



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Ανάπτυξη ηλεκτρονικού βιοαισθητήρα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Φρειδερίκη Ι. Καπερώνη

Επιβλέπων : Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Ανάπτυξη ηλεκτρονικού βιοαισθητήρα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Φρειδερίκη Ι. Καπερώνη

Επιβλέπων : Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 20^η Σεπτεμβρίου 2021.

.....
Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Γιώργος Μασσόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Παναγιώτης Τσαραμπάρης
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2021

.....
Φρειδερίκη Ι. Καπερώνη

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

Copyright © Φρειδερίκη Ι. Καπερώνη, 2021
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Σκοπός της εργασίας διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη της συμπεριφοράς ενός πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων ο οποίος μπορεί να ενσωματωθεί σε έναν αισθητήρα μέτρησης του κορονοϊού SARS-CoV-2. Ο εν λόγω πυκνωτής έχει την ιδιότητα αλλαγής της χωρητικότητάς του ανάλογα με το είδος, την περιεκτικότητα και την ποσότητα του υλικού που εναποτίθεται στην επιφάνειά του.

Στο θεωρητικό μέρος της εργασίας, πραγματοποιήθηκε μελέτη της δομής του κορονοϊού SARS-CoV-2 και μάλιστα των σωματιδίων που τον αποτελούν με ιδιαίτερη έμφαση στην γλυκοπρωτεΐνη αιχμής (S) μέσω της οποίας πραγματοποιείται η είσοδος των κορωνοϊών στα κύτταρα ξενιστές. Ως κυτταρικός υποδοχέας έχει αναγνωριστεί το ένζυμο μετατροπής αγγειοτενσίνης 2 (ACE2) αφού παρέχει ιική είσοδο στα ανθρώπινα κύτταρα μέσω της σύνδεσής του με την γλυκοπρωτεΐνη S.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ενδελεχής μελέτη της δομής και της χωρητικότητας του πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων καθώς και μερικών κυκλωμάτων μέτρησης της χωρητικότητάς του με διάφορες τεχνικές όπως την μέτρηση της σταθεράς χρόνου φόρτισης και εκφόρτισης του πυκνωτή, την χρήση του χρονοστή 555, την χρήση τελεστικών ενισχυτών και την μέθοδο του συντονισμού. Η κάθε μία τεχνική δύναται να προτιμηθεί ανάλογα τις ανάγκες του κυκλώματος και ανάλογα της τάξης μεγέθους της χωρητικότητας του πυκνωτή. Η μελέτη αυτή επεκτάθηκε και στην περιγραφή των αναγκαίων μικροελεγκτών και των λειτουργιών τους που απαιτεί ένα κύκλωμα για να μπορεί να μετρήσει την χωρητικότητα ενός πυκνωτή.

Στο πειραματικό μέρος της εργασίας, πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός, η ανάπτυξη αλλά και η κατασκευή πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων. Μελετήθηκε η συμπεριφορά του μέσω κάποιων πειραματικών μετρήσεων, σε κυκλώματα RC και LC αφού προηγήθηκε η μελέτη της συμπεριφοράς των απλών συμβατικών πυκνωτών σε αντίστοιχα κυκλώματα. Στόχος ήταν ανάλογα με την ποσότητα και την περιεκτικότητα του υγρού που εναποτίθεται στην επιφάνειά του να μπορεί να ανιχνευθεί η αλλαγή της

χωρητικότητάς του μέσω ενός κυκλώματος συντονισμού που θα περιγραφεί αναλυτικά στην πορεία. Τέλος, παρουσιάζεται η κατασκευή ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος βασισμένο σε έναν μικροελεγκτή της οικογένειας μικροελεγκτών ESP32, το οποίο έχει την δυνατότητα παραγωγής σήματος μεταβλητής συχνότητας αλλά και εμφάνισης της απόκρισης ενός κυκλώματος σε μία συσκευή όπως σε έναν υπολογιστή.

Λέξεις Κλειδιά

SARS-CoV-2, γλυκοπρωτεΐνη S, ένζυμο ACE2, πυκνωτής ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων, χωρητικότητα, αισθητήρας, κύκλωμα συντονισμού, λειτουργία γεννήτριας, λειτουργία παλμογράφου, κύκλωμα ανάγνωσης, ESP32

Abstract

The purpose of the dissertation was to study the behavior of an interdigitated capacitor that can be integrated into a SARS-CoV-2 coronavirus measuring sensor. The capacitor has the property of changing its capacitance depending on the type, content and amount of material deposited on its surface.

In the theoretical part of the dissertation, a study was performed on the structure of the coronavirus SARS-CoV-2 and the particles that compose it with special emphasis on the spike glycoprotein (S) through which the coronaviruses enter the host cells. The angiotensin-converting enzyme 2 (ACE2) has been identified as a cellular receptor since it provides viral entry into human cells by binding to s glycoprotein.

Furthermore, there was a thorough study of the structure and capacitance of the interdigitated capacitor as well as some circuits of measuring its capacitance with various techniques such as measuring the charging and discharging time of the capacitor, the use of the 555 timer, the use of the operational amplifier method and the method of resonance. Each technique may be preferred depending on the needs of the circuit and depending on the magnitude of the capacitance of the capacitor that is to be measured. This study was extended to the description of the necessary microcontrollers and their functions required by a circuit to be able to measure the capacitance of a capacitor.

In the experimental part of the dissertation, it was carried out the design, the development and the construction of an interdigitated capacitor. Its behavior was studied through some experimental measurements, in RC and LC circuits after the study of the behavior of simple conventional capacitors in respective circuits. The aim was, depending on the amount and content of the liquid deposited on its surface, to be able to detect the change in its capacitance through a resonant circuit that will be described in detail along the way. Finally, the construction of an electronic circuit based on a microcontroller of the ESP32 family of microcontrollers which has the ability to

generate a variable frequency signal and display the response of a circuit on a device such as a computer is presented.

KeyWords

SARS-CoV-2, S protein, enzyme ACE2, interdigitated capacitor, capacity, sensor, Resonance circuit, signal generation operation, λειτουργία παλμογράφου, κύκλωμα ανάγνωσης, ESP32

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους ήταν αρωγοί στην προσπάθειά μου για την εκπόνηση της Διπλωματικής μου εργασίας. Θα ήθελα να ευχαριστήσω πρωτίστως τον επιβλέποντα μου, κύριο Χριστοφόρου, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο επίκαιρο επιστημονικό θέμα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω βαθύτατα τον Αντώνη Γεωργά ο οποίος ήταν δίπλα μου από την αρχή μέχρι το τέλος με την αμέριστη βοήθεια που μου παρείχε και με τις κατευθύνσεις και συμβουλές του που συνέβαλαν σε σημαντικό βαθμό στην περάτωση της εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον κύριο Σπύρο Αγγελόπουλο για την καταλυτική βοήθειά του στο πειραματικό μέρος της εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κύριο Ματσόπουλο και τον κύριο Τσαραμπάρη οι οποίοι με τις κατευθυντήριες οδηγίες τους ως μέλη της επιτροπής, συνέδραμαν στην ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου Ευγενία και Ιωάννη για την υπομονή, την πίστη και την στήριξη που προσέφεραν σε μένα κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Θεωρητικό Μέρος	1
1 - Εισαγωγή	1
1.1 Περιγραφή του SARS-CoV-2	3
1.2 Δομή του SARS-CoV-2	3
1.2.1 Γλυκοπρωτεΐνη S	4
1.3 Υποδοχέας του SARS-CoV-2	4
1.4 Σύγκριση του SARS-CoV-2 με τον αρχικό SARS-CoV	6
1.5 Σύνδεση της πανδημίας με την ανάγκη για αισθητήρες ανίχνευσης SARS-CoV-2	6
2 - Πυκνωτές ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων	7
2.1 Δομή πυκνωτών ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων	7
2.2 Σύνδεση του πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων με τον πυκνωτή παραλλήλων πλακών	9
2.3 Εφαρμογές του πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων	10
2.4 Πλεονεκτήματα του πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων	11
2.5 Βασική σχέση χωρητικότητας πυκνωτών	12
2.5.1 Υπολογισμός χωρητικότητας πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων	17
3 - Κυκλώματα μέτρησης χωρητικότητας	21
3.1 Κυκλώματα μέτρησης χωρητικότητας με την σταθερά χρόνου	22
3.1.1 Φόρτιση και Εκφόρτιση Πυκνωτή	22
3.1.2 Υπολογισμός χωρητικότητας με την σταθερά χρόνου	24
3.2 Κυκλώματα μέτρησης χωρητικότητας με την χρήση του χρονοστή 555	26
3.2.1 Προσέγγιση με χρονοστές	26
3.2.2 Υπολογισμός χωρητικότητας με τον χρονοστή 555	28
3.3 Κυκλώματα μέτρησης χωρητικότητας με την χρήση τελεστικών ενισχυτών	30
3.4 Κυκλώματα μέτρησης χωρητικότητας με τη μέθοδο συντονισμού (υπολογισμός συχνότητας)	32
3.4.1 Κυκλώματα RLC	32
3.4.2 Φαινόμενο συντονισμού και υπολογισμός της συχνότητας συντονισμού	34
4 - Μικροελεγκτές	37
4.1 Παραγωγή του σήματος με την βοήθεια μικροελεγκτών	37
4.2 Κύκλωμα ανάγνωσης	38
Πειραματικό Μέρος	40
5 - Σχεδίαση και κατασκευή πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων	40
5.1 Σχεδίαση του κυκλώματος	41
5.2 Εκτύπωση σε διαφάνεια	41

5.3 Έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία	42
5.4 - Εμφάνιση	42
5.5 - Αποχάλκωση	43
5.6 - Καθαρισμός και Έλεγχος	44
6 - Πειραματικές μετρήσεις στο εργαστήριο	45
6.1 Κύκλωμα LC	53
6.1.1 Πειραματικές Μετρήσεις με συμβατικούς πυκνωτές	54
6.1.1.1 Θεωρητικός υπολογισμός της συχνότητας συντονισμού για LC κύκλωμα με πυκνωτή 10nF παράλληλο σε πηνίο 12mH	54
6.1.1.2 Πειραματικός υπολογισμός της συχνότητας συντονισμού για LC κύκλωμα με πυκνωτή 10nF παράλληλο σε πηνίο 12mH	54
6.1.1.3 Θεωρητικός υπολογισμός της συχνότητας συντονισμού για LC κύκλωμα με πυκνωτή 2nF παράλληλο σε πηνίο 12mH	58
6.1.1.4 Πειραματικός υπολογισμός της συχνότητας συντονισμού για LC κύκλωμα με πυκνωτή 2nF παράλληλο σε πηνίο 12mH	58
6.1.1.5 Θεωρητικός υπολογισμός της συχνότητας συντονισμού για LC κύκλωμα με πυκνωτή 10nF παράλληλο σε πηνίο 110μH	60
6.1.1.6 Πειραματικός υπολογισμός της συχνότητας συντονισμού για LC κύκλωμα με πυκνωτή 10nF παράλληλο σε πηνίο 110μH	60
6.1.1.7 Θεωρητικός υπολογισμός της συχνότητας συντονισμού για LC κύκλωμα με πυκνωτή 2nF παράλληλο σε πηνίο 110μH	65
6.1.1.8 Πειραματικός υπολογισμός της συχνότητας συντονισμού για LC κύκλωμα με πυκνωτή 2nF παράλληλο σε πηνίο 110μH	65
6.1.2 Πειραματικές Μετρήσεις με τον πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων	69
6.1.2.1 Θεωρητικός υπολογισμός της συχνότητας συντονισμού για LC κύκλωμα με πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων παράλληλο σε πηνίο 12mH	71
6.1.2.2 Πειραματικός υπολογισμός της συχνότητας συντονισμού για LC κύκλωμα με πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων παράλληλο σε πηνίο 12mH	72
7 - Κατασκευή ηλεκτρονικού κυκλώματος	76
7.1 Περιγραφή της οικογένειας μικροελεγκτών ESP32	77
7.1.1 Περιγραφή του μικροελεγκτή Wemos LOLIN32	77
7.2 Λειτουργία γεννήτριας	79
7.2.1 Περιγραφή της λειτουργίας μετατροπής από ψηφιακό σε αναλογικό σήμα	79
7.2.2 Παραγωγή σήματος μεταβλητής συχνότητας	79
7.3 Λειτουργία παλμογράφου	84
7.3.1 Περιγραφή της λειτουργίας μετατροπής από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα	84
7.3.2 Εμφάνιση σήματος μεταβλητής συχνότητας	84
8 - Επίλογος	86
8.1 Σύνοψη και Συμπεράσματα	86
8.2 Προτάσεις για μελλοντική συνέχιση της μελέτης	88
9 - Βιβλιογραφία	89

Θεωρητικό Μέρος

1 - Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή του SARS-CoV-2

Για περισσότερα από 50 χρόνια οι κορονοϊοί αποτέλεσαν αιτίες ήπιων και μέτριων αναπνευστικών παθήσεων. Ωστόσο, τις τελευταίες δύο δεκαετίες, οι δύο κορονοϊοί που μεταδόθηκαν από ζώα, ο SARS-CoV και ο MERS-CoV, προκάλεσαν σοβαρή πνευμονία και θανάτους σε ανθρώπους [1].

Ο SARS-CoV-2 (severe acute respiratory syndrome coronavirus 2) είναι ο κορονοϊός που προκαλεί το σοβαρό οξύ αναπνευστικό σύνδρομο τύπου 2 και συγκεκριμένα ο ιός που προκαλεί την ασθένεια COVID-19 (Coronavirus disease). Το όνομά του προήλθε επίσημα από τη Διεθνή Επιτροπή Ταξινόμησης Ιών με βάση τη φυλογενετική του ανάλυση. Στα τέλη του 2019, και συγκεκριμένα την 31η Δεκεμβρίου 2019 [2], ο SARS-CoV-2 εμφανίστηκε στην πόλη Wuhan της Κίνας και θεωρείται ότι διέρρευσε από ζωικό κορονοϊό και αργότερα προσάρμοσε την ικανότητα μετάδοσης του από άνθρωπο σε άνθρωπο [3]. Η πιο κοινή συμπτωματολογία των ασθενών της ασθένειας COVID-19 περιλάμβανε τον πυρετό, τη δυσφορία-δύσπνοια, την κούραση αλλά και την απώλεια γεύσης ή όσφρησης και διαγνώστηκε ως ιογενής πνευμονία [1], [4]. Μερικά πιο σπάνια συμπτώματα αποτελούν ο ξηρός βήχας, ο πονόλαιμος, η διάρροια, η επιπεφυκίτιδα, ο πονοκέφαλος ενώ κάποια σοβαρά συμπτώματα του ιού είναι ο πόνος ή η πίεση στο στήθος και η απώλεια ομιλίας ή κίνησης [4]. Αρχικά, η ασθένεια ονομάστηκε πνευμονία Wuhan από τα μέσα μαζικής ενημέρωσης λόγω της περιοχής που εμφανίστηκε και των συμπτωμάτων της πνευμονίας που παρουσίαζε [1], [3].

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης της αλληλουχίας ολόκληρου του γονιδιώματος του ιού έδειξαν ότι πρόκειται για ένα νέο κορονοϊό. Λόγω της μεταδοτικότητας του ιού, υπήρξε

μεγάλη και γρήγορη εξάπλωση, η οποία υφίσταται ακόμα στον ανθρώπινο πληθυσμό [1] [3]. Μετά την έξαρση της λοίμωξης που προκλήθηκε από τον SARS-CoV-2, ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (ΠΟΥ) αποφάσισε να κηρύξει την έξαρσή του ως γεγονός διεθνούς ενδιαφέροντος στις 30 Ιανουαρίου 2020 και ως πανδημία στις 11 Μαρτίου 2020 λόγω της παγκόσμιας εξάπλωσής του, έπειτα από τις πανδημίες του 1918 (H1N1), την ασιατική γρίπη (H2N2) του 1957, τη γρίπη του Χονγκ Κονγκ (H3N2) του 1968 και τη γρίπη (H1N1) του 2009, που προκάλεσαν κατ' εκτίμηση, 50 εκατομμύρια, 1,5 εκατομμύρια, 1 εκατομμύριο και 300.000 θανάτους, αντίστοιχα [1].

Σύμφωνα με τα επίσημα στατιστικά δεδομένα του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας, σε παγκόσμιο επίπεδο οι επιβεβαιωμένες μολύνσεις¹ είναι περίπου 227 εκατομμύρια ενώ οι θάνατοι που προκλήθηκαν από την ασθένεια αυτή είναι περίπου 4.7 εκατομμύρια [4].

Ένα μέτρο περιγραφής της μετάδοσης του ιού είναι ο ρυθμός μετάδοσης R . Συγκεκριμένα ο R_0 δείχνει πόσοι άνθρωποι κατά μέσο όρο θα μολυνθούν από έναν ήδη μολυσμένο άνθρωπο, με την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει πρότερη ανοσία στην κοινωνία. Υπολογίζεται συνήθως με βάσει τους εξής παράγοντες: την διάρκεια της μεταδοτικότητας μετά τη μόλυνση ενός ατόμου, την πιθανότητα μόλυνσης σε κάθε επαφή μεταξύ ενός ατόμου ευπαθούς ομάδας και μολυσματικού ενός ατόμου ή φορέα και τη συχνότητα επαφής.

Ο R_e είναι ο αριθμός των ατόμων που μπορούν να μολυνθούν από ένα άτομο σε οποιαδήποτε συγκεκριμένη στιγμή και αλλάζει καθώς ο πληθυσμός αποκτά όλο και περισσότερη ανοσία, είτε μέσω της απόκτησης ανοσίας μετά τη μόλυνση είτε μέσω του εμβολιασμού, καθώς και όταν πεθαίνουν άνθρωποι. Το R_e μπορεί επίσης να επηρεαστεί από τη συμπεριφορά των ανθρώπων, όπως η κοινωνική απόσταση και διαφέρει από χώρα σε χώρα. Τα R_0 και R_e συχνά συγχέονται ή απλά αναφέρονται ως αριθμός R [5].

Η συμπτωματολογία χρειάζεται κατά μέσο όρο 5-6 μέρες για να εμφανιστεί από την στιγμή της μόλυνσης, ωστόσο μπορεί να χρειαστούν έως και 14 μέρες [6].

¹ Κατά την περίοδο συγγραφής της Διπλωματικής.

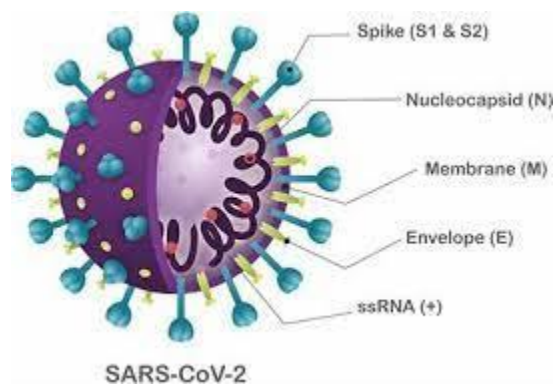
Σύμφωνα με μία έρευνα η οποία δημοσιεύτηκε στην διαδικτυακή εφημερίδα Nature Medicine ένα ποσοστό κοντά στο 20% των κρουσμάτων ήταν ασυμπτωματικοί. Οι άνθρωποι που είναι θετικοί στον ιό αλλά είναι ασυμπτωματικοί δύνανται εξίσου να μεταδώσουν τον ιό σε άλλους ανθρώπους όπως οι συμπτωματικοί. Σύμφωνα με την έρευνα αυτή [7], απεδείχθη ότι το ιικό φορτίο στους ασυμπτωματικούς μειώνεται με πιο αργό ρυθμό από ό,τι στους συμπτωματικούς. Συμπερασματικά, δύο από τους βασικούς λόγους της ραγδαίας εξάπλωσης του SARS-CoV-2 είναι το πλήθος των ημερών για την εμφάνιση των συμπτωμάτων καθώς και οι ασυμπτωματικοί ξενιστές.

1.2 Δομή του SARS-CoV-2

Οι κορονοϊοί είναι τυλιγμένοι, θετικοί μονόκλωνοι μεγάλοι RNA ιοί. Περιγράφηκαν για πρώτη φορά το 1966 από τους Tyrell και Bynoe, οι οποίοι καλλιέργησαν τους ιούς από ασθενείς με κοινό κρυολόγημα. Με βάση τη μορφολογία τους ως σφαιρικά βιρίοντα με κέλυφος πυρήνα και επιφανειακές προεξοχές που μοιάζουν με ηλιακό στέμμα, ονομάστηκαν κοροναϊοί (λατινικά: corona = στέμμα). Υπάρχουν τέσσερις υποοικογένειες και συγκεκριμένα οι κορονοϊοί άλφα, βήτα, γάμμα και δέλτα. Ενώ οι κορονοϊοί άλφα και βήτα προέρχονται από θηλαστικά, ιδίως από νυχτερίδες, οι ιοί γάμμα και δέλτα προέρχονται από χοίρους και πτηνά. Το μέγεθος του γονιδιώματος κυμαίνεται μεταξύ 26 kb και 32 kb². Μεταξύ των επτά υποτύπων των κορωνοϊών που μπορούν να μολύνουν τους ανθρώπους, οι βήτα-κοροναϊοί μπορεί να προκαλέσουν σοβαρές και θανατηφόρες ασθένειες, ενώ οι άλφα-κορονοϊοί προκαλούν ασυμπτωματικές ή ήπιες συμπτωματικές λοιμώξεις. Ο SARS - CoV - 2 ανήκει στην οικογένεια βήτα των κορωνοϊών και σχετίζεται στενά με τον ιό SARS - CoV. Τα τέσσερα κύρια δομικά γονίδια κωδικοποιούν την νουκλεοκαψιδική πρωτεΐνη (N), την ακίδα πρωτεΐνης (S), την πρωτεΐνη μικρής μεμβράνης (SM) και την γλυκοπρωτεΐνη μεμβράνης (M) με επιπρόσθετη την γλυκοπρωτεΐνη μεμβράνης (HE) που εμφανίζεται στους HCoV - OC43 και HKU βήτα

² Το kb είναι μονάδα μέτρησης kilobase. Είναι μέτρο μέτρησης του μήκους της αλυσίδας του DNA και ισούται με 1000 νουκλεοτίδια.

