	1023	1023	1023		57	983	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	26	551	982	1022	1023	1023	1023	1023		58	989	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	27	568	994	1023	1023	1023	1023	1023		59	993	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	28	586	1004	1023	1023	1023	1023	1023		60	998	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	29	602	1010	1023	1023	1023	1023	1023		61	1000	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	30	620	1014	1023	1023	1023	1023	1023		62	1003	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	31	636	1017	1023	1023	1023	1023	1023		63	1005	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	32	653	1019	1023	1023	1023	1023	1023										

Πίνακας Γ.17 – Τιμές ηλεκτροδίου ελέγχου 8 σε επαφή

		Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)									Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)						
		0,5	1	2	4	8	16	32			0,5	1	2	4	8	16	32
Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	1	0	0	0	2	5	10	19	Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	33	23	35	58	100	176	316	551
	2	0	1	2	5	11	20	37		34	23	36	59	103	182	325	567
	3	0	2	4	8	16	30	55		35	24	37	61	105	187	334	583
	4	2	3	6	11	22	40	72		36	25	38	63	109	192	343	598
	5	2	4	8	15	27	50	90		37	25	39	64	111	197	352	613
	6	3	5	10	18	33	60	107		38	27	40	66	114	202	361	628
	7	4	6	11	21	39	70	125		39	27	41	68	117	208	370	643
	8	5	7	13	24	44	80	142		40	28	42	69	120	213	379	659
	9	5	9	15	27	49	89	159		41	28	43	71	123	218	388	674
	10	6	10	17	30	55	99	176		42	29	44	73	126	223	397	688
	11	7	11	19	33	60	109	193		43	30	45	75	129	228	406	704
	12	7	12	21	37	66	118	211		44	30	46	76	132	233	415	719
	13	8	13	22	40	71	128	227		45	31	48	78	135	239	424	734
	14	9	14	24	43	76	137	245		46	32	48	80	138	244	433	748
	15	10	15	26	46	82	147	261		47	32	50	82	141	249	442	763
	16	10	16	28	49	87	156	278		48	33	51	84	143	254	451	778
	17	11	18	29	52	92	166	295		49	34	51	85	146	259	460	791
	18	12	19	31	55	98	176	311		50	35	53	87	149	264	469	807
	19	13	19	33	58	103	185	328		51	35	54	88	152	269	477	821
	20	13	21	35	61	108	194	344		52	36	55	90	155	275	486	835
	21	14	22	36	64	114	204	361		53	37	56	92	158	280	495	850
	22	15	23	38	67	119	213	377		54	38	57	94	161	285	503	864
	23	15	24	40	70	125	223	393		55	38	58	95	164	290	512	878
	24	16	25	42	73	130	232	409		56	39	59	97	167	294	521	891
	25	17	26	43	76	135	241	425		57	39	60	99	170	300	529	904
	26	18	27	45	79	140	251	442		58	41	61	101	173	305	538	916
	27	19	28	47	82	145	261	458		59	41	62	102	175	310	547	927
	28	19	29	49	85	151	270	474		60	42	63	104	178	315	555	936
	29	20	30	51	88	156	279	490		61	42	64	105	181	320	564	945
	30	21	32	52	91	161	289	506		62	43	65	107	184	325	573	953
	31	22	32	54	94	166	297	521		63	44	67	109	187	330	581	959
	32	22	33	56	96	171	306	536									

Πίνακας Γ.18 – Τιμές ηλεκτροδίου ελέγχου 9 ελεύθερο

		Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)									Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)							
		0,5	1	2	4	8	16	32			0,5	1	2	4	8	16	32	
Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	1	18	40	85	176	353	656	1021	Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	33	658	1019	1023	1023	1023	1023	1023	
	2	41	86	176	354	656	1021	1023		34	674	1020	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	3	64	132	268	508	955	1022	1022		35	689	1020	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	4	87	177	356	658	1021	1023	1023		36	706	1021	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	5	109	223	433	808	1022	1022	1023		37	721	1021	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	6	132	269	508	951	1023	1023	1023		38	737	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	7	155	315	583	1012	1023	1023	1023		39	752	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	8	178	358	657	1021	1023	1023	1023		40	770	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	9	201	397	730	1022	1023	1023	1023		41	783	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	10	225	435	804	1022	1023	1023	1023		42	799	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	11	247	472	876	1022	1023	1023	1023		43	813	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	12	270	509	944	1022	1023	1023	1023		44	830	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	13	293	545	987	1022	1023	1023	1023		45	842	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	14	316	581	1008	1023	1023	1023	1023		46	857	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	15	339	616	1017	1023	1023	1023	1023		47	870	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	16	360	653	1020	1023	1023	1023	1023		48	891	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	17	379	687	1021	1022	1023	1023	1023		49	901	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	18	399	722	1022	1023	1023	1023	1023		50	915	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	19	417	757	1022	1023	1023	1023	1023		51	925	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	20	436	794	1022	1023	1023	1023	1023		52	938	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	21	454	827	1022	1023	1023	1023	1023		53	945	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	22	472	861	1022	1023	1023	1023	1023		54	955	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	23	489	893	1023	1023	1023	1023	1023		55	961	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	24	508	928	1023	1023	1023	1023	1023		56	973	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	25	525	952	1023	1023	1023	1023	1023		57	978	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	26	542	973	1023	1023	1023	1023	1023		58	984	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	27	559	988	1023	1023	1023	1023	1023		59	988	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	28	577	1000	1023	1023	1023	1023	1023		60	994	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	29	593	1007	1023	1023	1023	1023	1023		61	996	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	30	610	1012	1023	1023	1023	1023	1023		62	1000	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	31	626	1015	1023	1023	1023	1023	1023		63	1002	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	32	643	1018	1023	1023	1023	1023	1023										

Πίνακας Γ.19 – Τιμές ηλεκτροδίου ελέγχου 9 σε επαφή

		Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)									Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)						
		0,5	1	2	4	8	16	32			0,5	1	2	4	8	16	32
Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	1	0	0	0	1	3	6	12	Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	33	19	28	43	72	122	209	355
	2	0	0	1	3	7	13	24		34	19	28	45	74	125	215	364
	3	1	1	3	6	11	20	36		35	20	29	46	76	129	221	375
	4	1	2	4	8	15	27	48		36	21	30	47	78	132	227	385
	5	2	3	6	10	19	34	59		37	21	31	49	80	136	233	394
	6	2	4	7	13	23	41	70		38	22	32	50	82	139	239	404
	7	3	5	8	15	27	47	81		39	22	32	51	84	143	245	415
	8	3	6	10	17	31	54	93		40	23	34	53	87	147	251	425
	9	4	7	11	20	34	60	103		41	24	34	54	89	150	257	434
	10	5	8	13	22	38	66	114		42	24	35	55	91	154	263	444
	11	5	8	14	24	42	73	125		43	25	36	57	93	157	269	454
	12	6	9	16	26	46	79	136		44	26	37	58	95	161	275	464
	13	7	10	17	28	49	86	147		45	26	38	59	97	164	281	474
	14	7	11	18	31	53	92	158		46	27	39	61	99	168	287	483
	15	8	12	19	33	57	98	168		47	27	40	62	101	171	293	493
	16	9	13	21	36	61	104	179		48	28	40	63	103	175	299	502
	17	9	14	22	38	64	111	189		49	29	41	64	105	178	304	512
	18	10	15	23	39	68	117	200		50	29	42	65	107	181	310	522
	19	11	16	25	42	71	123	210		51	30	43	67	110	185	316	532
	20	11	16	26	44	75	129	221		52	30	44	68	112	189	322	541
	21	12	17	27	46	79	136	232		53	31	44	70	114	192	328	550
	22	12	18	29	48	82	142	242		54	32	45	71	116	195	333	560
	23	13	19	30	51	86	148	253		55	32	46	72	118	199	339	569
	24	14	20	32	53	90	154	263		56	33	47	73	120	202	345	579
	25	14	21	33	55	93	161	273		57	34	48	74	122	205	351	588
	26	14	21	34	57	97	167	284		58	34	48	76	124	209	357	597
	27	15	22	35	59	100	173	294		59	35	50	77	126	213	362	607
	28	16	23	37	61	104	179	305		60	35	50	79	128	216	368	616
	29	17	24	38	63	108	185	314		61	35	51	80	130	220	374	625
	30	17	25	40	65	111	191	325		62	36	52	81	132	223	380	634
	31	18	26	41	68	115	197	335		63	37	53	82	134	226	385	643
	32	18	27	42	70	118	203	344									