κορονοϊούς. Ο SARS-CoV-2 είναι 96% πανομοιότυπος σε ολόκληρο το γονιδίωμα με τον κορονοϊό νυχτερίδας [8].



Σχήμα 1.1: Η δομή του SARS-CoV-2 [9].

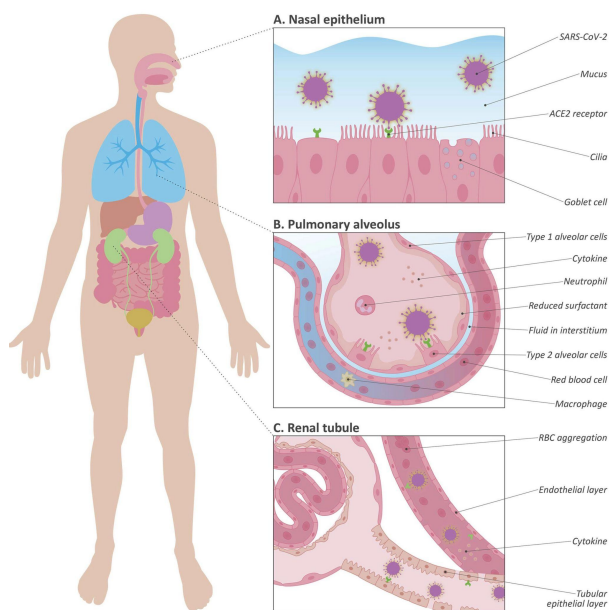
1.2.1 Γλυκοπρωτεΐνη S

Η είσοδος των κορονοϊών στα κύτταρα ξενιστές διαμεσολαβείται από την γλυκοπρωτεΐνη αιχμής (πρωτεΐνη S). Η πρωτεΐνη S αποτελείται από δύο λειτουργικές υπομονάδες, συμπεριλαμβανομένων των υπομονάδων S1 και S2. Η λειτουργία της υπομονάδας S1 συνδέεται με τον υποδοχέα στο κύτταρο ξενιστή. Η υπομονάδα S2 περιέχει το πεπτιδίο σύντηξης. Η λειτουργία της υπομονάδας S2 είναι η συγχώνευση των μεμβρανών των ιών και των κυττάρων ξενιστών. Για όλους τους κορονοϊούς, οι πρωτεάσες ξενιστών διασπούν την γλυκοπρωτεΐνη αιχμής στο σημείο διάσπασης S2 για να ενεργοποιήσουν τις πρωτεΐνες που είναι ζωτικής σημασίας για τη συγχώνευση των μεμβρανών των ιών και των κυττάρων ξενιστών μέσω μη αναστρέψιμων διαμορφωτικών αλλαγών [10].

1.3 Υποδοχέας του SARS-CoV-2

Η μελέτη των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των ιικών γλυκοπρωτεϊνών και των υποδοχέων ξενιστών τους είναι κρίσιμης σημασίας για την καλύτερη κατανόηση της εισόδου του ιού στα κύτταρα. Η νέα είσοδος του κορονοϊού SARS-CoV-2 στα κύτταρα ξενιστές

διαμεσολαβείται από τη γλυκοπρωτεΐνη αιχμής (S-γλυκοπρωτεΐνη) ενώ το ένζυμο μετατροπής αγγειοτενσίνης 2 (στα αγγλικά λέγεται σε σύντμηση ACE2) έχει αναγνωριστεί ως κυτταρικός υποδοχέας [11] αφού παρέχει ιική είσοδο στα ανθρώπινα κύτταρα. Η ιογενής ακίδα (S) πρωτεΐνης του SARS-CoV-2 συνδέεται με το ACE2 ως κυτταρικός υποδοχέας με παρόμοιο τρόπο με τον SARS-CoV-1. Είναι σημαντικό ότι ο SARS-CoV-2 είναι πιο παθογόνος, τουλάχιστον εν μέρει λόγω της 10 έως 20 φορές αυξημένης συγγένειας δέσμευσής του με το ACE2.



Σχήμα 1.2: Η αναλυτική μόλυνση του οργανισμού από τον SARS-CoV-2 και ο ρόλος του υποδοχέα ACE2 σε αυτήν την διαδικασία [13].

Αυτή η δέσμευση οδηγεί στην είσοδο του κυτάρου ξενιστή του ιού σε συνεννόηση με την εκκίνηση S-πρωτεΐνης από την πρωτεάση κυτάρου ξενιστή TMPRSS2 (Transmembrane protease, serine 2). Η είσοδος του SARS-CoV-2 στα κύτταρα και οι παθολογικές επιδράσεις εμφανίζονται κυρίως σε κύτταρα της (ανώτερης) αναπνευστικής οδού καθώς οι υποδοχείς ACE2 είναι άφθονοι στο επιθήλιο του πνεύμονα, συγκεκριμένα τα πνευμονοκύτταρα τύπου II, τα κύπελλα, τα ρινικά επιθηλιακά-τριχοειδή και τα στοματικά βλεννογόνα κύτταρα [12], [13]. Περαιτέρω διάδοση στον ξενιστή, όπως στα νεφρά ή στο γαστρεντερικό σωλήνα, μπορεί να σχετίζεται με την τοπική έκφραση ACE2 στις εν λόγω περιοχές (Σχήμα 1.2) [13].

1.4 Σύγκριση του SARS-CoV-2 με τον αρχικό SARS-CoV

Υπάρχουν πολλές ομοιότητες του SARS-CoV-2 με τον αρχικό SARS-CoV. Έχει διαπιστωθεί ότι οι πρωτεΐνες αιχμής του SARS-CoV-2 και του SARS-CoV έχουν σχεδόν πανομοιότυπες τρισδιάστατες δομές στο πεδίο δέσμευσης υποδοχέα που διατηρεί τις δυνάμεις van der Waals. Η πρωτεΐνη ακμής SARS-CoV έχει ισχυρή συγγένεια σύνδεσης με το ACE2, βασισμένη σε μελέτες βιοχημικής αλληλεπίδρασης και ανάλυση κρυσταλλικής δομής. Οι πρωτεΐνες ακίδων SARS-CoV-2 και SARS-CoV μοιράζονται ταυτότητα 76,5% σε αλληλουχίες αμινοξέων και το σημαντικότερο είναι ότι οι ακτινικές πρωτεΐνες SARS-CoV-2 και SARS-CoV έχουν υψηλό βαθμό ομολογίας [11].

Ωστόσο, υπάρχουν λεπτές διακριτές αλληλεπιδράσεις ACE2 που οδηγούν στη διακύμανση της συγγένειας σύνδεσης μεταξύ SARS-CoV-2 και SARS-CoV προς ACE2. Η συγγένεια μεταξύ ACE2 και SARS-CoV-2 είναι υψηλότερη από τη συγγένεια μεταξύ ACE2 και SARS-CoV [10].

1.5 Σύνδεση της πανδημίας με την ανάγκη για αισθητήρες ανίχνευσης SARS-CoV-2

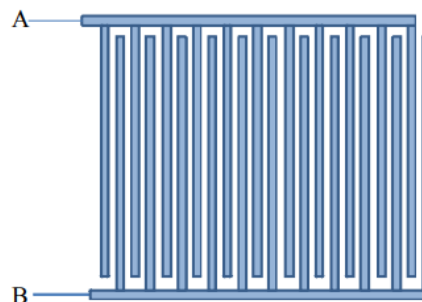
Για την αντιμετώπιση της πανδημίας και μακροπρόθεσμα στην εξάλειψή της είναι αδήριτη η ανάγκη για τον συνεχή εντοπισμό και ανίχνευση των κρουσμάτων που πάσχουν από την ασθένεια COVID-19. Αρωγοί σε αυτήν την προσπάθεια αποτελούν τα τεστ και οι έλεγχοι που γίνονται και συγκεκριμένα με τη μοριακή μέθοδο ανάλυσης PCR, τη μέθοδο ανίχνευσης των αντισωμάτων κατά του ιού και την ανίχνευση του αντιγόνου. Ωστόσο, οι παραπάνω μέθοδοι αφορούν ατομικά τον κάθε άνθρωπο και όχι έναν ευρύτερο χώρο (όπως ένα αμφιθέατρο ενός Πανεπιστημίου ή ένας χώρος πολιτισμού) στον οποίο συχνάζουν αρκετά άτομα και είναι σημαντική η ανίχνευση SARS-CoV-2 ειδικά εάν βρίσκεται σε ποσότητα ικανή να μολύνει μαζικά πλήθος ανθρώπων. Επικουρικά, εκτός από τους μηχανισμούς απολύμανσης που βρίσκονται σε αρκετούς

εξαερισμούς μερικών χώρων, χρήσιμοι θα ήταν και αισθητήρες μέτρησης και ανίχνευσης ποσότητας SARS-CoV-2 με σκοπό την έγκαιρη ενημέρωση για το αν ο χώρος είναι προς το παρόν επικίνδυνος και πρέπει να εκκενωθεί μέχρι να απολυμανθεί. Οι αισθητήρες αυτοί θα αποτελούνται από συγκεκριμένα ηλεκτρονικά κυκλώματα, με τα οποία θα επιτυγχάνεται τόσο η ανάγνωση του αέρα και τυχόν σταγονιδίων αλλά και θα δίνεται σαν έξοδος το κατάλληλο μήνυμα εάν η ποσότητα που μετράται αποτελείται από σωματίδια SARS-CoV-2. Στη συνέχεια θα γίνει απόπειρα περιγραφής - κατασκευής ενός αισθητήρα ο οποίος βασίζεται πάνω στη δομή και τις ιδιότητες του πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων, ένας πυκνωτής πάνω στον οποίο έχουν γίνει πολλές μελέτες και έρευνες καθώς συνιστά μεγάλο ενδιαφέρον για βιοχημική ανάλυση υλικών.

2 - Πυκνωτές ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων

2.1 Δομή πυκνωτών ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων

Οι πυκνωτές ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων αποτελούνται από μία ομοεπίπεδη διάταξη στην οποία N αγωγίμες πλάκες (ή ηλεκτρόδια), τα λεγόμενα δόντια ή κτένια μήκους L και πάχους w (Σχήμα 2.1, Σχήμα 2.2), είναι μεταξύ τους παράλληλα και ενδοδιαπλεκόμενα, σε περιοδικό πρότυπο, σε μία απόσταση d μεταξύ τους, και ανάμεσα τους υπάρχει διηλεκτρικό υλικό με σχετική διηλεκτρική σταθερά ϵ_r όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1.



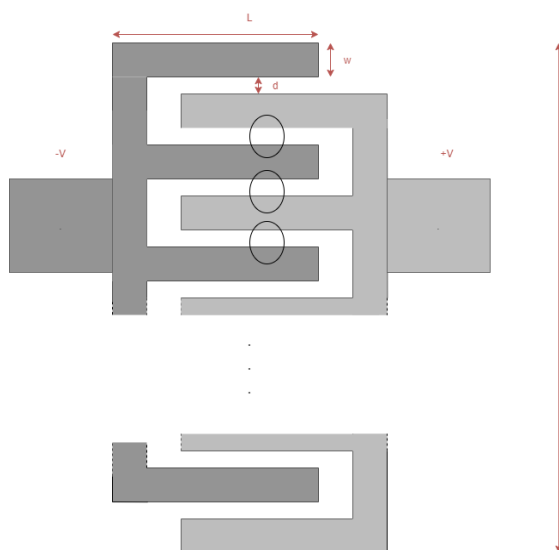
Σχήμα 2.1: Η δομή ενός πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων. Τα “A” και “B” είναι οι αγωγίμες επαφές στα δύο ενδοδιαπλεκόμενα ηλεκτρόδια [15].

Ο πυκνωτής αυτός, έχει δύο αγώγιμες πλάκες στις οποίες κάθε δόντι του συνδέεται, ανά ένα, αγώγιμα με τις πλάκες αυτές όπως δείχνει και το Σχήμα 2.1.

Συνεπώς, έχει δύο αγώγιμες επαφές με τις οποίες συνδέονται τα κτένια, τα οποία δημιουργούν την χωρητικότητα που σχετίζεται με τα ηλεκτρικά πεδία τα οποία διεισδύουν στο δείγμα του υλικού ή σε κάποια ευαίσθητη επίστρωση που έχει τοποθετηθεί [14], [15], [16]. Οι επαφές (ή πλάκες) συνδέονται μέσω μιας μεταλλικής προέκτασης με όργανα μέτρησης της χωρητικότητας.

Τυπικοί αισθητήρες χωρητικότητας τέτοιου τύπου κατασκευάζονται σε αδρανές υπόστρωμα, πάνω στο οποίο σχηματίζονται τα δύο ηλεκτρόδια [17].

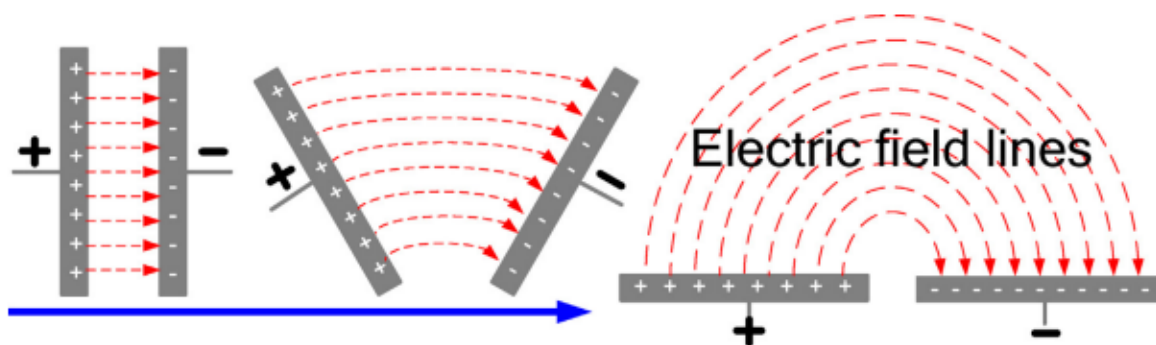
Οι αγώγιμες επαφές συνήθως κατασκευάζονται από χαλκό, αλουμίνιο [18] ή από χρυσό [19].



Σχήμα 2.2: Ο πυκνωτής ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων με αναλυτικές διαστάσεις σχεδιασμένος στο λογισμικό για διαγράμματα Draw.io - Diagrams.net.

2.2 Σύνδεση του πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων με τον πυκνωτή παραλλήλων πλακών

Η λειτουργία του πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων είναι παρόμοια με αυτήν του πυκνωτή παραλλήλων πλακών ή του ομοαξονικού κυλινδρικού πυκνωτή. Στο Σχήμα 2.3 παρατηρείται η μετάβαση από τον πυκνωτή παραλλήλων πλακών (ο οποίος έχει δύο επίπεδα) σε πυκνωτή - χτένι (ένα επίπεδο). Η μετάβαση αυτή επιτυγχάνεται με το άνοιγμα των ηλεκτροδίων του πυκνωτή παραλλήλου πλακών ώστε να σχηματιστεί ο πυκνωτής ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων [14] [16].

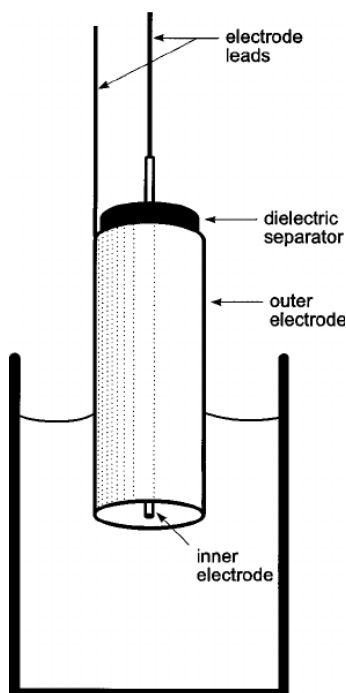


Σχήμα 2.3: Μετάβαση από τον πυκνωτή παραλλήλων πλακών σε πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων [14].

Εφαρμόζοντας διαφορά δυναμικού (τάση) ανάμεσα στο ζεύγος των ηλεκτροδίων, παράγεται ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των θετικών και αρνητικών ακροδεκτών και έτσι μπορεί να μετρηθεί η αντίσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων. Το πεδίο αυτό διαπερνά το υλικό που έρχεται σε επαφή με τα ηλεκτρόδια. Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου είναι διαφορετική σε έναν ομοεπίπεδο ή σε έναν κυλινδρικό πυκνωτή και διαφορετική σε έναν πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων [14], [16].

Τόσο το πλήθος των δοντιών, όσο και η γεωμετρία και η διηλεκτρική συμπεριφορά του υλικού που είναι ανάμεσα στα δόντια επηρεάζουν την χωρητικότητα ανάμεσα στα ηλεκτρόδια και την αγωγιμότητα του πυκνωτή. Η χωρητικότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων και του τοιχώματος επηρεάζεται από τη διηλεκτρική σταθερά του υλικού [14], [16].

Αναλυτικότερες πληροφορίες για την χωρητικότητα του πυκνωτή θα δοθούν παρακάτω.



Σχήμα 2.4: Σχηματική αναπαράσταση ενός ομοαξονικού κυλινδρικού πυκνωτή [20].

2.3 Εφαρμογές του πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων

Οι τεχνολογικές εφαρμογές των πυκνωτών ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων έχουν μελετηθεί από πολλούς συγγραφείς από τις αρχές του 1970 [19]. Λόγω της δομής του συγκεκριμένου πυκνωτή, οι εφαρμογές που κάνουν χρήση αυτού πληθαίνουν σε μετρητές καταπόνησης, επιθεώρηση τροφίμων, βιοαισθητήρες, μέτρηση περιεκτικότητας υγρασίας σκυροδέματος, ολοκληρωμένα κυκλώματα μικροκυμάτων, συσκευές οπτικών και επιφανειακών ακουστικών κυμάτων, οπτικά ελεγχόμενες συσκευές μικροκυμάτων, σε ακουστικούς-ηλεκτρονικούς μετατροπείς, σε διηλεκτρικές μελέτες πάνω σε λεπτό υμένιο [14], [19]. Πρόσφατα, έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες με πυκνωτές ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων για αισθητήρες υγρασίας αλλά και για χημικούς αισθητήρες [19], [21]. Συγκεκριμένα στους χημικούς αισθητήρες υπάρχει έντονη προτίμηση καθώς στις δομές των αλληλοεπικαλυπτόμενων κτενιών η διαμόρφωση των ηλεκτροδίων είναι επίπεδη και τα ηλεκτρόδια δεν εμποδίζουν τη διάχυση των αναλυτών

με αποτέλεσμα τη γρήγορη απόκριση της διάταξης [17]. Λόγω του ότι ένας αισθητήρας που αποτελείται από πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων, δηλαδή ένας ενδοδιαπλεκόμενος αισθητήρας είναι μία ηλεκτροχημική συσκευή που μπορεί να ανιχνεύσει την αγωγιμότητα, θερμοκρασία και διηλεκτρικές ιδιότητες ενός δείγματος οι εφαρμογές πληθαίνουν και προς αυτήν την κατεύθυνση [22].

Ένα υποσύνολο εφαρμογών αισθητήρων με πυκνωτές ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων είναι και η Ενδοδιαπλεκόμενη Διηλεκτρομετρία που βασίζεται σε απευθείας μέτρηση των διηλεκτρικών ιδιοτήτων των δειγμάτων-υλικών με πρόσβαση από την μία πλευρά (θα αναλυθεί στην ενότητα 2.4). Σε αυτές τις εφαρμογές, με εφαρμογή περιοδικού ηλεκτρικού δυναμικού στην επιφάνεια του υλικού, ο συνδυασμός των σημάτων που παράγονται (έξοδος) από τη διακύμανση της χρονικής περιόδου των ηλεκτροδίων - κτενιών σε συνδυασμό με τη διακύμανση της συχνότητας ηλεκτρικής διέγερσης δίνουν ενδελεχείς πληροφορίες σχετικά με τη διηλεκτρική φασματοσκοπία του δοκιμαστικού υλικού. Οι αλλαγές στην διηλεκτρική συμπεριφορά του υλικού προέρχονται από τις διάφορες φυσικές, χημικές ή δομικές αλλαγές στο ίδιο το δοκιμαστικό υλικό. Έτσι, αυτές οι αλλαγές δύνανται έμμεσα να μετρηθούν και μέσω αυτών να προκύψει αξιολόγηση ζωτικών παραμέτρων μέσα σε ένα εύρος βιομηχανικών και επιστημονικών εφαρμογών [23].