Πίνακας Γ.20 – Τιμές ηλεκτροδίου ελέγχου 10 ελεύθερο

		Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)									Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)							
		0,5	1	2	4	8	16	32			0,5	1	2	4	8	16	32	
Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	1	18	40	85	175	352	654	1021	Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	33	663	1019	1023	1023	1023	1023	1023	
	2	41	86	176	353	654	1021	1023		34	679	1020	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	3	64	131	267	506	953	1022	1023		35	695	1021	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	4	87	177	355	655	1021	1023	1023		36	712	1021	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	5	110	223	433	806	1022	1023	1023		37	727	1021	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	6	132	269	507	949	1022	1023	1023		38	744	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	7	155	315	582	1012	1023	1023	1023		39	759	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	8	178	358	656	1021	1023	1023	1023		40	777	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	9	202	398	729	1022	1023	1023	1023		41	791	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	10	224	436	803	1022	1023	1023	1023		42	807	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	11	248	473	876	1022	1023	1023	1023		43	821	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	12	271	510	943	1023	1023	1023	1023		44	839	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	13	294	547	988	1023	1023	1023	1023		45	851	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	14	317	583	1009	1023	1023	1023	1023		46	867	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	15	339	618	1017	1023	1023	1023	1023		47	879	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	16	361	655	1020	1023	1023	1023	1023		48	901	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	17	380	690	1022	1023	1023	1023	1023		49	912	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	18	400	725	1022	1023	1023	1023	1023		50	924	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	19	419	760	1022	1023	1023	1023	1023		51	935	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	20	437	798	1023	1023	1023	1023	1023		52	947	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	21	456	831	1023	1023	1023	1023	1023		53	954	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	22	474	866	1023	1023	1023	1023	1023		54	964	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	23	491	898	1023	1023	1023	1023	1023		55	970	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	24	510	934	1023	1023	1023	1023	1023		56	980	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	25	527	957	1023	1023	1023	1023	1023		57	985	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	26	545	978	1023	1023	1023	1023	1023		58	991	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	27	562	992	1023	1023	1023	1023	1023		59	994	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	28	581	1003	1023	1023	1023	1023	1023		60	999	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	29	597	1009	1023	1023	1023	1023	1023		61	1002	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	30	614	1014	1023	1023	1023	1023	1023		62	1005	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	31	630	1016	1023	1023	1023	1023	1023		63	1007	1022	1023	1023	1023	1023	1023	1023
	32	648	1019	1023	1023	1023	1023	1023										

Πίνακας Γ.21 – Τιμές ηλεκτροδίου ελέγχου 10 σε επαφή

		Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)									Χρόνος Φόρτισης / Εκφόρτισης (μsec)						
		0,5	1	2	4	8	16	32			0,5	1	2	4	8	16	32
Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	1	0	0	1	3	8	16	31	Ρεύμα Φόρτισης (μΑ)	33	31	50	86	154	280	510	912
	2	1	2	4	9	17	33	61		34	32	52	89	158	288	525	933
	3	2	3	7	13	26	49	91		35	33	53	91	163	296	540	951
	4	2	5	9	18	35	65	119		36	34	54	94	167	304	555	965
	5	4	7	12	23	44	81	148		37	35	56	96	172	313	570	975
	6	4	8	15	28	52	97	178		38	36	58	99	176	321	584	983
	7	5	10	18	33	61	112	206		39	37	59	102	181	329	599	988
	8	7	11	20	38	69	128	235		40	38	61	104	185	337	612	992
	9	7	13	23	42	78	144	265		41	39	62	107	189	345	626	995
	10	9	15	26	47	87	160	293		42	40	64	109	194	353	640	998
	11	9	16	29	52	95	176	322		43	40	65	111	198	361	654	1000
	12	11	18	31	57	104	191	350		44	42	67	114	203	369	668	1001
	13	12	19	34	61	112	207	378		45	42	68	117	207	376	682	1002
	14	12	21	36	66	121	222	407		46	43	70	119	211	384	696	1003
	15	14	22	39	71	129	238	435		47	44	71	122	216	392	710	1004
	16	15	24	42	75	138	253	462		48	45	72	124	220	400	724	1005
	17	16	25	45	80	146	269	489		49	46	74	127	225	408	738	1006
	18	16	27	47	85	154	285	517		50	47	75	129	229	415	752	1006
	19	17	29	50	89	163	300	545		51	48	77	132	234	423	766	1007
	20	18	30	52	94	172	315	572		52	49	78	134	238	431	780	1007
	21	19	32	55	99	180	331	599		53	50	80	136	242	439	794	1007
	22	21	33	58	103	188	346	627		54	51	81	139	246	447	807	1008
	23	22	35	60	108	197	361	654		55	52	83	141	251	454	821	1009
	24	23	36	63	113	205	377	681		56	53	84	144	256	462	834	1009
	25	23	38	65	117	214	392	707		57	53	86	146	260	470	848	1009
	26	24	39	68	122	222	407	734		58	54	87	149	264	477	861	1009
	27	25	41	71	126	230	422	760		59	55	89	151	268	485	874	1010
	28	26	43	73	131	238	437	786		60	57	90	154	273	492	887	1010
	29	27	44	76	136	247	452	812		61	57	91	156	277	500	899	1010
	30	28	46	78	140	255	467	838		62	58	93	159	281	508	912	1010
	31	29	47	81	145	264	481	864		63	59	94	161	286	516	923	1011
	32	30	48	83	149	271	495	887									