2.4 Πλεονεκτήματα του πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων

Μερικά από τα πλεονεκτήματα των πυκνωτών της συγκεκριμένης ομοεπίπεδης γεωμετρίας είναι η δυνατότητα πρόσβασης από ένα σημείο (και όχι από δύο όπως για παράδειγμα ο πυκνωτής παράλληλων πλακών) στο υλικό-δείγμα. Αυτό είναι πολύ σημαντικό για τους αισθητήρες μη καταστροφικής δοκιμής και τους πιεζοακουστικούς μετατροπείς. Έτσι δύνανται να γίνει διεϊσδυση στο δείγμα με ηλεκτρικά, μαγνητικά ή ακουστικά πεδία από τη μία πλευρά του δείγματος αφήνοντας την άλλη πλευρά εκτεθειμένη στον περιβάλλοντα χώρο, επιτρέποντας απορρόφηση αερίων, υγρασίας ή χημικών, τα οποία αλλάζουν τις διηλεκτρικές ιδιότητες του δείγματος. Η συγκεκριμένη δυνατότητα θα φανεί αρκετά χρήσιμη στην πορεία. Ένα μικρό στρώμα χημικού ή

βιολογικού υλικού που εναποτίθεται πάνω στα ηλεκτρόδια μπορεί να αλληλεπιδράσει με αέριο ή υγρό περιβάλλον, δίνοντας την δυνατότητα για παρακολούθηση της συγκέντρωσης του υλικού σε υλικά όπως ο αέρας ή το ανθρώπινο σώμα. Σε κάποιες περιπτώσεις η άλλη άκρη του δείγματος μπορεί να είναι δύσκολα προσβάσιμη εξαιτίας των ηλεκτροδίων καθιστώντας χρήσιμη την πρόσβαση από την μία πλευρά [16].

Ένα ακόμα πλεονέκτημα της ενδοδιαπλεκόμενης γεωμετρίας είναι η δυνατότητα αλλαγής της επιφάνειας, του εμβαδού, του πυκνωτή, μέσω της αλλαγής του πλήθους των κτενιών καθώς και της μεταξύ τους απόστασης. Να σημειωθεί εδώ ότι υφίσταται μία ανταλλαγή-θυσία μεταξύ του σηματοθορυβικού λόγου και του ελάχιστου εμβαδού του δυναμικού αισθητήρα που αποτελείται από πυκνωτή - χτένι για την εκάστοτε εφαρμογή. Σε κάποιες εφαρμογές, για παράδειγμα στους αισθητήρες μικροτσιπ, το εμβαδόν της περιοχής δεν είναι τόσο σημαντικό σε αντίθεση με τις συσκευές απεικόνισης στις οποίες διαδραματίζει σημαντικό ρόλο [16].

Οι πυκνωτές ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων έχουν αποδειχθεί χρήσιμοι επίσης λόγω της απλότητας της κατασκευής τους, τον σχετικά υψηλό συντελεστή ποιότητας Q και την επαναληψιμότητά τους εν αντιθέσει με τους συμβατικούς πυκνωτές που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Λόγω της δυνατότητας αυξομείωσης (και κυρίως μείωσης) του εμβαδού οι αισθητήρες που κάνουν χρήση αυτών των πυκνωτών έχουν εύκολη προσαρμογή αναλόγως το εύρος της εφαρμογής, έχουν υψηλότερη απόδοση, μικρότερες απώλειες, μικρότερη κατανάλωση ισχύος, μικρότερο κόστος και δύνανται να χρησιμοποιηθούν σε ακραίες συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος (υψηλής θερμοκρασίας ή χημικής διάβρωσης) [14], [23], [24].

2.5 Βασική σχέση χωρητικότητας πυκνωτών

Ένα από τα χαρακτηριστικά που είναι χρήσιμο να μετρηθεί και δύνανται να δώσει πολλές και χρήσιμες πληροφορίες κατά την κατασκευή ενός αισθητήρα που αποτελείται από πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων είναι η χωρητικότητα του πυκνωτή.

Ο γενικός τύπος της χωρητικότητας ενός πυκνωτή είναι ο εξής:

$$C = \frac{q}{V} \quad (2-1)$$

Όπου:

- q είναι το μέγεθος του φορτίου με το οποίο είναι φορτισμένη η κάθε πλάκα του πυκνωτή μετρούμενο σε C (Coulomb) και
- V είναι η θετική διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο πλακών μετρούμενη σε V (Volts).

Η τιμή της χωρητικότητας εξαρτάται από το σχήμα των πλακών αλλά και την απόσταση μεταξύ τους. Εκτός αυτού, εξαρτάται και από το μέσο του υλικού με το οποίο έχουν επικαλυφθεί οι πλάκες λόγω της διαφορετικής διηλεκτρικής σταθεράς του υλικού, όπως θα φανεί και παρακάτω [25].

Η μονάδα μέτρησης της χωρητικότητας στο SI είναι το $1 \text{ Farad} = 1 \frac{\text{Coulomb}}{\text{Volt}}$ και σε συντόμηση χρησιμοποιείται το κεφαλαίο γράμμα F. Δεδομένου ότι η χωρητικότητα της τάξης των F, είναι πολύ μεγάλη, για πρακτικούς λόγους χρησιμοποιούνται συνήθως οι τάξεις μεγέθους [25]:

- $1 \text{ picofarad (pF)} = 10^{-12} F$
- $1 \text{ nanofarad (nF)} = 10^{-9} F$
- $1 \text{ microfarad (}\mu F) = 10^{-6} F$

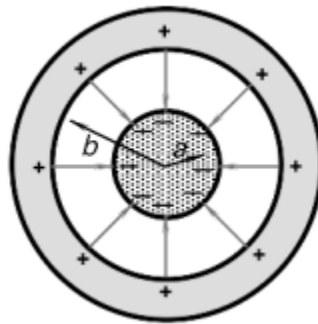
Δεδομένου ότι υπάρχουν διάφορα είδη πυκνωτών, για κάθε ένα είδος υπάρχει και διαφορετικός τύπος για την χωρητικότητα [25].

Για παράδειγμα, για έναν κυλινδρικό πυκνωτή, όπου αποτελείται από δύο ομοαξονικούς κυλίνδρους ακτίνας a και b (όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.5) και μήκους l ισχύει η εξής σχέση για την χωρητικότητά του:

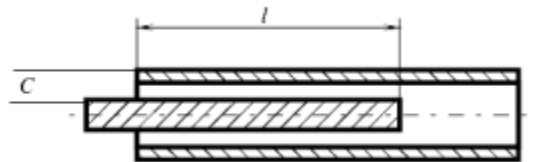
$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln\frac{b}{a}} \quad (2-2)$$

Όπου:

- l είναι το μήκος των επικαλυπτόμενων αγωγών μετρούμενο σε m (μέτρα) (Σχήμα 2.6).
- $\frac{2\pi l}{\ln\frac{b}{a}}$ είναι ο γεωμετρικός παράγοντας για τον κυλινδρικό ομοαξονικό πυκνωτή μετρούμενος σε m (μέτρα).



Σχήμα 2.5 : Ένας κυλινδρικός πυκνωτής [25].



Σχήμα 2.6: Εγκάρσια τομή ενός κυλινδρικού πυκνωτή, όπου l είναι το μήκος των επικαλυπτόμενων αγωγών [25].

Για έναν πυκνωτή παραλλήλων πλακών η γενική σχέση είναι η εξής:

$$C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \quad (2-3)$$

Όπου:

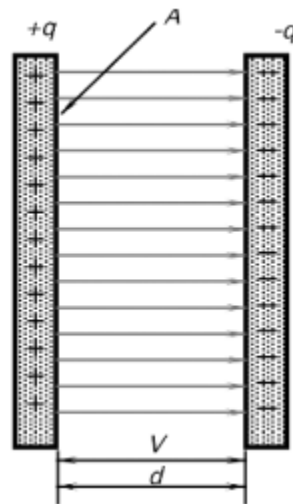
- C είναι η χωρητικότητα του πυκνωτή μετρημένη σε Φαράντ (Farad).

³ Η σχέση αυτή προϋποθέτει πως $l \gg b$, δηλαδή αγνοώντας το φαινόμενο άκρων [25].

- A είναι το εμβαδόν της περιοχής αλληλοκάλυψης μεταξύ των δύο οπλισμών του πυκνωτή και μετράται σε m^2 (τετραγωνικά μέτρα).
- ϵ_0 είναι η διαπερατότητα του κενού, με τιμή $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$.
- d είναι η απόσταση μεταξύ των οπλισμών και μετράται σε m (μέτρα) όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.7 παρακάτω.

Ο λόγος $\frac{A}{d}$ ονομάζεται γεωμετρικός παράγοντας για έναν πυκνωτή παραλλήλων πλακών.

Το 1837, ο Michael Faraday ανακάλυψε το φαινόμενο της πλήρους επικάλυψης του χώρου μεταξύ των δύο πλακών, με ένα διηλεκτρικό υλικό. Με την επικάλυψη αυτή, παρατήρησε ότι αυξανόταν η χωρητικότητα του πυκνωτή κατά έναν παράγοντα κ , γνωστός και ως διηλεκτρική σταθερά του υλικού.



Σχήμα 2.7 : Ένας πυκνωτής παραλλήλων πλακών [25].

Άρα είναι προφανές, ότι αλλαγή στην χωρητικότητα μπορεί να προκύψει ρυθμίζοντας την απόσταση μεταξύ των δύο πλακών-ακροδεκτών, αλλάζοντας την επικαλυπτόμενη περιοχή μεταξύ των δύο πλακών-ακροδεκτών και τροποποιώντας τη διηλεκτρική διαπερατότητα μεταξύ των πλακών δηλαδή του υλικού [26]. Επίσης, αλλάζοντας το σχήμα των πλακών αλλάζει και η χωρητικότητα [25].

Συγκεκριμένα, η αύξηση της χωρητικότητας εξαιτίας της παρουσίας διηλεκτρικού υλικού οφείλεται στην πόλωση των μορίων του υλικού. Σε μερικά διηλεκτρικά όπως το νερό, τα μόρια τους έχουν μόνιμη διπολική ροπή, ενώ σε άλλα, τα μόρια λαμβάνουν διπολική ροπή μόνο όταν εφαρμοστεί σε αυτά εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο. Η πόλωση αυτή ονομάζεται επαγόμενη πόλωση. Και στις δύο περιπτώσεις, όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο στις πλάκες ενός πυκνωτή, τα μόρια του υλικού τείνουν να προσανατολιστούν προς συγκεκριμένη κατεύθυνση και μάλιστα αυτή των γραμμών του ηλεκτρικού πεδίου, δηλαδή τα αρνητικά φορτία του υλικού θα προσανατολιστούν προς το θετικό ηλεκτρόδιο και τα θετικά φορτία προς το αρνητικό ηλεκτρόδιο. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται διηλεκτρική πόλωση [25], [27]. Να σημειωθεί ότι δεν μπορεί να επιτευχθεί πλήρης προσανατολισμός, εξαιτίας κάποιων θερμικών φαινομένων, όπως η συνεχόμενη και τυχαία κίνηση μορίων ή μικρών σωματιδίων που σχετίζονται με την ζέση [28].

Επομένως, λαμβάνοντας υπόψιν και την διηλεκτρική σταθερά του υλικού, η οποία συμβολίζεται με “κ” εδώ, προκύπτουν οι νέες και ολοκληρωμένες σχέσεις της χωρητικότητας ως εξής:

$$C = \kappa \cdot \frac{q}{V_0} = \kappa \cdot C_0 \quad (2-4)$$

ο γενικός τύπος της χωρητικότητας και

$$C = \kappa \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \quad (2-5)$$

ο τύπος της χωρητικότητας για τον πυκνωτή παραλλήλων πλακών.

Ενας ακόμα πιο γενικός τύπος, όπου δεν περιορίζεται στη δομή του πυκνωτή είναι ο εξής:

$$C = \kappa \cdot \varepsilon_0 \cdot G \quad (2-6)$$

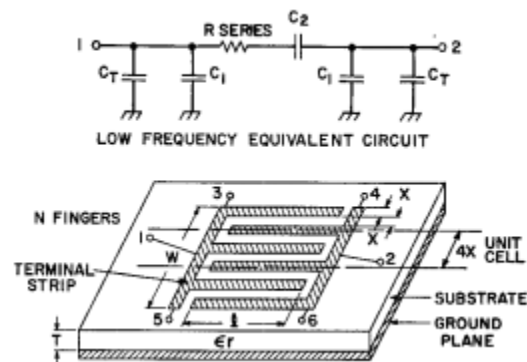
όπου το G είναι ένας γεωμετρικός παράγοντας όπου εξαρτάται από το σχήμα του πυκνωτή και των πλακών, και την απόσταση τους [25].

2.5.1 Υπολογισμός χωρητικότητας πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων

Παρότι η λειτουργία του πυκνωτή των ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων είναι παρόμοια με αυτή του πυκνωτή παραλλήλων πλακών [14] ή του κυλινδρικού πυκνωτή, η χωρητικότητα δεν υπακούει τους ίδιους μαθηματικούς τύπους αλλά σε πιο σύνθετους καθώς φυσικοί παράμετροι όπως το πλήθος των δοντιών (N), το πάχος των δοντιών (W), η απόσταση μεταξύ των δοντιών (d) (Σχήμα 2.2), η διηλεκτρική σταθερά του υλικού που εναποτίθεται πάνω στην επιφάνεια του πυκνωτή, την επηρεάζουν και συμβάλλουν σημαντικά στην μεταβολή της. Συγκεκριμένα, παρακάτω θα συμπεριληφθεί στον μαθηματικό τύπο ο λόγος μεταξύ της απόστασης μεταξύ των δοντιών και του μήκους των δοντιών και ο λόγος μεταξύ του πάχους του υλικού που εναποτίθεται στην επιφάνεια του πυκνωτή και το μήκος κύματος του αισθητήρα. Εκτός αυτού, ανάλογα και με το είδος της εφαρμογής που θα χρησιμοποιήσει έναν τέτοιο πυκνωτή, αλλάζουν οι παραπάνω παράμετροι ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή - ιδανική χωρητικότητα του για την συγκεκριμένη εφαρμογή [19]. Θα συμπεριληφθεί επίσης η χωρητικότητα που οφείλεται στο φαινόμενο των άκρων δηλαδή η χωρητικότητα μεταξύ του έκαστου δοντιού με το τοίχωμα, πέρα από την επικαλυπτόμενη περιοχή μεταξύ ηλεκτροδίων.

Στην αρχή, και συγκεκριμένα γύρω στις αρχές του 70 [29], ένα πρώιμο μοντέλο πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων είχε προταθεί από τον Alley το οποίο μπορεί να προβλέψει τιμές χωρητικότητας με ίσο πλήθος δοντιών και πλάτους διάκενου μεταξύ των δοντιών και με άπειρο στρώμα αέρα στην επιφάνειά του. Αυτό το μοντέλο βρίσκεται ακόμα σε χρήση, δεδομένου ότι οι πειραματικές τιμές συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό με την προτεινόμενη μέθοδο υπολογισμού της χωρητικότητας. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 2.8) στο ισοδύναμο κύκλωμα του πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων, η κύρια χωρητικότητα βρίσκεται σε σειρά με μία

αντίσταση, συνδεσμολογία η οποία θα εξηγήσει στην πορεία πολλές από τις πειραματικές μετρήσεις που ελήφθησαν.

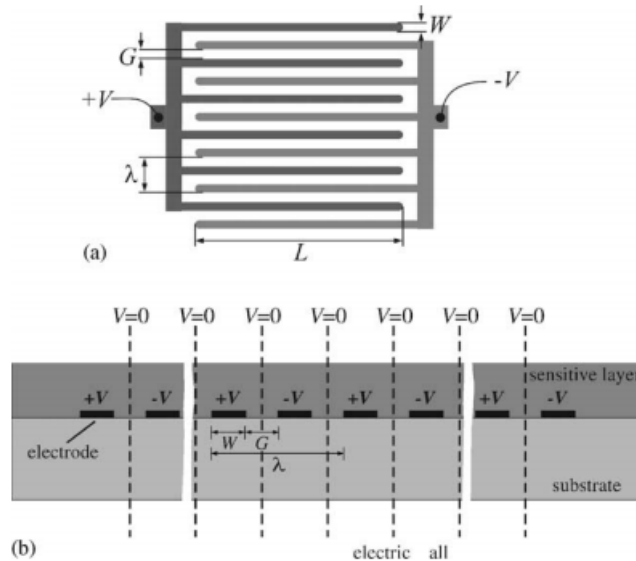


Σχήμα 2.8: Ο πυκνωτής ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων και το ισοδύναμο κύκλωμά του [29].

Στη συνέχεια, προτάθηκαν αρκετά μοντέλα για τον υπολογισμό της χωρητικότητας πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων, ωστόσο όλα προϋποθέτουν ότι το υλικό έχει άπειρο στρώμα στην επιφάνεια του πυκνωτή, και δεν μπορούσαν να προβλέψουν την χωρητικότητα για πεπερασμένο στρώμα ή δομή πολλαπλών στρωμάτων πάνω από τα ηλεκτρόδια [19].

Πλέον, ο υπολογισμός της χωρητικότητας μπορεί να γίνει μέσω ειδικών μετασχηματισμών και μέσω του υπολογισμού της μερικής χωρητικότητας για πυκνωτές ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων με N επίπεδα υποστρωμάτων, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις χωρητικότητες μεταξύ των δοντιών όσο και τις χωρητικότητες που οφείλονται στο φαινόμενο άκρων μεταξύ των δοντιών και των τοιχωμάτων. Με την βοήθεια αυτού του μοντέλου, οι θεωρητικοί υπολογισμοί είναι πολύ κοντά στους πειραματικούς και μάλιστα μπορούν να προσαρμοστούν τόσο για άπειρο στρώμα πάνω στην επιφάνεια όσο και για πεπερασμένο. Συγκεκριμένα, το μοντέλο για άπειρο στρώμα μπορεί να υπολογιστεί μέσω του γενικού μοντέλου του πεπερασμένου θεωρώντας ότι το ύψος του στρώματός του πλησιάζει το άπειρο. Να σημειωθεί ότι οι υπολογισμοί αυτοί αφορούν πυκνωτές που έχουν παραχθεί σε αδρανές υπόστρωμα [19].

Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 2.9) η επίπεδη διάταξη του πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων με δύο ηλεκτρόδια καθώς και ένα σχηματικό διάγραμμα εγκάρσιας τομής του πυκνωτή.



Σχήμα 2.9: a) Η διάταξη επιπέδου του πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων με 6 δόντια b) σχηματικό διάγραμμα εγκάρσιας τομής του πυκνωτή [19].

Το κενό μεταξύ των δοντιών έχει πλάτος G ενώ τα δόντια έχουν πλάτος W και μήκος L . Κάθε ένα εκ των δύο ηλεκτροδίων συνδέεται σε δυναμικό (θετικό και αρνητικό αντίστοιχα). Τα ηλεκτρόδια εναποτίθενται σε στρώμα που το πάχος του είναι μεγαλύτερο από το χωρικό μήκος κύματος του αισθητήρα:

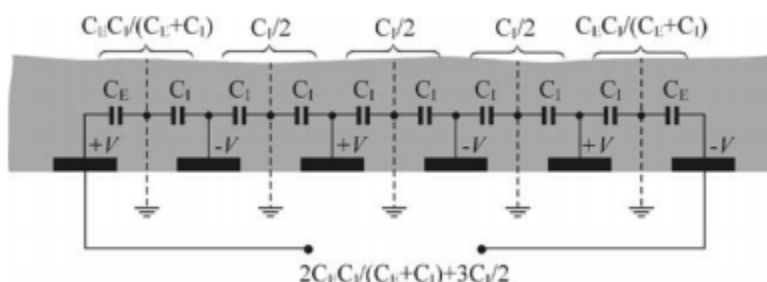
$$\lambda = 2 \cdot (W + G) \quad (2-7)$$

σαν ένα κβαντισμένο εμβαδόν. Στα ηλεκτρόδια εναποτίθεται ένα ευαίσθητο στρώμα και η χωρητικότητα του πυκνωτή αλλάζει μόνο εάν αλλάξουν οι χωρητικές ιδιότητες αυτού του στρώματος ή το πάχος του. Στον υπολογισμό του μοντέλου εισάγεται και ο λόγος μεταλλοποίησης ο οποίος είναι αδιάστατος και ισούται με:

$$\eta = \frac{W}{W+G} \quad (2-8)$$

Σε σχέση με το πεπερασμένο μήκος των ηλεκτροδίων, αυτά θεωρούνται πολύ μεγαλύτερα από το μήκος κύματος ή έτσι ώστε για πρακτικούς σκοπούς να μπορούν να θεωρηθούν άπειρα [19].

Λόγω συμμετρίας, η χωρητικότητα ενός ημι-άπειρου στρώματος υπολογίζεται σαν συνάρτηση 2 ειδών χωρητικότητων. Την C_I , η οποία είναι η μισή της χωρητικότητας ενός εσωτερικού ηλεκτροδίου και της γείωσης και την C_E , η οποία είναι η χωρητικότητα του εξωτερικού ηλεκτροδίου και της γείωσης όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 2.10) [19].



Σχήμα 2.10: Ισοδύναμο κύκλωμα για υπολογισμό της στατικής χωρητικότητας ενός ημι-άπειρου στρώματος στην επιφάνεια ενός περιοδικού αισθητήρα με πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων με 6 ηλεκτρόδια [19].