Παράρτημα Δ

Προγράμματα ελέγχων και λήψης μετρήσεων [17]

Κατά την ανάπτυξη του συστήματος ελέγχου της παροχής οξυγόνου που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4, γράφτηκαν διάφορα προγράμματα για τη διεξαγωγή διαφόρων ελέγχων και τη λήψη μετρήσεων. Τα προγράμματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν μέσω του κυκλώματος Arduino Uno, το οποίο παρέχει τη δυνατότητα επικοινωνίας με ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω της βιβλιοθήκης Serial, πράγμα πολύ χρήσιμο στα αρχικά στάδια της εφαρμογής.

Σημείωση: Στα επόμενα προγράμματα γίνεται χρήση της βιβλιοθήκης *Wire.h* αντί της *TinyWireM.h* που περιέχεται στους τελικούς κώδικες του συστήματος που παρουσιάζονται στο τέλος του κεφαλαίου 4 (πληροφορίες για τη βιβλιοθήκη *TinyWireM.h* δίνονται στο παράρτημα Α). Για να λειτουργήσουν σωστά, η βιβλιοθήκη και η κλάση του αισθητήρα *MPR121* πρέπει να μεταβληθούν αντικαθιστώντας τη λέξη “*TinyWireM*” όπου παρουσιάζεται με “*Wire*”.

Δ.1 – Πρόγραμμα λήψης μετρήσεων ενός ηλεκτροδίου για κάθε συνδυασμό τιμών ρεύματος και χρόνου φόρτισης

Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιήθηκε στις παραγράφους 4.1 και 4.5 για τη λήψη των τιμών της τάσης εξόδου 10 bit σε μία τυχαία είσοδο του αισθητήρα, με στόχο να βγουν συμπεράσματα για την λειτουργία του.

Σημείωση: Σε αυτό και στο πρόγραμμα 4, τα δεδομένα αποδίδονται με τέτοιο τρόπο ώστε αφού αποθηκευτούν σε μορφή text (*.txt), να μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέσω κάποιου προγράμματος επεξεργασίας λογιστικών φύλλων.

```
#include <Wire.h>
#include "MPR121.h"

MPR121 sensor = MPR121 ();

int ele;

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  randomSeed(analogRead(0));
  ele = random(0, 12);
  /* Επιλογή τυχαίου ηλεκτροδίου. */

  while(!sensor.begin(0x5A, 0x8F, 0x10, 0x20, false));
```

```

        /* Προσπάθεια αρχικοποίησης του αισθητήρα μέχρι να επιτευχθεί. */
Serial.println("Ο αισθητήρας είναι έτοιμος.");

Serial.println("\nΛήψη μετρήσεων.");
/* Απόδοση όλων των δυνατών τιμών ρεύματος και χρόνου φόρτισης και
εκτύπωση των αποτελεσμάτων σε γραμμές και στήλες χωρισμένων από
κόμματα. */
for(uint8_t i=1; i<64; i++) {
    /* Επιλογή τιμής ρεύματος φόρτισης. */
    for(uint8_t j=1; j<8; j++) {
        /* Επιλογή τιμής χρόνου φόρτισης. */
        delay(5);
        sensor.setConfigRegs(i, (j << 5), 0x8F);
        /* Η συνάρτηση 'j << 5' μετακινεί τα bit της μεταβλητής j κατά πέντε θέσεις
ώστε η τιμή να ταιριάζει με τις θέσεις του αντίστοιχου καταχωρητή. */
        delay(45);
        Serial.print(sensor.filteredData(ele));
        /* Λήψη τιμής εξόδου. */
        if(j != 7)
            Serial.print(",");
    }
    Serial.println();
}
Serial.println("\nΤέλος εργασίας.");
}

void loop() {}
    /* Δεν πραγματοποιείται καμία άλλη ενέργεια. */

```

Δ.2 – Πρόγραμμα ελέγχου λειτουργίας και συνδέσεων του κυκλώματος του αισθητήρα

Στην παράγραφο 4.5 κατασκευάστηκε ένα αυτόνομο κύκλωμα που συμπεριελάμβανε τον αισθητήρα αφής MPR121 και όλα τα απαραίτητα για τη λειτουργία του ηλεκτρονικά στοιχεία. Το επόμενο πρόγραμμα χρησιμοποιήθηκε για να διαπιστωθεί η σωστή λειτουργία και επικοινωνία του αισθητήρα καθώς και η καλή σύνδεση όλων των εισόδων του.

```

#include <Wire.h>
#include "MPR121.h"

MPR121 sensor = MPR121 ();

void setup() {
    Serial.begin(9600);

    Serial.println("Πρόγραμμα ελέγχου MPR121.\n");

    while(!sensor.begin(0x5A, 0x8F, 0x10, 0x20, false));
        /* Προσπάθεια αρχικοποίησης του αισθητήρα μέχρι να επιτευχθεί. */
    Serial.println("Το MPR121 βρέθηκε. Επικοινωνία μέσω I2C σε λειτουργία.\n");
    delay(100);
}

```

```

for(uint8_t i=0; i<12; i++) {
    /* Έλεγχος όλων των ηλεκτροδίων. */
    Serial.print("Ηλεκτρόδιο "); Serial.print(i); Serial.print(": ");
    Serial.print("\tΤιμή ελεύθερου ηλεκτροδίου: ");
    Serial.print(sensor.filteredData(i));
    /* Λήψη και εκτύπωση τιμής εξόδου ελεύθερου ηλεκτροδίου. */
    Serial.print("\t Αναμονή για ανίχνευση αφής...");
    while(!(sensor.touched() & _BV(i)));
    /* Αναμονή μέχρι να ανιχνευθεί επαφή στο ηλεκτρόδιο που ελέγχεται. */
    Serial.print("\tΑνιχνεύθηκε επαφή.");
    Serial.print("\tΤιμή ηλεκτροδίου σε επαφή: ");
    Serial.println(sensor.filteredData(i));
    /* Λήψη και εκτύπωση τιμής εξόδου ηλεκτροδίου σε επαφή. */
    while(sensor.touched() & _BV(i));
    /* Ο έλεγχος μεταφέρεται στο επόμενο ηλεκτρόδιο μόνο αφού ελευθερωθεί
    αυτό που μόλις ελέγχθηκε. */
}

Serial.print("\nΤέλος ελέγχου.");
}

void loop() {}
    /* Δεν πραγματοποιείται καμία άλλη ενέργεια. */

```

Δ.3 – Πρόγραμμα λειτουργίας της μάσκας δειγματοληψίας

Για την επιλογή των σημείων τοποθέτησης στη μάσκα των ηλεκτροδίων, χρησιμοποιήθηκε μία μάσκα δειγματοληψίας με ηλεκτρόδια σε 22 διαφορετικά σημεία. Η διαδικασία αναλύεται στην παράγραφο 4.6. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για τη λειτουργία της μάσκας αυτής δίνεται στη συνέχεια.

```

#include <Wire.h>
#include "MPR121.h"

#define ILED 13
#define REFELE 0
#define SENELE 9

MPR121 sensor = MPR121();

uint16_t blvPre, blvNow;

void setup() {
    pinMode(ILED, OUTPUT);
    digitalWrite(ILED, LOW);

    while(!sensor.begin(0x5A, 0x4F, 0x10, 0x20, false));
    /* Προσπάθεια αρχικοποίησης του αισθητήρα μέχρι να επιτευχθεί. */

    blvPre = sensor.filteredData(REFELE);
    sensor.setBaseline(blvPre);