Η συνολική χωρητικότητα μεταξύ του αρνητικού και του θετικού ηλεκτροδίου ενός ημιάπειρου υλικού ισούται με:

$$C = (N - 3) \cdot \frac{C_I}{2} + 2 \cdot \frac{C_I \cdot C_E}{C_I + C_E}, N > 3 \quad (2-9)$$

Για $N=2$ ή 3 ο υπολογισμός είναι πολύ απλός. Το ενδιαφέρον βρίσκεται στο μεγάλο πλήθος δοντιών καθώς εκεί είναι πιο περίπλοκος ο τύπος προσδιορισμού της χωρητικότητας. Ο τύπος που προηγήθηκε αφορά τη μισή δομή του πυκνωτή και συγκεκριμένα την πάνω. Η κάτω μισή υπολογίζεται με ακριβώς ίδιο τρόπο και η

συνολική χωρητικότητα του πυκνωτή είναι το άθροισμα των δύο αυτών ίδιων χωρητικοτήτων.

Οι υπολογισμοί της εσωτερικής χωρητικότητας C_I αλλά και της εξωτερικής C_E επιτυγχάνονται με την βοήθεια τεχνικών χαρτογράφησης, και φαίνεται ότι οι χωρητικότητες αυτές είναι συνάρτηση του λόγου μεταλλοποίησης η που αναφέρθηκε νωρίτερα, ενός αδιάστατου μεγέθους r το οποίο ισούται με:

$$r = \frac{h}{\lambda} \quad (2-10)$$

όπου h είναι το πάχος του διηλεκτρικού υλικού που εναποτίθεται στην επιφάνεια του πυκνωτή και λ είναι το κβαντισμένο εμβαδόν όπως αναφέρθηκε και υπολογίστηκε νωρίτερα, της διηλεκτρικής σταθεράς του υλικού ϵ_r και το μήκος του δοντιού L . Εν τέλει, μπορεί να διεξαχθεί το συμπέρασμα ότι οι χωρητικότητες αυτές δεν εξαρτώνται από τις απόλυτες διαστάσεις του αισθητήρα αφού τα μεγέθη η και r είναι αδιάστατα [19].

3 - Κυκλώματα μέτρησης χωρητικότητας

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν μερικοί ενδεικτικοί τρόποι για μέτρηση της χωρητικότητας με την βοήθεια κάποιων κυκλωμάτων και κάποιων γνωστών μεθόδων. Μερικά από τα κυκλώματα για μέτρηση χωρητικότητας περιλαμβάνουν: την χρήση του ταλαντωτή 555, την σταθερά χρόνου φόρτισης και εκφόρτισης του πυκνωτή, την χρήση συγκριτή και την μέθοδο συντονισμού.

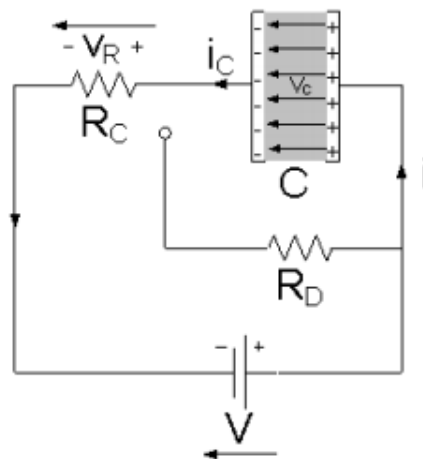
3.1 Κυκλώματα μέτρησης χωρητικότητας με την σταθερά χρόνου

Ενας τρόπος μέτρησης της χωρητικότητας είναι με την μέτρηση του χρόνου εκφόρτισης του πυκνωτή που βρίσκεται στον αισθητήρα. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στην αρχή ότι

ο χρόνος εκφόρτισης ενός πυκνωτή είναι αναλογικός (γραμμικώς εξαρτημένος) από την μετρούμενη χωρητικότητα ανάμεσα στα ηλεκτρόδια.

3.1.1 Φόρτιση και Εκφόρτιση Πυκνωτή

Όταν ένας πυκνωτής τροφοδοτείται από μία DC πηγή τάσης, παρατηρούνται τα φαινόμενα της φόρτισης και της εκφόρτισης του πυκνωτή. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1, ο πυκνωτής συνδέεται με DC πηγή με αποτέλεσμα τη διέλευση ρεύματος σε όλο το κύκλωμα συμπεριλαμβανομένου και του πυκνωτή. Στις πλάκες δημιουργείται μία διαφορά δυναμικού (ίσα και αντίθετα φορτία) και όσο φορτίζει ο πυκνωτής τόσο αυξάνεται αυτή η διαφορά δυναμικού V_c . Όταν η V_c γίνει ίση με την τάση τροφοδοσίας του κυκλώματος, δηλαδή V , τότε ο πυκνωτής έχει φορτιστεί πλήρως και παύει να διέρχεται ρεύμα στο κύκλωμα. Με λίγα λόγια, ένας φορτισμένος πυκνωτής λειτουργεί σαν ανοιχτοκύκλωμα εφόσον δεν επιτρέπει τη διέλευση ρεύματος μέσα από αυτόν [25], [30].



Σχήμα 3.1: Ο πυκνωτής φορτίζει μέσω της αντίστασης R_c [30].

Όταν αποσυνδεθεί η τάση τροφοδοσίας από το κύκλωμα, αρχίζει η εκφόρτιση του πυκνωτή, η οποία πραγματοποιείται μέσω της αντίστασης R_D όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.2, ώσπου η τάση μεταξύ των πλακών του πυκνωτή V_c σταδιακά να μηδενιστεί.

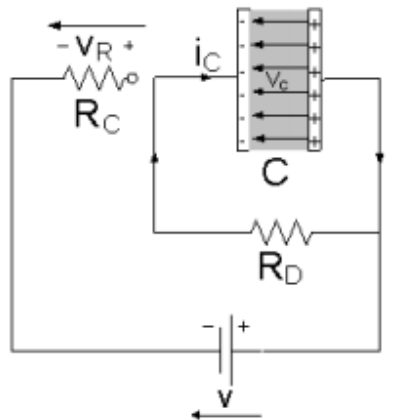
Ο ρυθμός φόρτισης και εκφόρτισης του πυκνωτή περιγράφεται μαθηματικά με την βοήθεια της σταθεράς χρόνου τ . Για την φόρτιση ισχύει ο τύπος:

$$\tau = R_C \times C \quad (3-1)$$

και για την εκφόρτιση αντίστοιχα ο τύπος:

$$\tau = R_D \times C \quad (3-2)$$

Όσο μικρότερη είναι η αντίσταση ή η χωρητικότητα τόσο μικρότερη είναι η σταθερά χρόνου και αντίστροφα [30].



Σχήμα 3.2: Ο πυκνωτής εκφορτίζει μέσω της αντίστασης R_D [30].

Συνεπώς, παρατηρείται ότι η σχέση μεταξύ της χωρητικότητας ενός πυκνωτή και της σταθεράς χρόνου είναι γραμμική, με αποτέλεσμα να είναι εύκολος ο προσδιορισμός της χωρητικότητας. Η μέτρηση δύναται να γίνει με τη βοήθεια κυκλώματος που περιέχει και μικροελεγκτές εκτός από παθητικά στοιχεία.

3.1.2 Υπολογισμός χωρητικότητας με την σταθερά χρόνου

Σύμφωνα με μία έρευνα των K. Chetpattananondha, T. Tapoanoi, P. Phukpattaranont, N. Jindapetch, η οποία χρηματοδοτήθηκε από το Εθνικό Ερευνητικό Συμβούλιο της Ταϊλάνδης (NRCT) και τον τομέα Μηχανικής Prince του Πανεπιστημίου Σονγκλα το οικονομικό έτος 2010 [14], για την μέτρηση του επιπέδου νερού χρησιμοποιήθηκε ένας αισθητήρας ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων, ο οποίος με την βοήθεια ενός μικροελεγκτή⁴ υπολόγιζε την χωρητικότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων με τη βοήθεια του χρόνου εκφόρτισης ο οποίος σχετιζόταν με το επίπεδο του νερού.

Συγκεκριμένα, ο χρόνος εκφόρτισης αφορούσε μερικά RC κυκλώματα τα οποία συμπεριλαμβάνονταν στο συνολικό κύκλωμα. Πιο αναλυτικά, η θύρα port 2 δίνει παλμό μέσω της αντίστασης R_d στο θετικό ακροδέκτη του αισθητήρα όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.3. Ο πυκνωτής μεταξύ της θύρας port 2 και γείωσης (θύρα port 3) φορτίζει έως ότου η τάση στα άκρα του να φτάσει την τάση τροφοδοσίας V_{CC} μέσω της αντίστασης R_d . Μόλις φτάσει αυτήν την τιμή παύει να δίνει παλμό στη θύρα port 2. Ξεκινά η εκφόρτιση του πυκνωτή μέσω της αντίστασης R_d με την τάση στα άκρα των ηλεκτροδίων να καθορίζεται με ένα κύκλωμα σύγκρισης στη θύρα port 1 του μικροελεγκτή, ενώ ταυτόχρονα ξεκινά και η μέτρηση ενός χρονιστή του μικροελεγκτή. Η αντίσταση R_i περιορίζει την διέλευση του ρεύματος προς τη θύρα port 1 ενώ συμβάλει στην μείωση παρασιτικών φαινομένων και φαινομένων θορύβου.

Όταν η τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων μειωθεί τόσο ώστε να φτάσει την τάση κατωφλίου V_{TL} ο χρονιστής παύει να μετρά, και ο χρόνος αυτός της μετάβασης της τάσης των ηλεκτροδίων από V_{CC} να γίνει V_{TL} υπολογίζεται μαθηματικά μέσω της σχέσης:

⁴ Συγκεκριμένα του PIC16F887 (Microchip) [14].

$$V_C(t) = V_{CC} e^{\frac{-t}{R_d C_{electrode}}} \quad (3-3)$$

όπου:

$$V_C(t) = V_{TL} = 0.375V_{CC} \quad (3-4)$$

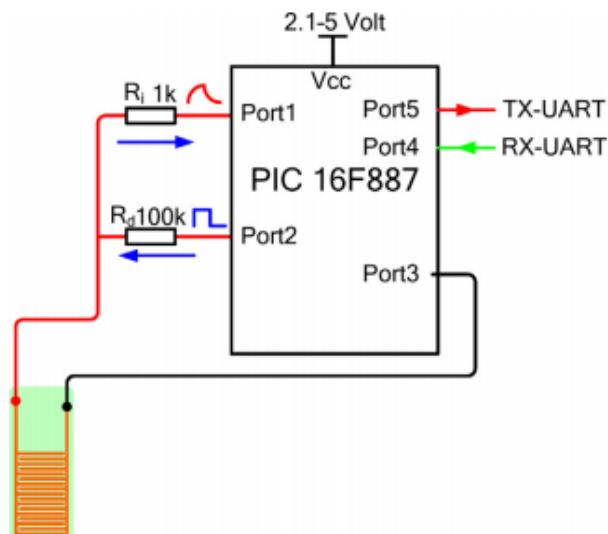
και

$$R_d = 100k\Omega \quad (3-5)$$

Έτσι, ο χρόνος προκύπτει ως:

$$t = 98.083 \times C_{electrode} \quad (3-6)$$

Ύστερα, ο χρόνος εκφόρτισης ο οποίος σχετίζεται με το επίπεδο του νερού μετατρέπεται σε ψηφιακή μορφή στις σειριακές θύρες port του μικροελεγκτή (UART) [14].



Σχήμα 3.3: Κύκλωμα μέτρησης χωρητικότητας [14].

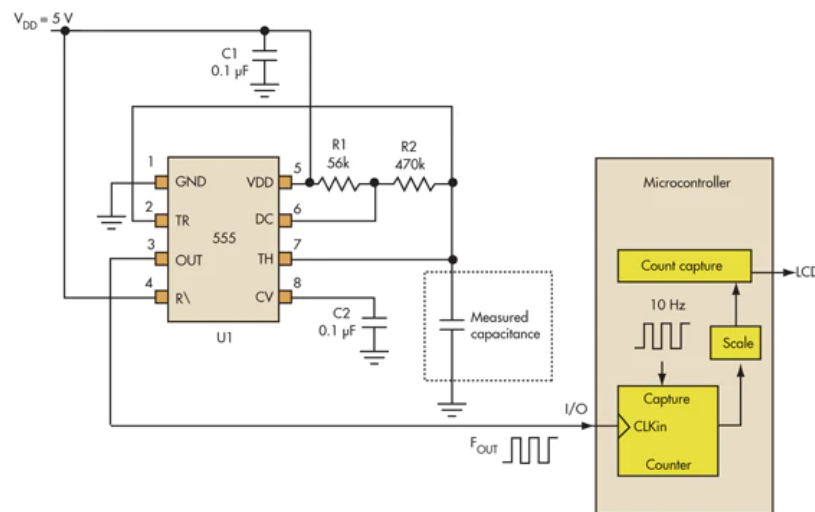
Εδώ είναι φανερή και η γραμμική συμπεριφορά μεταξύ της χωρητικότητας του πυκνωτή και της σταθεράς χρόνου τ .

Έτσι, γνωρίζοντας τον συνολικό χρόνο της μετάβασης από V_{CC} σε V_{TL} , και γνωρίζοντας και την μαθηματική σχέση που συνδέει τον χρόνο αυτό με την χωρητικότητα, εύλογα μπορεί να βρεθεί μαθηματικά η χωρητικότητα.

3.2 Κυκλώματα μέτρησης χωρητικότητας με την χρήση του χρονοιστή 555

3.2.1 Προσέγγιση με χρονοιστές

Ο πιο συνήθης και απλός τρόπος για την μέτρηση χωρητικών αισθητήρων είναι με την χρήση κυκλωμάτων με αναλογικούς χρονοιστές, τα οποία παράγουν μία συχνότητα η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη με την χωρητικότητα και μετά με την χρήση μικροελεγκτών για την μέτρηση των παλμών μέσα σε μία συγκεκριμένη περίοδο γίνεται υπολογισμός της συχνότητας. Έτσι, καθίσταται περιττή η χρήση αναλογικού-σε-ψηφιακό μετατροπέα (ADC) ή συγκριτή ενσωματωμένο στον μικροελεγκτή [31].



Σχήμα 3.4: Κύκλωμα με αναλογικό χρονοιστή για την μέτρηση χωρητικού αισθητήρα [31].

Μαθηματικά η χωρητικότητα συνδέεται με την συχνότητα μέσω της εξής σχέσης [31]:

$$F = \frac{1}{C \cdot (R_1 + 2R_2) \cdot \ln 2} \quad (3-7)$$

Ένα από τα δημοφιλέστερα ολοκληρωμένα κυκλώματα το οποίο περιλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος των κυκλωμάτων που απαιτούνται για την υλοποίηση μονοσταθών και ασταθών πολυδονητών είναι ο χρονοιστής 555 (timer 555).

Το ολοκληρωμένο του χρονοιστή 555 μπορεί να συνδεθεί στη μονοσταθή λειτουργία, παράγοντας παλμό σταθερής-ακριβούς διάρκειας είτε στη δισταθή λειτουργία (ή αλλιώς Schmitt trigger) με 2 σταθερές καταστάσεις όπου η μετάβαση από την μία στην άλλη γίνεται μέσω πυροδότησης ή σκανδαλισμού (trigger) μέσω flip-flop.

Τέλος, εάν συνδεθεί στην ασταθή λειτουργία του ένας χρονοιστής 555, τότε αυτός δύνανται να λειτουργήσει ως ταλαντωτής, παράγοντας ακριβείς και συνεχείς κυματομορφές όπου η συχνότητα στην έξοδο μπορεί να επιλεγεί μέσω ενός δικτύου επιλογής συχνοτήτων με RC ή LC στοιχεία [20], [32].

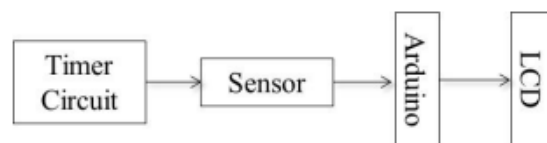
Μερικές εφαρμογές του μονοσταθούς πολυδονητή είναι οι χρονοδιακόπτες, η ανίχνευση παλμών που λείπουν, οι διακόπτες χωρίς αναπήδηση, οι διακόπτες αφής, ο διαχωριστής συχνότητας, η μέτρηση χωρητικότητας, η διαμόρφωση πλάτους παλμού (PWM) ενώ του ασταθούς (δηλαδή του ταλαντωτή 555) είναι τα LED, οι λάμπες, η παραγωγή παλμών, τα λογικά ρολόγια, οι συναγερμοί ασφαλείας, η διαμόρφωση θέσης παλμού [32].

Σε περιπτώσεις όπου είναι απαραίτητη η μέτρηση της χωρητικότητας να γίνει σε χαμηλές συχνότητες, πολλές φορές είναι προτιμότερο ένα κύκλωμα με έναν χρονοιστή 555, το οποίο μπορεί να γίνει και ταλαντωτής 555, όπως εξηγήθηκε και προηγουμένως.

3.2.2 Υπολογισμός χωρητικότητας με τον χρονιστή 555

Σύμφωνα με μία έρευνα που διεξήχθη από τους Nurul Najwa Khamis, Nor F Za'bah, Ahmad Fairuzabadi Mansor, Anis Nurashikin Nordin, τομέας Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών από το Διεθνές Ισλαμικό Πανεπιστήμιο Μαλαισίας στη Μαλαισία η οποία παρουσιάστηκε το 2016 στο Διεθνές Συνέδριο Μηχανικής Υπολογιστών & Επικοινωνιών, επετεύχθη η κατασκευή ενός βιοαισθητήρα με σκοπό την ανίχνευση παρουσίας νερού και κυττάρων. Ο βιοαισθητήρας παίρνει σαν είσοδο ένα AC σήμα χαμηλής συχνότητας και ύστερα δίνει ως αποτέλεσμα δεδομένα για την αντίσταση του νερού και των κυττάρων πάνω στα οποία έκανε μετρήσεις. Η εμφάνιση των αποτελεσμάτων γίνεται με την βοήθεια του Arduino και μιας LCD οθόνης. Ο σχεδιασμός έδειξε με επιτυχία ότι η συσκευή είναι σε θέση να ανιχνεύει και να διαφοροποιεί τις δύο διαφορετικές ουσίες με βάση την αντίσταση και την χωρητικότητά τους [33].

Να σημειωθεί εδώ ότι η διαδικασία αυτή γινόταν ήδη με τη χρήση αναλυτή σύνθετης αντίστασης, ωστόσο εξαιτίας του κόστους και του βάρους προτιμήθηκε ένα αυτοσχέδιο κύκλωμα με χρονιστή 555. Για παρόμοιους λόγους αλλά και για λόγους πολυπλοκότητας απορρίφθηκαν και μετρούμενα συστήματα με ενσωματωμένα συστήματα με FPGAs, τα οποία δύνανται να ανταποκριθούν σε μεγάλο φάσμα συχνοτήτων ενώ στην περίπτωση της αντίστασης των κυττάρων αρκεί ένα κύκλωμα παραγωγής σήματος εισόδου που λειτουργεί στα 20 Hz [33].



Σχήμα 3.5: Το μπλοκ διάγραμμα του κυκλώματος παραγωγής AC σήματος σε σύνδεση με τον αισθητήρα [33].

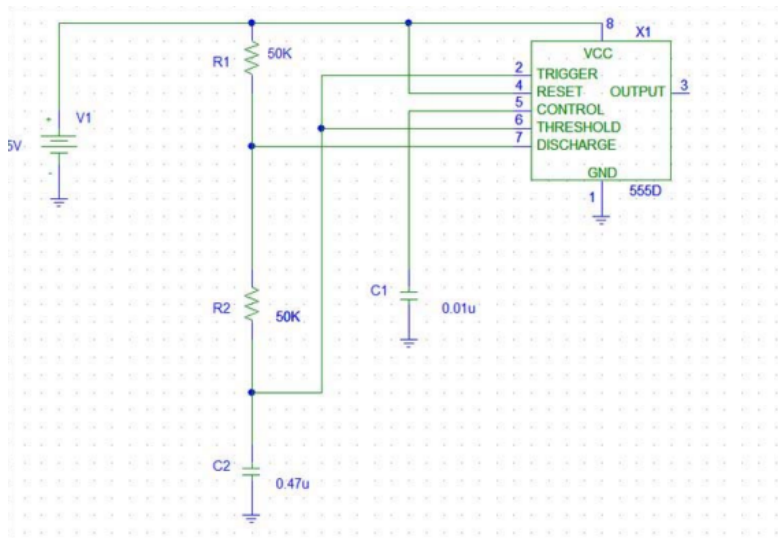
Πιο συγκεκριμένα, στο εν λόγω κύκλωμα, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 3.5, το σήμα AC παράγεται με έναν χρονιστή 555, ύστερα αποστέλλεται στο βιοαισθητήρα και αυτός με

τη σειρά του μετρά και εμφανίζει μέσω του Arduino την αντίσταση και την χωρητικότητα των δειγμάτων οι οποίες αλλάζουν με την παραγωγή-αύξηση των κυττάρων.

Το σήμα είναι συνεχόμενος τετραγωνικός παλμός, αφού ο χρονοιστής 555 συνδέθηκε στην ασταθή λειτουργία του και συνεπώς λειτούργησε ως ταλαντωτής. Ο παλμός έχει συγκεκριμένη συχνότητα η οποία υπολογίζεται μαθηματικά ως εξής [33]:

$$f_c = \frac{1}{0.7(R_1 + 2R_2)C_1} \text{ (Hz)} \quad (3-8)$$

Το σχηματικό διάγραμμα του χρονοιστή είναι το κάτωθι (Σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.6: Το σχηματικό διάγραμμα του χρονοιστή 555 [33].

Θέτοντας:

$$R_1 = 50k\Omega,$$

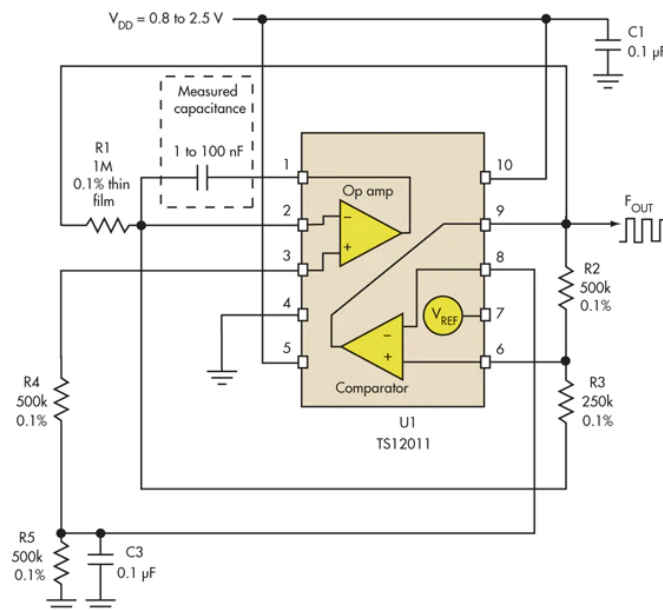
$$R_2 = 50k\Omega \text{ και}$$

$$C = 0.47\mu F,$$

ο χρονοιστής δίνει στην έξοδο παλμό συχνότητας 20Hz, συχνότητα ιδανική για μέτρηση δείγματος με κυτταρική ουσία, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως [33].

3.3 Κυκλώματα μέτρησης χωρητικότητας με την χρήση τελεστικών ενισχυτών

Για γρηγορότερες αποκρίσεις και αποτελέσματα κατά την μέτρηση χωρητικότητας δύνανται να χρησιμοποιηθούν κυκλώματα με τελεστικούς ενισχυτές. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται και στο κύκλωμα του Σχήματος 3.7, μέσω του ολοκληρωτή τελεστικού ενισχυτή (TE), οδηγούνται ρεύματα στον πυκνωτή υπολογίζοντας την χωρητικότητα μέσω του χρόνου ολοκλήρωσης.



Σχήμα 3.7: Κύκλωμα βασισμένο σε ολοκληρωτή τελεστικό ενισχυτή [31].

Για την παραγωγή του ρεύματος μέτρησης το οποίο θα τροφοδοτήσει τον πυκνωτή είναι απαραίτητα από εξοπλισμό του κυκλώματος μία αντίσταση ακριβείας (precision

resistor⁵) με καλή ανοχή, ένας τελεστικός ενισχυτής και δυνητικά ένας συγκριτής ώστε ο τελεστικός ενισχυτής ολοκλήρωσης να μπει σε ασταθή λειτουργία, δηλαδή ταλαντωτή. Στο συγκεκριμένο κύκλωμα που φαίνεται και στο Σχήμα 3.7, ο τελεστικός ενισχυτής οδηγείται σε ασταθή μορφή πυροδοτώντας τον συγκριτή με υστέρηση (για αποφυγή επηρεασμό των μετρήσεων λόγω θορύβου στην είσοδο) να αλλάζει την πολικότητα μεταξύ των δύο κατωφλίων [31].

Το κύκλωμα τροφοδοτεί την μία πλευρά του πυκνωτή ενώ η άλλη βρίσκεται σε εικονική γη αντί για πυκνωτή αναφοράς. Η εικονική γη είναι προτιμητέα διότι έτσι η χωρητικότητα της εισόδου του τελεστικού ενισχυτή δεν επηρεάζει τις μετρήσεις και επίσης η χωρητικότητα του πυκνωτή μπορεί να μετρηθεί απομακρυσμένα χωρίς ασπίδα απαλλάσσοντας τον τελεστικό ενισχυτή να ακολουθήσει την ράμπα χρόνου και να οδηγήσει υψηλή χωρητικότητα.

Συγκεκριμένα, το κύκλωμα μπορεί να λειτουργήσει και με τάση τροφοδοσίας ίση με 1V και είναι κατάλληλο για μέτρηση χωρητικότητας της τάξης nF και πάνω, αφού η συχνότητα της εξόδου πρέπει να είναι μέσα στο εύρος ζώνης του τελεστικού ενισχυτή ενώ οι τυχούσες καθυστερήσεις του συγκριτή μπορούν να προσδώσουν ένα μικρό σφάλμα στο αποτέλεσμα. Για χαμηλότερες τιμές χωρητικότητας χρήσιμος θα ήταν ένας ενισχυτής με μεγαλύτερο εύρος ζώνης μαζί με έναν γρηγορότερο συγκριτή. Για χαμηλές συχνότητες πρέπει να ελαχιστοποιηθεί η καθυστέρηση του συγκριτή καθώς και τα ρεύματα διαρροής του τελεστικού ενισχυτή να είναι μικρά όπως συμβαίνει σε έναν JFET-input τελεστικό ενισχυτή [31].

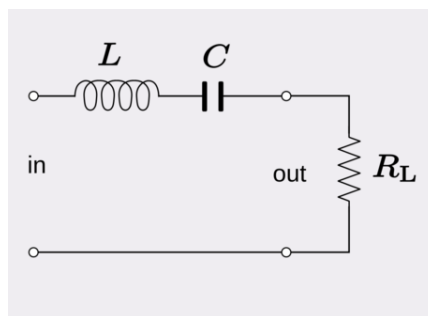
Συμπερασματικά, υπάρχουν αρκετοί τρόποι για να μετρήσει κανείς χωρητικούς αισθητήρες. Για συγκεκριμένο και κατάλληλο εύρος χωρητικότητας αρκούν τα παραδοσιακά κυκλώματα με χρονιστές με προσεκτική σχεδίαση, ωστόσο για χαμηλές χωρητικότητες και υψηλή ακρίβεια ενδεχομένως να είναι πιο κατάλληλοι τελεστικοί ενισχυτές ολοκλήρωσης.

⁵ Μία αντίσταση ακριβείας είναι μία κανονική αντίσταση με σχεδόν ακριβείς ωμικές τιμές.

3.4 Κυκλώματα μέτρησης χωρητικότητας με τη μέθοδο συντονισμού (υπολογισμός συχνότητας)

3.4.1 Κυκλώματα RLC

Ο υπολογισμός της συχνότητας συντονισμού ενός κυκλώματος μπορεί να δώσει πολλές και χρήσιμες πληροφορίες για ένα κύκλωμα όσο και για τα στοιχεία τα οποία το αποτελούν.



Σχήμα 3.8: Ένα τυπικό RLC κύκλωμα σε σειρά, όπου δίνεται η είσοδος και η έξοδος λαμβάνεται στα άκρα της αντίστασης [17].

Ένα συντονισμένο κύκλωμα ή κύκλωμα LC είναι ένα κύκλωμα πυκνωτή - πηνίου που ύστερα από μία αρχική διέγερση παράγει ημιτονικό ηλεκτρικό σήμα. Τόσο το πηνίο όσο και ο πυκνωτής είναι στοιχεία που αποθηκεύουν ενέργεια, σε μαγνητική και ηλεκτρική μορφή αντίστοιχα. Υπάρχουν δύο είδη συνδεσμολογιών, η παράλληλη σύνδεση του πυκνωτή με το πηνίο και η σύνδεση σε σειρά. Όταν ένα πηνίο συνδεθεί σε σειρά με έναν φορτισμένο πυκνωτή, το κύκλωμα αρχίζει να διαρρέεται από ρεύμα λόγω του φορτίου του πυκνωτή. Σε περίπτωση απουσίας του πηνίου ο πυκνωτής θα εκφορτιζόταν ακαριαία. Λόγω του φαινομένου αυτεπαγωγής του πηνίου καθυστερεί η εκφόρτιση και σταδιακά η ηλεκτρική ενέργεια του πυκνωτή μετατρέπεται σε μαγνητική ενέργεια στο εσωτερικό του πηνίου. Και πάλι λόγω αυτεπαγωγής το κύκλωμα εξακολουθεί να

διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, ενώ η μαγνητική ενέργεια του πηνίου μετατρέπεται ξανά σε ηλεκτρική ενέργεια του πυκνωτή [34].

Στην ιδανική περίπτωση που δεν υπάρχουν απώλειες ενέργειας ο πυκνωτής ανακτά το αρχικό του φορτίο, αυτή τη φορά με ανεστραμμένη πόλωση και το φαινόμενο εξακολουθεί να επαναλαμβάνεται θεωρητικά επ άπειρον. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία ενός αρμονικού εναλλασσόμενου ρεύματος (ημιτονικό σήμα) στο εσωτερικό του κυκλώματος. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται αρμονική ηλεκτρική ταλάντωση. Η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος που δημιουργείται δίνεται από την σχέση:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{LC}} \text{ (Hz)} \quad (3-9)$$

όπου L (H) ο συντελεστής αυτεπαγωγής του πηνίου και C (F) η χωρητικότητα του πυκνωτή.

Οι εφαρμογές που κάνουν χρήση τέτοιου είδους κυκλώματα είναι οι ταλαντωτές, οι γεννήτριες συχνοτήτων, κεραίες.

Στην πραγματικότητα υπάρχουν απώλειες ενέργειας, γιατί οι αγωγοί και τα εξαρτήματα εμφανίζουν ωμική αντίσταση. Επιπλέον οι ηλεκτρικές ταλαντώσεις εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, άρα και ενέργεια. Το κύκλωμα στο οποίο η αντίσταση δεν είναι αμεληταία ή στο οποίο έχει συνδεθεί σε σειρά ένας αντιστάτης ονομάζεται RLC, ενώ μετά από μία αρχική διέγερση εκτελεί φθίνουσα ταλάντωση.

Τα κυκλώματα LC και RLC είναι ηλεκτρικοί ταλαντωτές, ώστε να μπορούν να εκτελέσουν εξαναγκασμένη ταλάντωση. Αυτό το φαινόμενο αξιοποιείται στο συντονισμό αυτών των κυκλωμάτων με ευρείες τεχνολογικές εφαρμογές. Από κυκλώματα LC παράγονται τα ραδιοκύματα και τα μικροκύματα.

3.4.2 Φαινόμενο συντονισμού και υπολογισμός της συχνότητας συντονισμού

Ένα κύκλωμα βρίσκεται σε κατάσταση συντονισμού όταν η σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος είναι ίση με την ωμική αντίσταση R . Συγκεκριμένα, στο κύκλωμα σε σειρά όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, όταν το κύκλωμα τροφοδοτείται με εναλλασσόμενη τάση:

$$V(t) = V_0 \cdot \cos\omega t \text{ (V)} \quad (3-10)$$

διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα της ίδιας συχνότητας με εκείνη της τάση:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \text{ (Hz)} \quad (3-11)$$

αλλά με διαφορά φάσης φ , δηλαδή το ρεύμα και η τάση δεν παίρνουν ταυτόχρονα τη μέγιστη τιμή τους. Μάλιστα η ένταση του ρεύματος περιγράφεται μαθηματικά από την σχέση:

$$I(t) = I_0 \cdot \cos(\omega t - \varphi) \text{ (A)} \quad (3-12)$$

και αποδεικνύεται ότι το πλάτος της έντασης του ρεύματος ισούται με:

$$I_0 = \frac{V_0}{|Z|} \text{ (A)} \quad (3-13)$$

όπου Z η σύνθετη αντίσταση εισόδου του κυκλώματος και υπολογίζεται ως εξής:

$$Z(\omega) = R + X_C + X_L \text{ (}\Omega\text{)} \quad (3-14)$$

όπου:

$$X_C = \frac{1}{j\omega L} \text{ (}\Omega\text{)} \quad (3-15)$$

είναι η χωρητική αντίσταση, δηλαδή η αντίσταση που παρουσιάζει στο εναλλασσόμενο ρεύμα ένας πυκνωτής χωρητικότητας C και

$$X_L = j\omega L \ (\Omega) \quad (3-16)$$

είναι η επαγωγική αντίσταση του πηνίου δηλαδή η αντίσταση που παρουσιάζει στο εναλλασσόμενο ρεύμα ένα πηνίο. Η χωρητική αντίσταση ενός πυκνωτή (όπως και η επαγωγική αντίσταση ενός πηνίου) δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από τη συχνότητα της τάσης που τροφοδοτεί το κύκλωμα. Για μεγάλες συχνότητες, οι πυκνωτές έχουν μικρή χωρητική αντίσταση και αντιστρόφως. Στο συνεχές ρεύμα η χωρητική αντίσταση απειρίζεται, δηλαδή δεν υπάρχει διέλευση ρεύματος.

Συνεπώς, από τις σχέσεις (3-14), (3-15), (3-16) προκύπτει:

$$Z(\omega) = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) \ (\Omega) \quad (3-16)$$

και το μέτρο της είναι ίσο με:

$$|Z(\omega)| = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} \ (\Omega) \quad (3-17)$$

και άρα εξαρτάται από την συχνότητα $\omega = 2\pi f$, όπως φαίνεται στην σχέση (3-11), όπου f είναι η συχνότητα διέγερσης του κυκλώματος. Εν τέλει, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν, το πλάτος της έντασης του ρεύματος ισούται με:

$$I_0 = \frac{V_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \ (A) \quad (3-18)$$

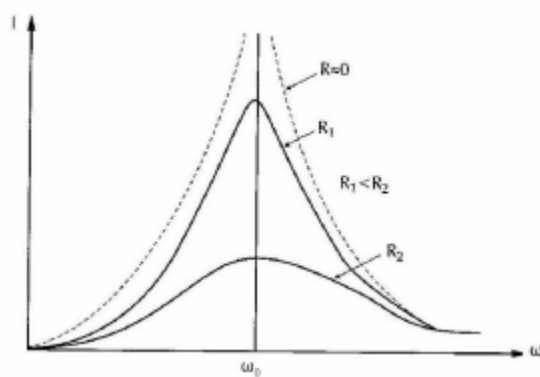
Κατά τον συντονισμό το πλάτος του ρεύματος γίνεται μέγιστο, και αυτό επιτυγχάνεται μόνο όταν ο παρονομαστής γίνει ελάχιστος, δηλαδή όταν η ποσότητα:

$$(\omega L - \frac{1}{\omega C}) = 0 \Rightarrow$$

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \Rightarrow$$

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (r/s) \quad (3-19)$$

Η κατάσταση αυτή είναι γνωστή ως κατάσταση συντονισμού και είναι ανάλογη με το φαινόμενο της μηχανικής όπου σε ένα ταλαντούμενο σύστημα το πλάτος της ταλάντωσης γίνεται μέγιστο όταν η συχνότητα της εξωτερικής δύναμης που ασκείται σε αυτό τείνει να εξισωθεί με την ιδιοσυχνότητα του συστήματος. Δηλαδή, το ταλαντούμενο σύστημα αποκτά πολύ μεγάλη απόκριση αρκεί να επιλεχθεί ως συχνότητα διέγερσης η ιδιοσυχνότητα του συστήματος. Το ω_0 ονομάζεται κυκλική συχνότητα στην οποία παρατηρείται ο συντονισμός.



Σχήμα 3.9: Καμπύλες συντονισμού της έντασης του ρεύματος για διάφορες τιμές της ωμικής αντίστασης R του κυκλώματος [35].

Στην παραπάνω εικόνα (Σχήμα 3.9) φαίνονται οι διάφορες καμπύλες της έντασης του ρεύματος συναρτήσει της συχνότητας της εφαρμοζόμενης εναλλασσόμενης τάσης, για

διάφορες τιμές της ωμικής αντίστασης (R) του κυκλώματος. Παρατηρείται ότι όσο μικρότερη είναι η ωμική αντίσταση τόσο οξύτερη είναι η καμπύλη συντονισμού [34], [35], [36].

Είναι πλέον κατανοητό ότι μεταβάλλοντας τις τιμές του συντελεστή επαγωγής και της χωρητικότητας του κυκλώματος μεταβάλλεται και η συχνότητα συντονισμού του.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως ένα κύκλωμα συντονισμού χαρακτηρίζεται και από τον συντελεστή ποιότητας Q, όπου:

$$Q = \frac{\sqrt{LC}}{R} \quad (3-20)$$

Αποτελεί αδιάστατο μέγεθος και ανάλογα με τις τιμές που μπορεί να λάβει, χαρακτηρίζεται το σύστημα σε ταλάντωση με απόσβεση, ταλάντωση χωρίς απόσβεση και ταλάντωση κρίσιμης απόσβεσης [37].

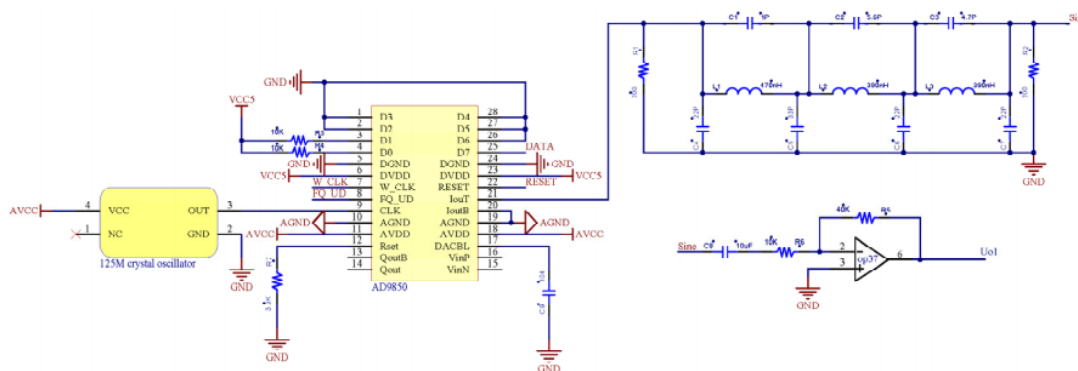
4 - Μικροελεγκτές

Εκτός από τα απαραίτητα παθητικά και μη διακριτά στοιχεία για την συνδεσμολογία ενός κυκλώματος το οποίο θα μετράει χωρητικότητα είναι απαραίτητοι και μικροελεγκτές, ειδικά για την παραγωγή του σήματος που θα τροφοδοτήσει το κύκλωμα αλλά και για το κύκλωμα ανάγνωσης.

4.1 Παραγωγή του σήματος με την βοήθεια μικροελεγκτών

Οι Yihui Miao και Baoqing Nie/Xinjuan Chen παρουσίασαν στο Διεθνές Συνέδριο Επικοινωνιών, Πληροφοριακών Συστημάτων και Μηχανικής Υπολογιστών εν έτει 2019 ένα σύστημα μέτρησης χωρητικότητας. Στην υλοποίησή του συμπεριέλαβαν ένα κύκλωμα γεννήτριας ημιτονοειδούς σήματος η οποία χρησιμοποιούσε το τσιπ AD9850.

Το συγκεκριμένο τσιπ έχει δύο λειτουργίες φόρτωσης δεδομένων: την σειριακή και την παράλληλη. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 4.1), ο μικροελεγκτής χρειάζεται μόνο τέσσερις γραμμές για να παράξει, μέσω του τσιπ, ημιτονοειδές κύμα. Στην θύρα D7 γίνεται η σειριακή φόρτωση δεδομένων της εισόδου. Οι γραμμές FQ_UD και W_CLK ελέγχουν το ρολόι και η γραμμή RESET είναι η γραμμή RESET του τσιπ AD9850. Στους 125MHz παλμούς ρολογιού, η έξοδος του ημιτονοειδούς σήματος έχει εύρος συχνότητας από περίπου 0.3Hz έως και 40MHz. Η τιμή της συχνότητας της εξόδου μπορεί να μεταβληθεί μέσω υπολογιστή και μάλιστα μπορεί να επιτευχθεί μεγάλη ακρίβεια. Το ημιτονοειδές σήμα στην έξοδο φιλτράρεται για τυχαίους θορύβους μέσω ενός χαμηλοπερατού φίλτρου και ύστερα ενισχύεται σε peak-to-peak 4V σήμα ημιτόνου μέσω τελεστικού ενισχυτή [38]. Ουσιαστικά, γίνεται μία ψηφιακή σε αναλογική μετατροπή σήματος εφόσον το συγκεκριμένο τσιπ υποστηρίζει θύρα DAC (digital-to-analog-conversion).

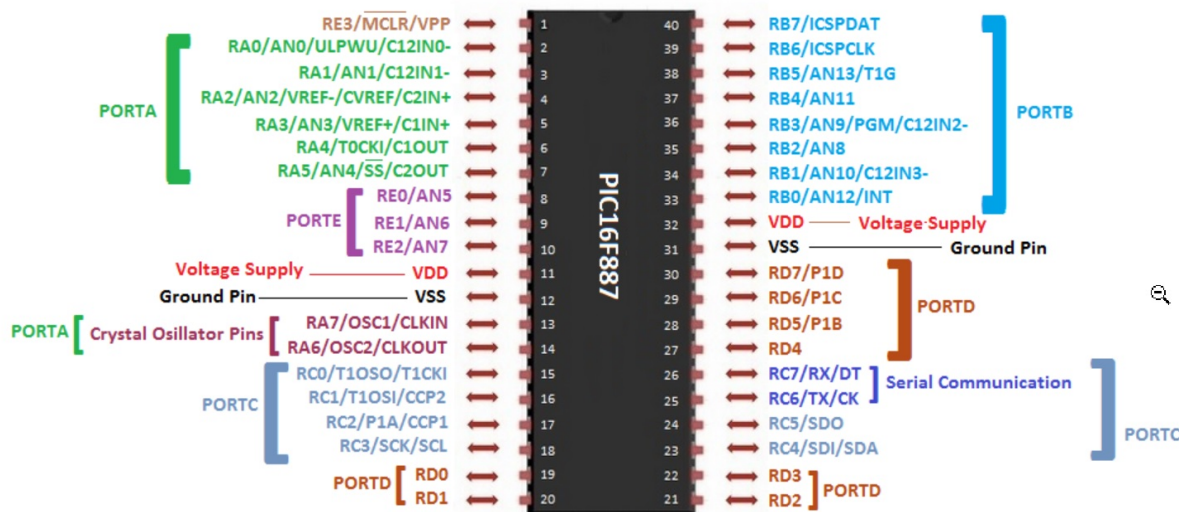


Σχήμα 4.1: Κύκλωμα παραγωγής ημιτονοειδούς σήματος [38].