```

```

        /* Αρχικός ορισμός της τιμής βάση των ηλεκτροδίων ελέγχου με βάση τη
        μετρούμενη τιμή στο ηλεκτρόδιο αναφοράς. */
    }

    void loop() {
        blvNow = sensor.filteredData(REFELE);
        if(blvNow > (blvPre + 5) || blvNow < (blvPre - 5)) {
            sensor.setBaseline(blvNow);
            blvPre = blvNow;
        }

        /* Σύγκριση της προηγούμενης τιμής του ηλεκτροδίου αναφοράς με αυτή που
        μόλις λήφθηκε. Εάν υπάρχει αρκετή διαφορά, θετική ή αρνητική, τότε η τιμή
        βάσης των ηλεκτροδίων ελέγχου ανανεώνεται. Με αυτόν τον τρόπο
        αποφεύγονται οι περιττές εγγραφές των καταχωρητών. */

        if(sensor.touched() & _BV(9))
            digitalWrite(ILED, HIGH);
        else
            digitalWrite(ILED, LOW);

        /* Εάν ανιχνευθεί επαφή στο ηλεκτρόδιο ελέγχου το led υπόδειξης ανάβει, ενώ
        αν το ηλεκτρόδιο είναι ελεύθερο το led παραμένει σβηστό. */

        delay(10);
    }

```

Δ.4 – Πρόγραμμα λήψης μετρήσεων όλων των ηλεκτροδίων για κάθε συνδυασμό τιμών ρεύματος και χρόνου φόρτισης

Για την επιλογή των τελικών ρυθμίσεων ρεύματος και χρόνου φόρτισης για κάθε ένα ηλεκτρόδιο ξεχωριστά έγινε λήψη της τάσης εξόδου 10 bit σε όλες τις εισόδους του αισθητήρα για ελεύθερα ηλεκτρόδια όπως αναφέρεται και στην παράγραφο 4.9. Στη συνέχεια έγιναν οι ίδιες μετρήσεις για ηλεκτρόδια σε επαφή ώστε να παρατηρηθεί η διαφορά των τιμών στις δύο καταστάσεις. Τα αποτελέσματα περιέχονται στο παράρτημα Γ και λήφθηκαν με χρήση του επόμενου προγράμματος.

```

#include <Wire.h>
#include "MPR121.h"

MPR121 sensor = MPR121();

void setup() {
    Serial.begin(9600);

    while(!sensor.begin(0x5A, 0x8F, 0x10, 0x20, false));
    /* Προσπάθεια αρχικοποίησης του αισθητήρα μέχρι να επιτευχθεί. */
    Serial.println("Ο αισθητήρας είναι έτοιμος.");

    Serial.println("\nΛήψη μετρήσεων.");
    /* Απόδοση όλων των δυνατών τιμών ρεύματος και χρόνου φόρτισης και
    εκτύπωση των αποτελεσμάτων σε γραμμές και στήλες χωρισμένων από
    κόμματα. */
    for(uint8_t h=0; h<12; h++) {

```



```

    /* Επιλογή ηλεκτροδίου. */
    Serial.print("\nΗλεκτρόδιο: "); Serial.println(h);
    for(uint8_t i=1; i<64; i++) {
        /* Επιλογή τιμής ρεύματος φόρτισης. */
        for(uint8_t j=1; j<8; j++) {
            /* Επιλογή τιμής χρόνου φόρτισης. */
            delay(5);
            sensor.setConfigRegs(i, (j << 5), 0x8F);
            /* Η συνάρτηση 'j << 5' μετακινεί τα bit της μεταβλητής j κατά πέντε θέσεις
            ώστε η τιμή να ταιριάζει με τις θέσεις του αντίστοιχου καταχωρητή. */
            delay(45);
            Serial.print(sensor.filteredData(h));
            /* Λήψη τιμής εξόδου. */
            if(j != 7)
                Serial.print(",");
        }
        Serial.println();
    }
    Serial.println("\nΤέλος εργασίας.");
}

void loop() {}
    /* Δεν πραγματοποιείται καμία άλλη ενέργεια. */