4.2 Κύκλωμα ανάγνωσης

Εκτός από την μετατροπή του σήματος από ψηφιακή σε αναλογική, χρειάζεται και η αντίστροφη διαδικασία, εφόσον θελει να δει κανείς το παραγόμενο σήμα σε ψηφιακή μορφή (όπως στον υπολογιστή ή στο κινητό) και να το επεξεργαστεί. Αυτή η διαδικασία είναι πιο εύκολη εφόσον οι περισσότεροι μικροελεγκτές και τσιπ διαθέτουν την δυνατότητα αναλογικής σε ψηφιακή μετατροπή ή αλλιώς ADC καθώς επίσης και θύρες

UART. Η UART είναι ένα κύκλωμα το οποίο διαμεσολαβεί στην σειριακή επικοινωνία υπολογιστών ή υπολογιστών με συσκευές/ ενσωματωμένων υπολογιστικών συστημάτων όπως μικροελεγκτές. Η επικοινωνία των UART γίνεται δια μέσου των στάνταρντ θυρών RS-232, RS-422 ή RS-485. Ενα παράδειγμα τέτοιου μικροελεγκτή, ο οποίος διαθέτει θύρες για UART είναι ο PIC16F887 όπου σύμφωνα με την μελέτη των K. Chetpattananondha, T. Tapoanoi, P. Phukpattaranont, N. Jindapetcha που αναφέρθηκε και νωρίτερα ο μικροελεγκτής μέσω των pin 25 και 26 (RX-UART και TX-UART αντίστοιχα) μπορεί να στείλει τον χρόνο εκφόρτισης του πυκνωτή τον οποίο μετράει σε ψηφιακή μορφή (κώδικας ASCII). Να σημειωθεί ότι η διαδικασία αυτή είναι με μειωμένο κόστος, μειωμένη περιπλοκότητα, μειωμένο χώρο (έκταση του κυκλώματος) αλλά και κατανάλωσης ισχύος, εφόσον ο μικροελεγκτής PIC16F887 λειτουργεί στα 20MHz [14].



Σχήμα 4.2: Το διάγραμμα pinout του μικροελεγκτή PIC16F887 [39].

Μία ακόμα εφαρμογή η οποία χρησιμοποιεί μικροελεγκτή ώστε να μετράει την χωρητικότητα του αισθητήρα είναι η εφαρμογή των Nurul Najwa Khamis, Nor F Za'bah, Ahmad Fairuzabadi Mansor, Anis Nurashikin Nordin στο διεθνές συνέδριο Μηχανικής Υπολογιστών και Επικοινωνιών το 2016. Το μοντέλο περιλάμβανε ένα κύκλωμα - γεννήτρια εναλλασσόμενου σήματος (το οποίο υλοποιείται με χρονιστή 555) η οποία

έδινε σήμα στον αισθητήρα και στη συνέχεια η μέτρηση της χωρητικότητας αλλά και η εκτύπωσή της σε οθόνη γινόταν με την βοήθεια Arduino και μίας lcd οθόνης.

Πειραματικό Μέρος

5 - Σχεδίαση και κατασκευή πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων

ηλεκτροδίων

Για την κατασκευή pcb του πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων απαιτούνται κάποια συγκεκριμένα στάδια τα οποία γίνονται με χρήση φωτοευαίσθητης πλακέτας. Τα στάδια κατασκευής του πυκνωτή είναι τα εξής:

- Σχεδίαση του κυκλώματος
- Εκτύπωση σε διαφάνεια
- Έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία
- Εμφάνιση
- Αποχάλκωση
- Καθαρισμός
- Τοποθέτηση εξαρτημάτων
- Οπτικός & ηλεκτρικός έλεγχος.

5.1 Σχεδίαση του κυκλώματος

Για λόγους ποικιλίας αλλά και εγκυρότητας, ώστε να εξαλειφθεί το ενδεχόμενο να είναι προβληματικός κάποιος πυκνωτής, κατασκευάστηκαν παραπάνω από ένας πυκνωτές και με διαφορετικές διαστάσεις. Για την συγκεκριμένη εφαρμογή αρκεί ένας οποιοσδήποτε πυκνωτής ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων.

Στην αρχή πραγματοποιήθηκε η σχεδίαση των πυκνωτών. Να σημειωθεί ότι είχαν κατασκευαστεί πυκνωτές με παραπάνω από 10 δόντια και μεγαλύτερων διαστάσεων. Στο τέλος όμως, προτιμήθηκαν οι πυκνωτές που έχουν διαστάσεις 2 επί 1 εκατοστά και διαθέτουν 10 δόντια (5 από κάθε πλευρά) λόγω καλύτερης συμπεριφοράς.

5.2 Εκτύπωση σε διαφάνεια

Στη συνέχεια ακολούθησε η εκτύπωση του κυκλώματος που σχεδιάστηκε σε διαφάνεια η οποία ύστερα τοποθετείται πάνω σε φωτοευαίσθητη πλάκα.

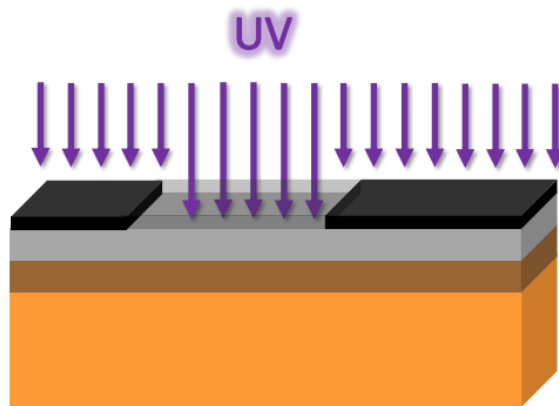
Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η φωτοευαίσθητη πλακέτα. Ξεκινώντας από το πάνω μέρος, είναι ευδιάκριτη η διαφάνεια με το ηλεκτρικό κύκλωμα. Η διαφάνεια αυτή επιτρέπει ή αποτρέπει τη διέλευση της υπεριώδους ακτινοβολίας ανά σημείο. Το φωτοευαίσθητο στρώμα, στη συνέχεια, με το γκρι χρώμα προστατεύει τον χαλκό κατά το στάδιο της αποχάλκωσης, όπου υπάρχει. Το τρίτο στρώμα με το καφέ χρώμα αποτελεί ο χαλκός στο οποίο δημιουργούνται οι αγωγιμοί δρόμοι της πλακέτας. Το τέταρτο και τελευταίο στρώμα με το πορτοκαλί χρώμα αποτελεί το υπόστρωμα (FR-4) το οποίο αποτελεί τον μονωτή μεταξύ των αγωγιμων δρόμων της πλακέτας.



Σχήμα 5.1: Φωτοευαίσθητη πλακέτα.

5.3 Έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία

Ακολουθεί το στάδιο της έκθεσης σε υπεριώδη ακτινοβολία, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Το προστατευτικό αυτοκολλητο αφαιρείται από την φωτοευαίσθητη πλακέτα και τοποθετείται το εκτυπωμένο κύκλωμα. Στη συνέχεια, η πλακέτα τοποθετείται σε πηγή υπεριώδους ακτινοβολίας και εκτίθεται για περίπου 5 λεπτά ενώ οι περιοχές του φωτοευαίσθητου στρώματος που δεν καλύπτονται από τις μαύρες περιοχές της μάσκας, εκτίθενται στην υπεριώδη ακτινοβολία.

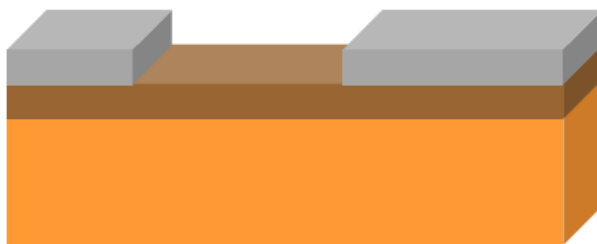


Σχήμα 5.2: Η φωτοευαίσθητη πλακέτα κατά την έκθεση της στην υπεριώδη ακτινοβολία.

5.4 - Εμφάνιση

Σε επόμενο στάδιο είναι η εμφάνιση. Η πλακέτα, χωρίς την μάσκα, τοποθετείται σε διάλυμα NaOH (καυστική σόδα – developer) για περίπου 10-20 λεπτά. Ο χρόνος διαφέρει ανάλογα την περιεκτικότητά της και αυτή η διαφορά κυμαίνεται από μερικά δευτερόλεπτα έως και 20 λεπτά. Όσες περιοχές του φωτοευαίσθητου στρώματος επηρεάστηκαν νωρίτερα από την υπεριώδη ακτινοβολία (πλακέτα Positive photoresist) απομακρύνονται από την πλακέτα, ενώ όσες περιοχές του φωτοευαίσθητου στρώματος δεν επηρεάστηκαν νωρίτερα από την υπεριώδη ακτινοβολία (πλακέτα Negative

photoresist) παραμένουν στην πλακέτα. Έτσι στην πλακέτα εμφανίζεται το σχέδιο της μάσκας.



Σχήμα 5.3: Η φωτοευαίσθητη πλακέτα κατά το στάδιο της εμφάνισης.

5.5 - Αποχάλκωση

Κατά το στάδιο της αποχάλκωσης η πλακέτα καθαρίζεται με νερό και τοποθετείται σε διάλυμα τριχλωριούχου σιδήρου $FeCl_3$. Το διάλυμα τριχλωριούχου σιδήρου δεν πρέπει να έρθει σε επαφή με μεταλλικά υλικά όπως σωληνώσεις, δοχεία, λαβίδες καθώς αποτελεί ισχυρό διαβρωτικό. Οι περιοχές του χαλκού που βρίσκονται κάτω από το φωτοευαίσθητο στρώμα προστατεύονται ενώ οι υπόλοιπες απομακρύνονται.



Σχήμα 5.4: Η φωτοευαίσθητη πλακέτα κατά το στάδιο της αποχάλκωσης.

Το στάδιο αυτό δύναται να διαρκέσει από μισή ώρα έως και αρκετές ώρες αναλόγως της πολυπλοκότητας του σχεδίου, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της κατάστασης του διαλύματος. Τέλος, η διαδικασία αυτή επιταχύνεται με την προσθήκη οξυγόνου και

με την ανάδευση του δοχείου. Στην εργασία αυτή, προκειμένου να επιταχυνθεί η διαδικασία της αποχάλκωσης έγινε χρήση ενός ειδικού αναδευτήρα Orbital Shaker PSU – 10i Grand - bio, ο οποίος ήταν ενεργοποιημένος σε συχνότητα 80 rpm.

5.6 - Καθαρισμός και Έλεγχος

Ύστερα από την εμφάνιση ολόκληρου του σχεδίου πραγματοποιείται ο καθαρισμός της πλακέτας με ακετόνη. Μετά, πραγματοποιείται οπτικός έλεγχος της πλακέτας και έλεγχος της αγωγιμότητας μεταξύ διαφόρων σημείων με την βοήθεια ενός πολύμετρου.

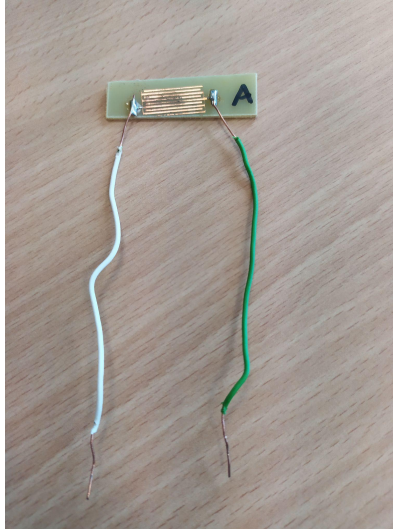


Σχήμα 5.5: Η φωτοευαίσθητη πλακέτα κατά το στάδιο του καθαρισμού και ελέγχου.

Με αυτήν την μέθοδο έγινε η κατασκευή των πυκνωτών ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων. Ο πυκνωτής ο οποίος παρήχθη στο εργαστήριο και χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας είναι ο κάτωθι.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα υπάρχει μερική οξειδωση στην επιφάνεια του πυκνωτή, κάτι το οποίο είναι λογικό εφόσον είναι κατασκευασμένος από χαλκό.

Αποτελείται από 10 δόντια (5 από την μία πλευρά και 5 από την άλλη). Το μήκος των δοντιών ισούται με 1.9 εκατοστά και το πλάτος 0.5 χιλιοστά. Τα δόντια είναι κατασκευασμένα από χαλκό. Το πλάτος του πυκνωτή είναι 1 εκατοστό, συνεπώς οι διαστάσεις του είναι 2 επί 1 εκατοστά. Το διάκενο των δοντιών είναι 0.5 χιλιοστά.



Σχήμα 5.6: Ο πυκνωτής ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια των πειραμάτων του εργαστηρίου.

Η χωρητικότητα του πυκνωτή όπως μετρήθηκε με την βοήθεια του μετρητή αυτεπαγωγής, χωρητικότητας, αντίστασης LCR⁶ είναι ίση με 0.2pF εν κενώ, δηλαδή χωρίς κάποια εναπόθεση υλικού πάνω στην επιφάνεια του πυκνωτή.

6 - Πειραματικές μετρήσεις στο εργαστήριο

Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στους 25°C. Με την βοήθεια ενός παλμογράφου⁷ και μιας γεννήτριας⁸ του εργαστηρίου, αλλά και την χρήση του προσφερόμενου εξοπλισμού (breadboard, jumper wires, probes), στην αρχή πραγματοποιήθηκαν κάποιες μετρήσεις σε ένα RC κύκλωμα, πάνω σε ήδη γνωστές τιμές (οι οποίες βρέθηκαν μέσω μέτρησης των στοιχείων στο LCR, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 6.1).

⁶ Το μοντέλο του LCR είναι 380193, EXTECH INSTRUMENTS.

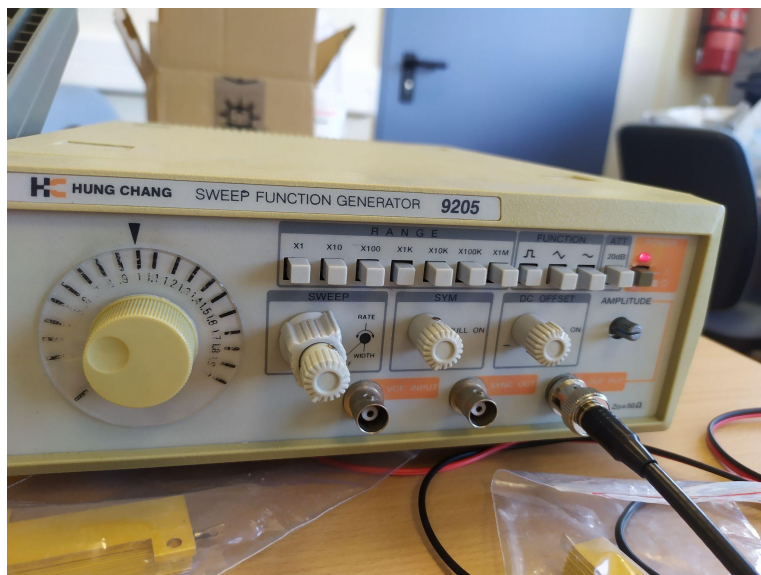
⁷ Το μοντέλο του παλμογράφου ονομάζεται DS03062A, DIGITAL STORAGE OSCILLOSCOPE, Agilent Technologies.

⁸ Το μοντέλο της γεννήτριας ονομάζεται SWEEP FUNCTION GENERATOR 9205.



Σχήμα 6.1: Ο μετρητής αυτεπαγωγής, χωρητικότητας, αντίστασης (LCR) του εργαστηρίου.

Συγκεκριμένα, σε έναν απλό συμβατικό πυκνωτή περίπου 100nF προστέθηκε σε σειρά μία αντίσταση, και φάνηκε η απόκριση του πυκνωτή στον παλμογράφο.

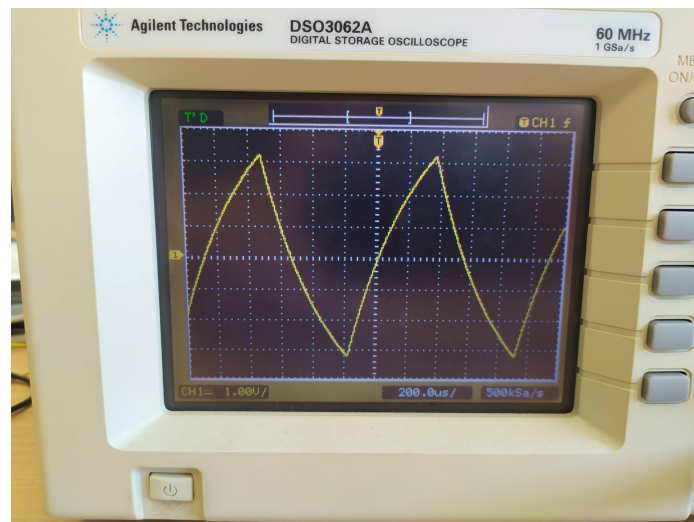


Σχήμα 6.2: Γεννήτρια του εργαστηρίου ρυθμισμένη σε συχνότητα 1kHz, να δίνει τετραγωνικό παλμό.

Για κάθε μία αντίσταση που χρησιμοποιήθηκε (4.65kΩ, 3.296kΩ, 55kΩ) ακολουθεί και το αντίστοιχο στιγμιότυπο σε φωτογραφία. Ο σκοπός αυτής της διαδικασίας ήταν η παρατήρηση της συμπεριφοράς ενός απλού πυκνωτή.

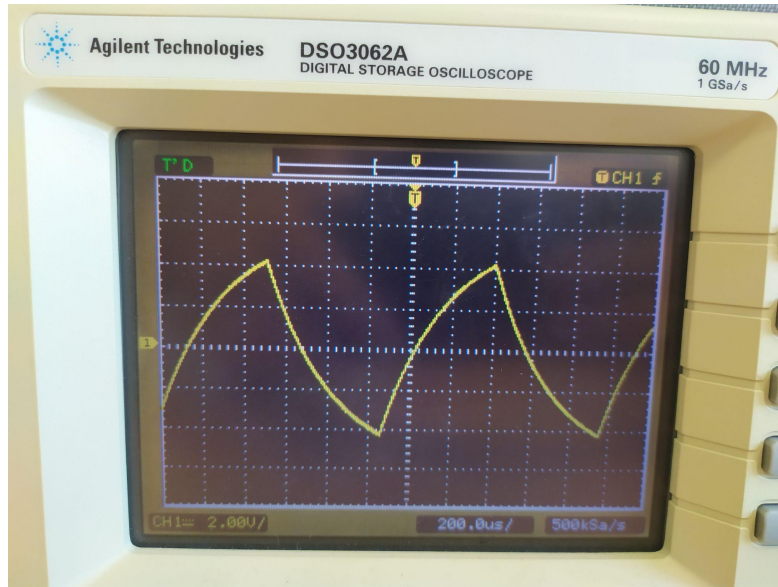
Η γεννήτρια ρυθμίζεται να δίνει την τροφοδοσία σε συχνότητα ίση με 1kHz και συγκεκριμένα δίνει σήμα παλμού συχνότητας 1kHz όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.2.

Στη συνδεσμολογία με την αντίσταση των 4.65kΩ, η ένδειξη του παλμογράφου ήταν η κάτωθι:



Σχήμα 6.3: Απόκριση του παλμογράφου για πυκνωτή 100nF σε σειρά με μία αντίσταση 4.65kΩ.

Στη συνδεσμολογία με την αντίσταση των 3.296kΩ, η ένδειξη του παλμογράφου ήταν η κάτωθι:

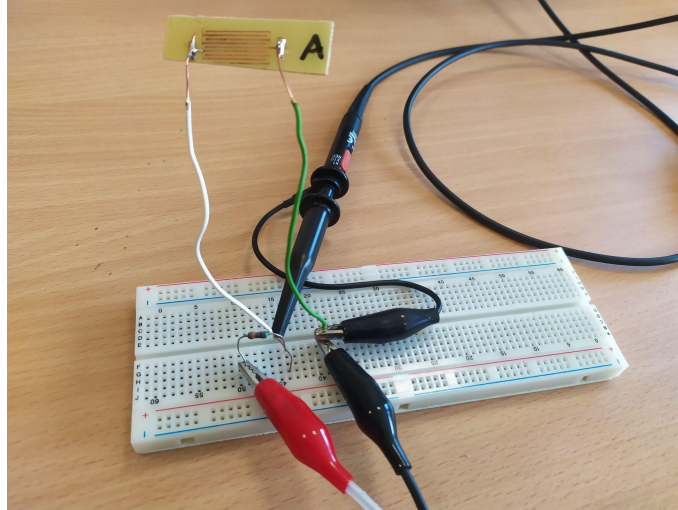


Σχήμα 6.4: Απόκριση του παλμογράφου για πυκνωτή 100nF σε σειρά με μία αντίσταση 3.296kΩ.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η ίδια διαδικασία με έναν πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων από το εργαστήριο, με την διαφορά εδώ ότι έγιναν μετρήσεις πριν και αφού εναποτεθεί μία σταγόνα απιονισμένου νερού στην επιφάνεια του πυκνωτή με σκοπό την παρακολούθηση της αλλαγής στην χωρητικότητά του.