```

Δ.5 – Πρόγραμμα ελέγχου της ανίχνευσης αφής με τις επιλεγμένες ρυθμίσεις

Ύστερα από την επιλογή των ρυθμίσεων για το ρεύμα και το χρόνο φόρτισης κάθε ηλεκτροδίου γράφτηκε πρόγραμμα που ελέγχει τη σωστή ανίχνευση επαφής και απελευθέρωσης στα ηλεκτρόδια της μάσκας. Η έξοδος του προγράμματος που ακολουθεί φαίνεται στην εικόνα 4.12.

```

#include <Wire.h>
#include "MPR121.h"

#define REFELE 5

MPR121 sensor = MPR121();

uint16_t statPre = 0, statNow;
uint16_t blvPre, blvNow;

void setup() {
    Serial.begin(9600);

    Serial.print("Αρχειοποίηση του MPR121... ");

    while(!sensor.begin(0x5A, 0x4F, 0x10, 0x20, true));
        /* Προσπάθεια αρχικοποίησης του αισθητήρα μέχρι να επιτευχθεί. */
    Serial.println("Ετοιμο.\n");

    delay(50);

```

```

blvPre = sensor.filteredData (REFELE);
sensor.setBaseline (blvPre);
    /* Αρχικός ορισμός της τιμής βάση των ηλεκτροδίων ελέγχου με βάση τη
    μετρούμενη τιμή στο ηλεκτρόδιο αναφοράς. */

Serial.print ("Τιμή Ηλεκτροδίου αναφοράς: "); Serial.println (blvPre);
    /* Απόδοση τιμής ηλεκτροδίου αναφοράς. Θα πρέπει να είναι περίπου 600. */
}

void loop() {
    blvNow = sensor.filteredData (REFELE);
    if (blvNow > (blvPre + 5) || blvNow < (blvPre - 5)) {
        sensor.setBaseline (blvNow);
        blvPre = blvNow;
    }

    /* Σύγκριση της προηγούμενης τιμής του ηλεκτροδίου αναφοράς με αυτή που
    μόλις λήφθηκε. Εάν υπάρχει αρκετή διαφορά, θετική ή αρνητική, τότε η τιμή
    βάσης των ηλεκτροδίων ελέγχου ανανεώνεται. Με αυτόν τον τρόπο
    αποφεύγονται οι περιττές εγγραφές των καταχωρητών. */

    statNow = sensor.touched();
    /* Λήψη κατάστασης ηλεκτροδίων. */
    for (uint8_t i=0; i<12; i++) {
        /* Έλεγχος κατάστασης όλων των ηλεκτροδίων ξεχωριστά. */
        switch (i) {
            /* Το switch χρησιμοποιείται για να γίνεται αυτόματα η αντιστοίχιση της
            αριθμησης των φυσικών ηλεκτροδίων της μάσκας με εκείνη των εισόδων του
            MPR121. */
            case 0:
                ele = 10;
                break;
            case 1:
                ele = 9;
                break;
            case 2:
                ele = 8;
                break;
            case 3:
                ele = 6;
                break;
            case 4:
                ele = 7;
                break;
            case 6:
                ele = 4;
                break;
            case 8:
                ele = 5;
                break;
            case 9:
                ele = 3;
                break;
            case 10:
                ele = 2;
                break;
            case 11:
                ele = 1;
                break;