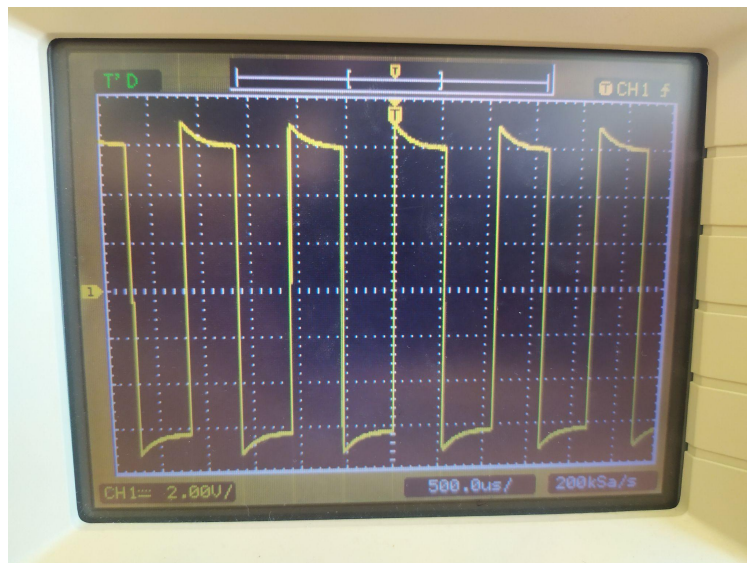
Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.5, ο πυκνωτής ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων συνδέεται σε σειρά με μία αντίσταση, και συγκεκριμένα μία φορά με μία αντίσταση των 4.653kΩ, μία των 464.7kΩ και μία των 3.296kΩ.

Στην αρχή φαίνεται η ένδειξη του παλμογράφου για τον πυκνωτή εν κενώ, δηλαδή χωρίς την εναπόθεση κάποιας ποσότητας δείγματος, και στη συνέχεια ακολουθεί η ένδειξη του παλμογράφου για τον πυκνωτή που στην επιφάνειά του έχει εναποτεθεί μία σταγόνα απιονισμένου νερού. Η εναπόθεση του απιονισμένου νερού έγινε με μία πιπέτα.



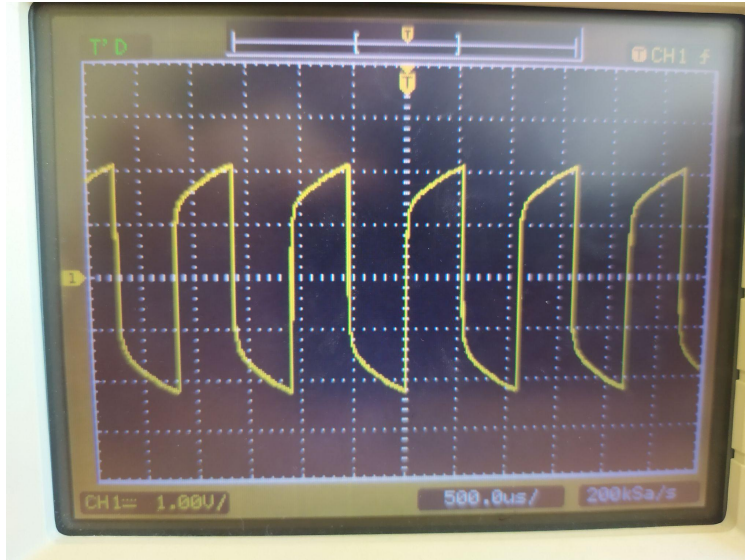
Σχήμα 6.5: Η συνδεσμολογία του κυκλώματος RC σε σειρά, επάνω στο breadboard.

Η απόκριση του παλμογράφου για τον πυκνωτή των ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων σε σειρά με την αντίσταση των $4.653\text{k}\Omega$ είναι η κάτωθι,



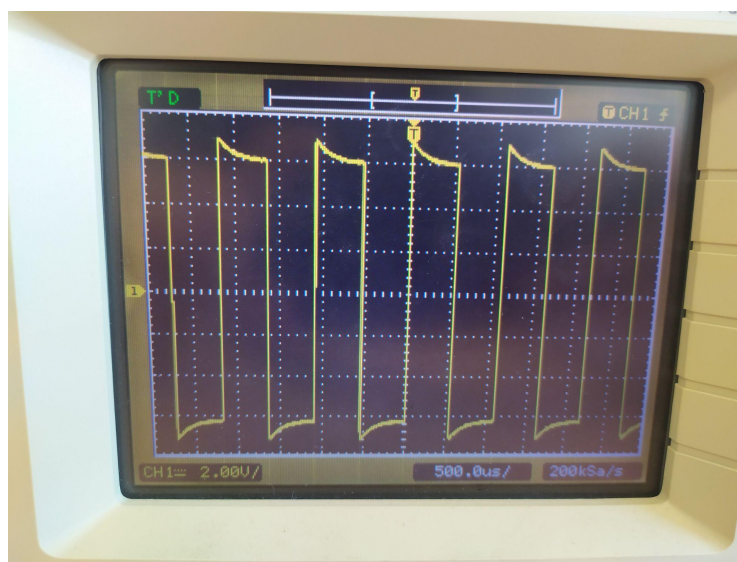
Σχήμα 6.6: Απόκριση του παλμογράφου για τον πυκνωτή των ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων εν κενώ σε σειρά με την αντίσταση των $4.653\text{k}\Omega$.

Και με μια σταγόνα απιονισμένο νερό είναι η κάτωθι,

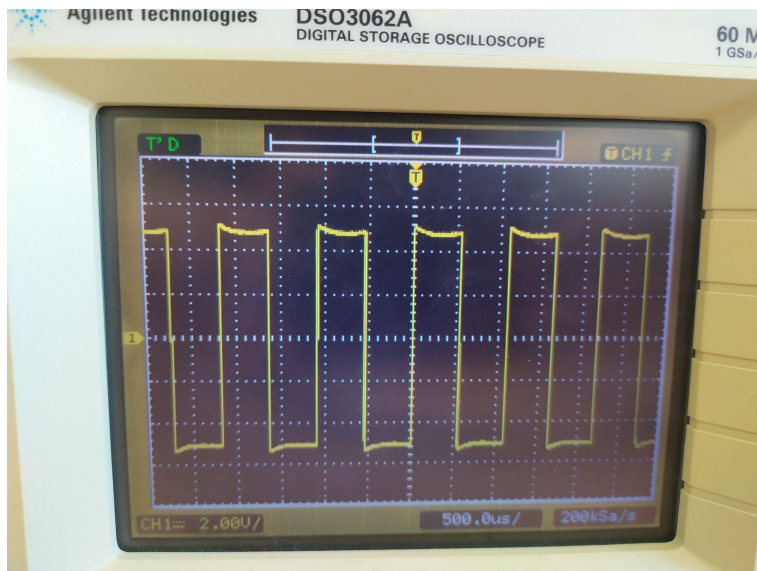


Σχήμα 6.7: Απόκριση του παλμογράφου για τον πυκνωτή των ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων με μία σταγόνα απιονισμένο νερό στην επιφάνειά του σε σειρά με την αντίσταση των $4.653\text{k}\Omega$.

Αλλάζοντας την αντίσταση των $4.653\text{k}\Omega$ και τοποθετώντας μία των $464.7\text{k}\Omega$, η απόκριση του παλμογράφου με και χωρίς ποσότητα απιονισμένου νερού στην επιφάνεια του πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 6.8: Απόκριση του παλμογράφου για τον πυκνωτή των ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων εν κενώ σε σειρά με την αντίσταση των $464.7\text{k}\Omega$.

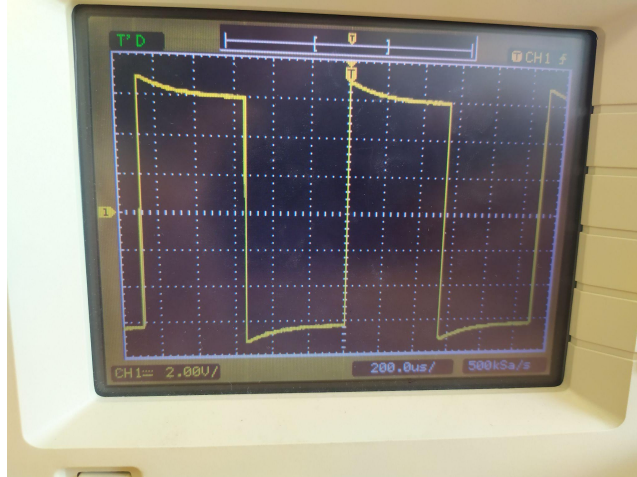


Σχήμα 6.9: Απόκριση του παλμογράφου για τον πυκνωτή των ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων με μία σταγόνα απιονισμένο νερό στην επιφάνειά του σε σειρά με την αντίσταση των 4.653kΩ.

Η τρίτη και τελευταία μέτρηση έγινε με την συνδεσμολογία του πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων σε σειρά με μία αντίσταση των 3.296kΩ.

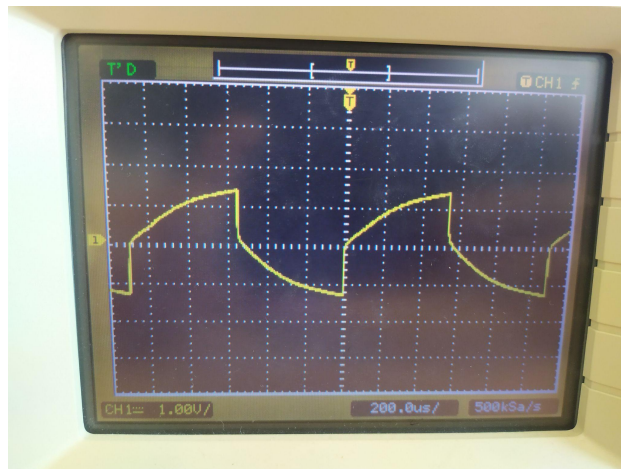
Πραγματοποιήθηκε επίσης μία απόπειρα για προσέγγιση της χωρητικότητας του πυκνωτή μέσω της μαθηματικής σχέσης για την σταθερά χρόνου ενός πυκνωτή⁹. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω.

⁹ Η σταθερά χρόνου (φόρτισης και εκφόρτισης) ενός πυκνωτή ισούται με $\tau=RC$ [25].



Σχήμα 6.10: Απόκριση του παλμογράφου για τον πυκνωτή των ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων εν κενώ σε σειρά με την αντίσταση των 3.296kΩ.

Με την βοήθεια του παλμογράφου έγινε μέτρηση της περιόδου του σήματος που προέκυψε, όταν τοποθετήθηκε ποσότητα απιονισμένου νερού στην επιφάνεια του πυκνωτή.



Σχήμα 6.11: Απόκριση του παλμογράφου για τον πυκνωτή των ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων με μία σταγόνα απιονισμένο νερό στην επιφάνειά του σε σειρά με την αντίσταση των 3.296kΩ.

Από την παραπάνω εικόνα φαίνεται η περίοδος ισούται με $Prd = 1.095ms$.

Όπως είναι γνωστό, η πλήρης εκφόρτιση του πυκνωτή απαιτεί χρόνο 5τ , δηλαδή 5 σταθερές χρόνου [40]. Από την παραπάνω εικόνα, παρατηρεί κανείς πως η εκφόρτιση του πυκνωτή χρειάζεται:

$$(2 + \frac{3}{5}) \text{ div} \cdot 200\mu\text{s/div} = 520\mu\text{s} \Rightarrow$$

$$5\tau = 520\mu\text{s} \Rightarrow$$

$$\tau = 104\mu\text{s}$$

Όμως, από τον ορισμό της σταθεράς χρόνου των σχέσεων (3-1) και (3-2) προκύπτει:

$$C \simeq 32\text{nF}$$

Δηλαδή, προσεγγιστικά η χωρητικότητα του πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων με μία σταγόνα απιονισμένο νερό ισούται με 32nF, υπολογισμένη με την βοήθεια της απόκρισης στον παλμογράφο. Ωστόσο, για επιβεβαίωση της τάξης των nF για την συγκεκριμένη χωρητικότητα, χρησιμοποιήθηκε και ο μετρητής LCR, του οποίου η ένδειξη όταν συνδέθηκε ο πυκνωτής στα άκρα του ήταν 45nF, κοντινή τιμή με την υπολογισμένη από πριν. Είναι αρκετά σημαντική η γνώση της τάξης της χωρητικότητας του πυκνωτή με εναποθετημένη ποσότητα απιονισμένου νερού, καθώς το κύκλωμα ανάγνωσης στη συνέχεια θα κατασκευαστεί με βάση αυτές τις τιμές.

6.1 Κύκλωμα LC

Σκοπός του πειράματος είναι μέσω ενός κυκλώματος RLC (ή και LC), να είναι εμφανής η συχνότητα συντονισμού, η οποία θα συμφωνεί προσεγγιστικά με τους θεωρητικούς υπολογισμούς με απώτερο στόχο την διάκριση εάν η ποσότητα που εναποτίθεται επάνω στον πυκνωτή έχει σωματίδια SARS-CoV-2 ή όχι. Προφανώς, η συχνότητα συντονισμού αλλάζει αναλογα με την περιεκτικότητά του σε SARS-CoV-2.

6.1.1 Πειραματικές Μετρήσεις με συμβατικούς πυκνωτές

Για αρχή οι θεωρητικοί και οι πειραματικοί υπολογισμοί έγιναν πάνω σε συμβατικούς πυκνωτές σε συνδεσμολογία παράλληλη με πηνίο, ώστε να είναι κατανοητό το φαινόμενο του συντονισμού. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν πυκνωτές των 2nF και των 10nF, και πηνία των 110μH και των 12mH, για να δοθεί ένα ευρύ φάσμα αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων.

6.1.1.1 Θεωρητικός υπολογισμός της συχνότητας συντονισμού για LC κύκλωμα με πυκνωτή 10nF παράλληλο σε πηνίο 12mH

Όπως αναφέρθηκε και στο θεωρητικό μέρος, η συχνότητα συντονισμού περιγράφεται μαθηματικά ως εξής:

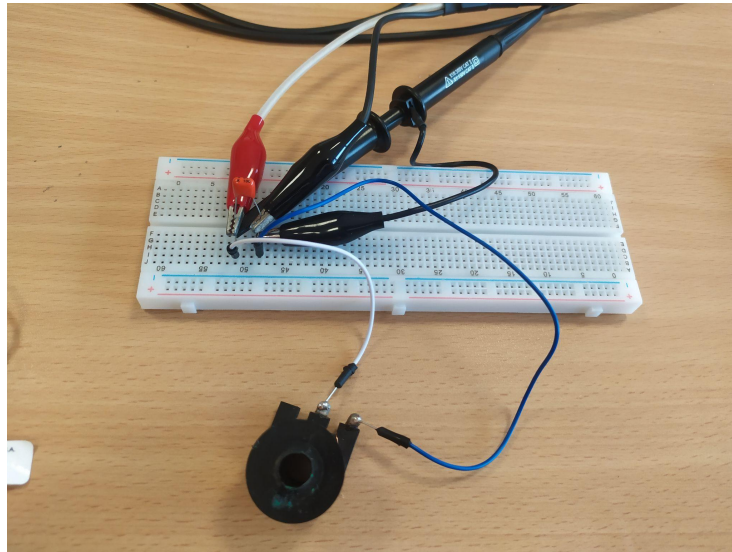
$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \text{ (Hz)} \quad (6-1)$$

Συνεπώς, η συχνότητα συντονισμού για ένα LC κύκλωμα με πυκνωτή 10nF παράλληλο σε πηνίο 12mH είναι σύμφωνα με την σχέση (6-1):

$$f \simeq 14.5 \text{ kHz}$$

6.1.1.2 Πειραματικός υπολογισμός της συχνότητας συντονισμού για LC κύκλωμα με πυκνωτή 10nF παράλληλο σε πηνίο 12mH

Η συνδεσμολογία όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.12 περιλαμβάνει τον πυκνωτή των 10nF εν παραλλήλω με ένα πηνίο των 12mH. Η γεννήτρια τροφοδοτεί με ημιτονοειδές σήμα 5V. Οι ακροδέκτες της γεννήτριας είναι συνδεδεμένοι στα άκρα του πυκνωτή, καθώς και η ανάγνωση από τον παλμογράφο γίνεται πάλι μέσω των ακροδεκτών του παλμογράφου στα άκρα του πυκνωτή.

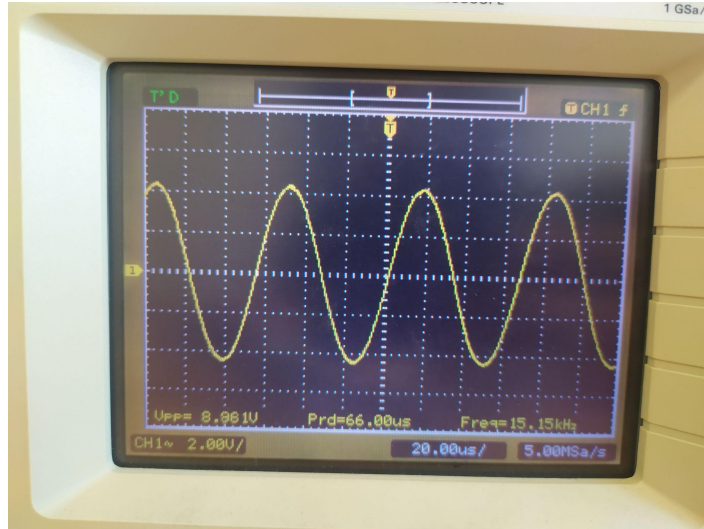


Σχήμα 6.12: LC κύκλωμα με πυκνωτή 10nF παράλληλο σε πηνίο 12mH πάνω σε breadboard.

Με αρχική συχνότητα 15Hz η οποία αυξάνεται σταδιακά, καταγράφηκαν κάποιες μετρήσεις σχετικά με την τάση V_{pp} στα άκρα του πυκνωτή και κατόπιν σχεδιάστηκαν σε γραφική παράσταση¹⁰.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα από τον παλμογράφο αλλά και στις παρακάτω μετρήσεις το κύκλωμα έχει μέγιστη τάση 8.961V V_{pp} γύρω στα 15-20kHz, δηλαδή κοντά στη συχνότητα συντονισμού που υπολογίστηκε θεωρητικά προηγουμένως.

¹⁰ Λόγω του μεγάλου εύρους συχνοτήτων (από Hz έως και MHz) χρησιμοποιήθηκε λογαριθμική κλίμακα για τον άξονα των συχνοτήτων.



Σχήμα 6.13: Η μέγιστη τάση που δίνει το εν παραλλήλω κύκλωμα LC με $L=12\text{mH}$ και $C=10\text{nF}$ είναι $V_{pp}=8.961\text{V}$ σε συχνότητα $F=15.15\text{kHz}$.

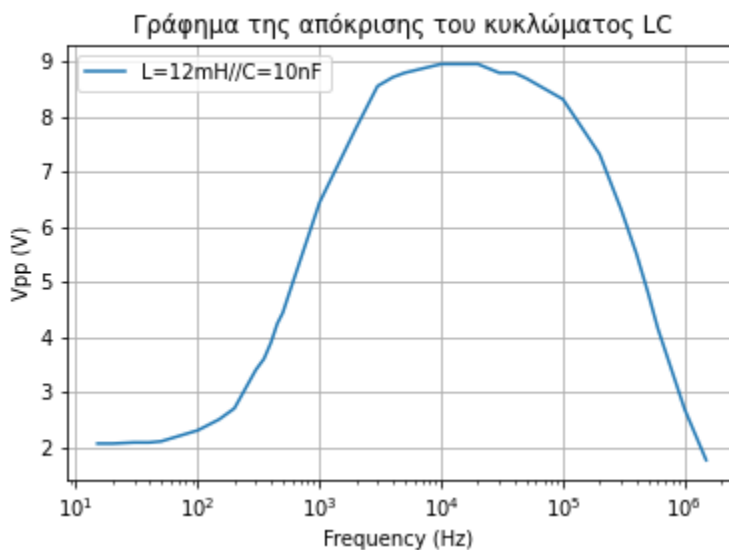
Παρακάτω φαίνεται ο πίνακας των τιμών που λήφθηκαν και καταγράφηκαν.

Πίνακας 6.1: Μετρήσεις από το εν παραλλήλω κύκλωμα LC με $L=12\text{mH}$ και $C=10\text{nF}$.

Συχνότητα (Hz)	V_{pp} (V)	Συχνότητα (Hz)	V_{pp} (V)
15	2.06	5000	8.8
20	2.06	10000	8.96
30	2.08	12000	8.96
40	2.08	13000	8.96
50	2.1	14000	8.96
100	2.3	15000	8.96
150	2.5	20000	8.96
200	2.7	30000	8.8
300	3.4	40000	8.8

Πίνακας 6.1: (Συνέχεια).