```

```

        default:
            break;
    }

    if((statNow & _BV(i)) && !(statPre & _BV(i))) {
        /* Έλεγχος μεταβολής κατάστασης από ελεύθερο ηλεκτρόδιο σε επαφή. */
        delay(1000);
        /* Εισαγωγή καθυστέρηση για ευκολότερη ανάγνωση της εξόδου. */
        Serial.print("Ηλεκτρόδιο ");
        Serial.print(ele);
        Serial.print(" σε επαφή.");
        Serial.print(" Τιμή εξόδου: ");
        Serial.println(sensor.filteredData(i));
        /* Εκτύπωση του αριθμού του φυσικού ηλεκτροδίου που είναι σε επαφή και
        της τιμής τάσης 10 bit που μετρήθηκε. */
    }

    if(!(statNow & _BV(i)) && (statPre & _BV(i))) {
        /* Έλεγχος μεταβολής κατάστασης από ηλεκτρόδιο σε επαφή σε ελεύθερο. */
        delay(1000);
        /* Εισαγωγή καθυστέρηση για ευκολότερη ανάγνωση της εξόδου. */
        Serial.print("Ηλεκτρόδιο ");
        Serial.print(ele);
        Serial.print(" ελεύθερο.");
        Serial.print(" Τιμή εξόδου: ");
        Serial.println(sensor.filteredData(i));
        /* Εκτύπωση του αριθμού του φυσικού ηλεκτροδίου που είναι ελευθερώθηκε
        και της τιμής τάσης 10 bit που μετρήθηκε. */
    }
}
statPre = statNow;
/* Η νέα κατάσταση των ηλεκτροδίων τοποθετείται ως παλιά πριν αρχίσει ο
νέος κύκλος ελέγχου. */
delay(10);
}

```

Βιβλιογραφία

- [1] K. Υψηλάντης, *Πνευμονολογία*, 1st ed. University Studio Press, 1998.
- [2] A. Fishman, J. Elias, J. Fishman, M. Grippi, R. Senior, and A. Pack, *Fishman's Pulmonary Diseases and Disorders*, 4th ed. McGrawHill Medical, 2008.
- [3] R. Albert, S. Spiro, and J. Jett, *Κλινική Πνευμονολογία*, 1st ed. Ιατρικές Εκδόσεις Π. Χ. Πασχαλίδης, 2010.
- [4] O. Baruchin, B. Yoffe, and A. M. Baruchin, "Burns in inpatients by simultaneous use of cigarettes and oxygen therapy," *Burns*, vol. 30, no. 8, pp. 836–838, 2004.
- [5] T. Muehlberger, M. A. Smith, and L. Wong, "Domiciliary oxygen and smoking: An explosive combination," *Burns*, vol. 24, no. 7, pp. 658–660, 1998.
- [6] "Pressure sensor." [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Pressure_sensor.
- [7] "Continuous positive airway pressure." [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Continuous_positive_airway_pressure.
- [8] "Positive end-expiratory pressure." [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Positive_end-expiratory_pressure.
- [9] "Optoelectronics." [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Optoelectronics>.
- [10] D. Wang, "FDC1004 : Basics of Capacitive Sensing and Applications," *Texas Instrum.*, vol. SNOA927, no. December, pp. 1–12, 2014.
- [11] F. Semiconductor, "Proximity Capacitive Touch Sensor Controller MPR121," pp. 1–27, 2010.
- [12] Freescale Semiconductor, "MPR121 Capacitance sensing settings," *Appl. Note*, no. 3, pp. 1–12, 2010.
- [13] F. Semiconductor, "MPR121 Capacitance Sensing — Filtering and Timing," pp. 1–5, 2010.
- [14] F. Semiconductor, "MPR121 Baseline System," pp. 1–8, 2010.
- [15] "Adafruit 12 x Capacitive Touch Shield for Arduino - MPR121." [Online]. Available: <https://www.adafruit.com/product/2024>.
- [16] I. Keywords, "Level shifting techniques in I 2 C-bus design," no. June, pp. 1–7, 2007.
- [17] "Arduino Language Reference." [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Reference/HomePage>.
- [18] "What is Aduino?" [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>.
- [19] "Arduino Uno Rev3." [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>.
- [20] "Arduino FAQ." [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/FAQ>.
- [21] C. ATMEL, "ATMEL Datasheet ATTiny85," p. 234, 2013.

- [22] "USBtinyISP." [Online]. Available: <https://learn.adafruit.com/usbtinyisp>.
- [23] "D.I.Y. Simple USBtinyISP." [Online]. Available: <http://elltragoudi.x10.mx/thanasis/diy-usbtinyisp.html>.
- [24] F. Semiconductor and A. Note, "MPR121 Serial Communication," pp. 1–5, 2013.