Συχνότητα (Hz)	Vpp (V)	Συχνότητα (Hz)	Vpp (V)
350	3.6	50000	8.7
400	3.9	100000	8.32
450	4.24	200000	7.32
500	4.44	300000	6.32
550	4.72	400000	5.52
1000	6.44	500000	4.8
2000	7.8	600000	4.16
3000	8.56	1000000	2.68
4000	8.72	1500000	1.76



Σχήμα 6.14: Γραφική Παράσταση του εν παραλλήλω κυκλώματος LC με $L=12\text{mH}$ και $C=10\text{nF}$, η συχνότητα είναι σε λογαριθμική κλίμακα μέσω του Jupyter notebook περιβάλλοντος, Google Colaboratory.

Η αντίστοιχη γραφική παράσταση είναι η άνωθι. Στον οριζόντιο άξονα είναι οι τιμές των συχνοτήτων και στον κατακόρυφο της τάσης V_{pp} , όπως φαινόταν από τον παλμογράφο. Λόγω του μεγάλου εύρους συχνοτήτων χρησιμοποιήθηκε λογαριθμική κλίμακα για τον οριζόντιο άξονα.

6.1.1.3 Θεωρητικός υπολογισμός της συχνότητας συντονισμού για LC κύκλωμα με πυκνωτή 2nF παράλληλο σε πηνίο 12mH

Σύμφωνα με την σχέση (6-1), η συχνότητα συντονισμού για ένα LC κύκλωμα με πυκνωτή 2nF παράλληλο σε πηνίο 12mH είναι:

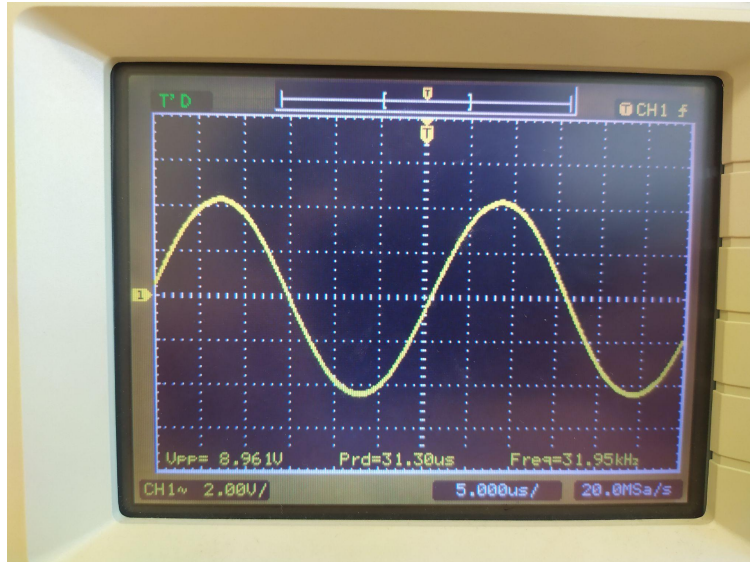
$$f \simeq 32.5kHz$$

6.1.1.4 Πειραματικός υπολογισμός της συχνότητας συντονισμού για LC κύκλωμα με πυκνωτή 2nF παράλληλο σε πηνίο 12mH

Η συνδεσμολογία όπως φαίνεται και στην εικόνα περιλαμβάνει τον πυκνωτή των 2nF εν παραλλήλω με ένα πηνίο των 12mH. Η γεννήτρια τροφοδοτεί με ημιτονοειδές σήμα 5V. Οι ακροδέκτες της γεννήτριας είναι συνδεδεμένοι στα άκρα του πυκνωτή, καθώς και η ανάγνωση από τον παλμογράφο γίνεται πάλι μέσω των ακροδεκτών του παλμογράφου στα άκρα του πυκνωτή.

Με αρχή μία συχνότητα 15Hz η οποία αυξάνεται σταδιακά, καταγράφηκαν κάποιες μετρήσεις σχετικά με την τάση V_{pp} στα άκρα του πυκνωτή και κατόπιν σχεδιάστηκαν σε γραφική παράσταση. Λόγω του μεγάλου εύρους συχνοτήτων (από Hz έως και MHz) χρησιμοποιήθηκε λογαριθμική κλίμακα για τον άξονα των συχνοτήτων.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα από τον παλμογράφο αλλά και στις παρακάτω μετρήσεις το κύκλωμα έχει μέγιστη τάση 8.96V V_{pp} γύρω στα 30kHz, δηλαδή κοντά στη συχνότητα συντονισμού που υπολογίστηκε θεωρητικά προηγουμένως.



Σχήμα 6.15: Η μέγιστη τάση που δίνει το εν παραλλήλω κύκλωμα LC με $L=12\text{mH}$ και $C=2\text{nF}$ είναι $V_{pp}=8.961\text{V}$ σε συχνότητα $f=31.95\text{kHz}$.

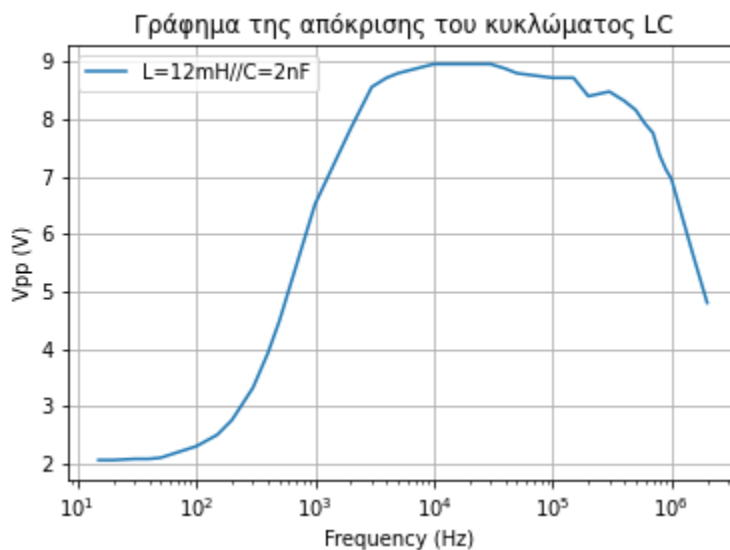
Παρακάτω φαίνεται ο πίνακας των τιμών που λήφθηκαν και καταγράφηκαν.

Πίνακας 6.2: Μετρήσεις από το εν παραλλήλω LC κύκλωμα με $L=12\text{mH}$ και $C=2\text{nF}$.

Συχνότητα (Hz)	V_{pp} (V)	Συχνότητα (Hz)	V_{pp} (V)
15	2.06	20000	8.96
20	2.06	30000	8.96
30	2.08	40000	8.88
40	2.08	50000	8.8
50	2.1	100000	8.72
100	2.3	150000	8.72
150	2.5	200000	8.4
200	2.76	300000	8.48
300	3.32	400000	8.32

Πίνακας 6.2: (Συνέχεια).

Συχνότητα (Hz)	V _{pp} (V)	Συχνότητα (Hz)	V _{pp} (V)
400	3.92	500000	8.16
500	4.48	600000	7.92
1000	6.52	700000	7.76
2000	7.84	800000	7.36
3000	8.56	900000	7.12
4000	8.72	1000000	6.96
5000	8.8	1500000	5.68
10000	8.96	2000000	4.8

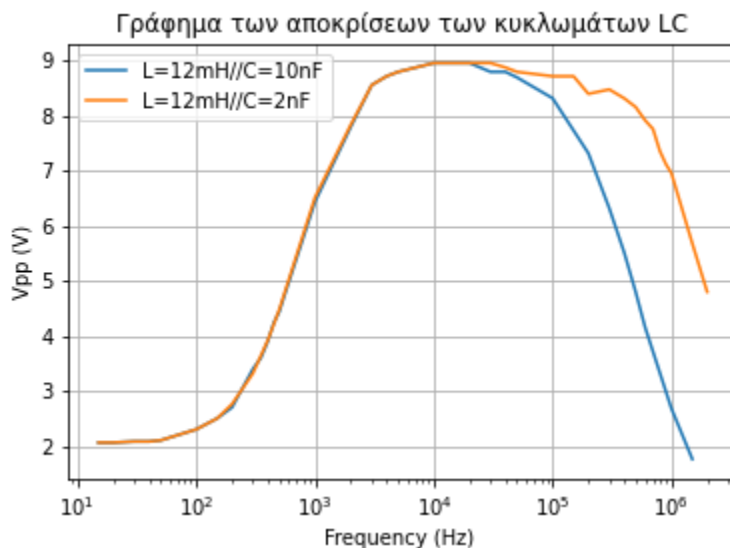


Σχήμα 6.16: Γραφική Παράσταση του εν παραλλήλω κυκλώματος LC με L=12mH και C=2nF, η συχνότητα είναι σε λογαριθμική κλίμακα μέσω του Jupyter notebook περιβάλλοντος, Google Colaboratory.

Η αντίστοιχη γραφική παράσταση είναι η άνωθι. Στον οριζόντιο άξονα είναι οι τιμές των συχνοτήτων και στον κατακόρυφο της τάσης V_{pp} όπως φαινόταν από τον παλμογράφο.

Λόγω του μεγάλου εύρους συχνοτήτων χρησιμοποιήθηκε λογαριθμική κλίμακα για τον οριζόντιο άξονα.

Παρακάτω, σχεδιάστηκε ένα γράφημα στο οποίο παρουσιάζονται οι δύο καμπύλες που αφορούν τους δύο πυκνωτές 2nF και 10nF αντίστοιχα παράλληλους στο πηνίο των 12mH. Φαίνεται πως τα κυκλώματα δίνουν παρόμοιες αποκρίσεις μέχρι να φτάσουν την συχνότητα συντονισμού ωστόσο, στην πορεία είναι εμφανής ο διαχωρισμός τους αφού το κύκλωμα με την μεγαλύτερη χωρητικότητα (δηλαδή των 10nF - μπλε καμπύλη) έχει απόκριση η οποία “πέφτει πιο γρήγορα” σε σχέση με το κύκλωμα με την μικρότερη χωρητικότητα (δηλαδή των 2nF - πορτοκαλί καμπύλη). Μία παρόμοια συμπεριφορά στην απόκριση θα φανεί και στη συνέχεια με τους δύο πυκνωτές παράλληλους στο πηνίο των 110μH.



Σχήμα 6.17: Γραφική Παράσταση του εν παραλλήλω κυκλώματος LC με $L=12mH$ και $C=2nF$, η συχνότητα είναι σε λογαριθμική κλίμακα μέσω του Jupyter notebook περιβάλλοντος, Google Colaboratory.

Στη συνέχεια, ακολουθεί η ίδια διαδικασία των μετρήσεων με αντικατάσταση του πηνίου των 12mH με ένα πηνίο των 110μH.

6.1.1.5 Θεωρητικός υπολογισμός της συχνότητας συντονισμού για LC κύκλωμα με πυκνωτή 10nF παράλληλο σε πηνίο 110μH

Σύμφωνα με την σχέση (6-1), η συχνότητα συντονισμού για ένα LC κύκλωμα με πυκνωτή 10nF παράλληλο σε πηνίο 100μH είναι:

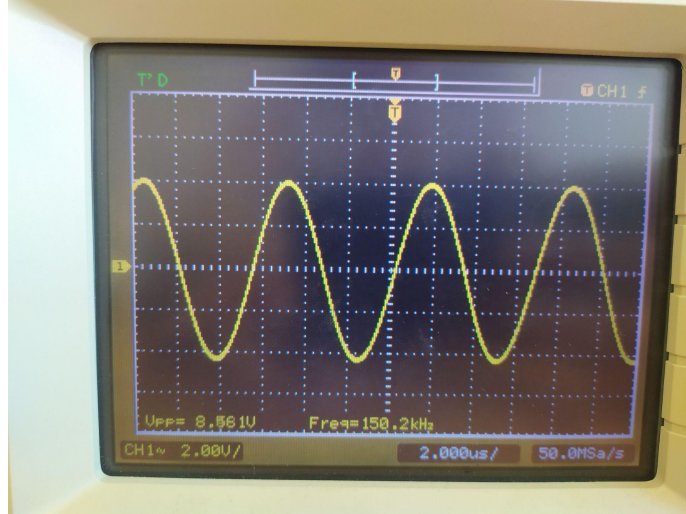
$$f \approx 152kHz$$

6.1.1.6 Πειραματικός υπολογισμός της συχνότητας συντονισμού για LC κύκλωμα με πυκνωτή 10nF παράλληλο σε πηνίο 110μH

Η συνδεσμολογία περιλαμβάνει τον πυκνωτή των 10nF εν παραλλήλω με ένα πηνίο των 110μH. Η γεννήτρια τροφοδοτεί με ημιτονοειδές σήμα 5V. Οι ακροδέκτες της γεννήτριας είναι συνδεδεμένοι στα άκρα του πυκνωτή, καθώς και η ανάγνωση από τον παλμογράφο γίνεται μέσω των ακροδεκτών του παλμογράφου στα άκρα του πυκνωτή.

Με αρχική συχνότητα 5kHz η οποία αυξάνεται σταδιακά, καταγράφηκαν κάποιες μετρήσεις σχετικά με την τάση V_{pp} στα άκρα του πυκνωτή και κατόπιν σχεδιάστηκαν σε γραφική παράσταση. Λόγω του μεγάλου εύρους συχνοτήτων (από Hz έως και MHz) χρησιμοποιήθηκε λογαριθμική κλίμακα για τον άξονα των συχνοτήτων. Παρατηρήθηκε ότι για συχνότητες κάτω των 6kHz οι μετρήσεις δεν ήταν ξεκάθαρες καθώς υπήρχε θόρυβος.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα από τον παλμογράφο αλλά και στις παρακάτω μετρήσεις το κύκλωμα έχει μέγιστη τάση 8.56V V_{pp} γύρω στα 140-170kHz, δηλαδή κοντά στη συχνότητα συντονισμού που υπολογίστηκε θεωρητικά προηγουμένως.



Σχήμα 6.18: Η μέγιστη τάση που δίνει το εν παραλλήλω κύκλωμα LC με $L=100\mu\text{H}$ και $C=10\text{nF}$ είναι $V_{pp}=8.56\text{V}$ σε συχνότητα $f=150.2\text{kHz}$.

Παρακάτω φαίνεται ο πίνακας των τιμών που λήφθηκαν και καταγράφηκαν.

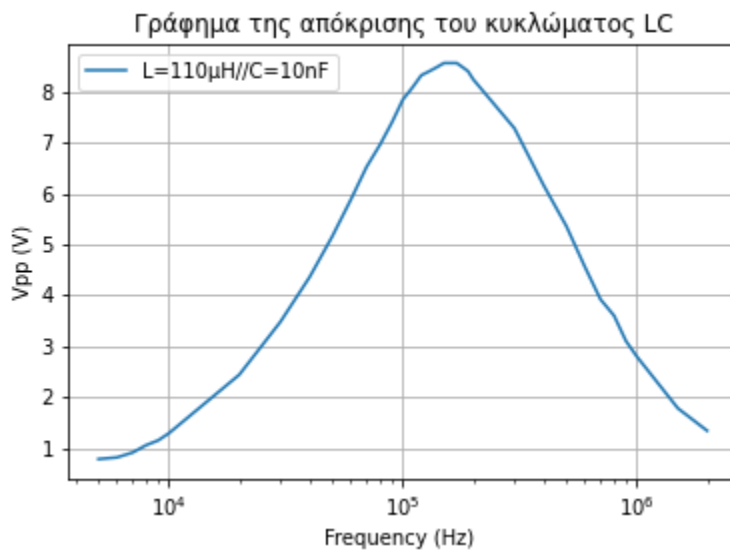
Πίνακας 6.3: Μετρήσεις από το εν παραλλήλω κύκλωμα LC με $L=110\mu\text{H}$ και $C=10\text{nF}$.

Συχνότητα (Hz)	Vpp (V)	Συχνότητα (Hz)	Vpp (V)
5000	0.784	140000	8.48
6000	0.816	150000	8.56
7000	0.912	160000	8.56
8000	1.057	170000	8.56
9000	1.15	180000	8.48
10000	1.29	190000	8.4
20000	2.44	200000	8.24
30000	3.48	300000	7.28
40000	4.36	400000	6.16
50000	5.16	500000	5.36

Πίνακας 6.3: (Συνέχεια)

Συχνότητα (Hz)	Vpp (V)	Συχνότητα (Hz)	Vpp (V)
60000	5.88	600000	4.56
70000	6.52	700000	3.92
80000	6.96	800000	3.6
90000	7.4	900000	3.1
100000	7.84	1000000	2.8
110000	8.08	1500000	1.78
120000	8.32	2000000	1.34
130000	8.4		

Η αντίστοιχη γραφική παράσταση είναι η κάτωθι. Στον οριζόντιο άξονα είναι οι τιμές των συχνοτήτων και στον κατακόρυφο της τάσης Vpp όπως φαινόταν από τον παλμογράφο. Λόγω του μεγάλου εύρους συχνοτήτων χρησιμοποιήθηκε λογαριθμική κλίμακα για τον οριζόντιο άξονα.



Σχήμα 6.19: Γραφική Παράσταση του εν παραλλήλω κυκλώματος LC με $L=110\mu\text{H}$ και $C=10\text{nF}$, η συχνότητα είναι σε λογαριθμική κλίμακα μέσω του Jupyter notebook περιβάλλοντος, Google Colaboratory.

6.1.1.7 Θεωρητικός υπολογισμός της συχνότητας συντονισμού για LC κύκλωμα με πυκνωτή 2nF παράλληλο σε πηνίο $110\mu\text{H}$

Σύμφωνα με την σχέση (6-1), η συχνότητα συντονισμού για ένα LC κύκλωμα με πυκνωτή 2nF παράλληλο σε πηνίο $110\mu\text{H}$ είναι:

$$f \approx 340\text{kHz}$$

6.1.1.8 Πειραματικός υπολογισμός της συχνότητας συντονισμού για LC κύκλωμα με πυκνωτή 2nF παράλληλο σε πηνίο $110\mu\text{H}$

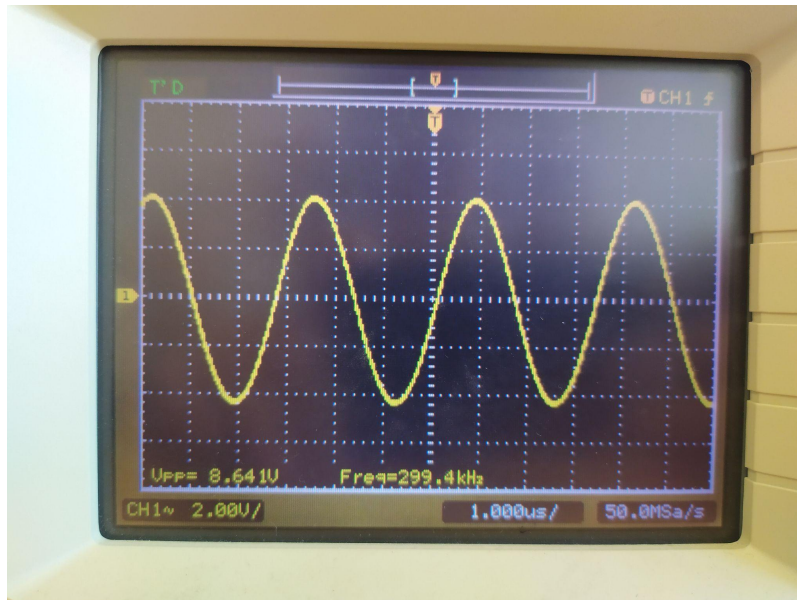
Η συνδεσμολογία περιλαμβάνει τον πυκνωτή των 2nF εν παραλλήλω με ένα πηνίο των $110\mu\text{H}$. Η γεννήτρια τροφοδοτεί με ημιτονοειδές σήμα 5V . Οι ακροδέκτες της γεννήτριας είναι συνδεδεμένοι στα άκρα του πυκνωτή, καθώς και η ανάγνωση από τον παλμογράφο γίνεται πάλι μέσω των ακροδεκτών του παλμογράφου στα άκρα του πυκνωτή.

Με αρχική συχνότητα 6kHz ¹¹ η οποία αυξάνεται σταδιακά, καταγράφηκαν κάποιες μετρήσεις σχετικά με την τάση V_{pp} στα άκρα του πυκνωτή και κατόπιν σχεδιάστηκαν σε γραφική παράσταση¹².

¹¹ Παρατηρήθηκε ότι για συχνότητες κάτω των 6kHz οι μετρήσεις δεν ήταν ξεκάθαρες καθώς υπήρχε θόρυβος.

¹² Λόγω του μεγάλου εύρους συχνοτήτων (από Hz έως και MHz) χρησιμοποιήθηκε λογαριθμική κλίμακα για τον άξονα των συχνοτήτων.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα από τον παλμογράφο το κύκλωμα έχει μέγιστη τάση 8.644V V_{pp} γύρω στα 300kHz, δηλαδή κοντά στη συχνότητα συντονισμού που υπολογίστηκε θεωρητικά προηγουμένως.



Σχήμα 6.20: Η μέγιστη τάση που δίνει το εν παραλλήλω κύκλωμα LC με $L=100\mu\text{H}$ και $C=2\text{nF}$ είναι $V_{pp}=8.64\text{V}$ σε συχνότητα $F=299.4\text{kHz}$.

Παρακάτω φαίνεται ο πίνακας των τιμών που λήφθηκαν και καταγράφηκαν.

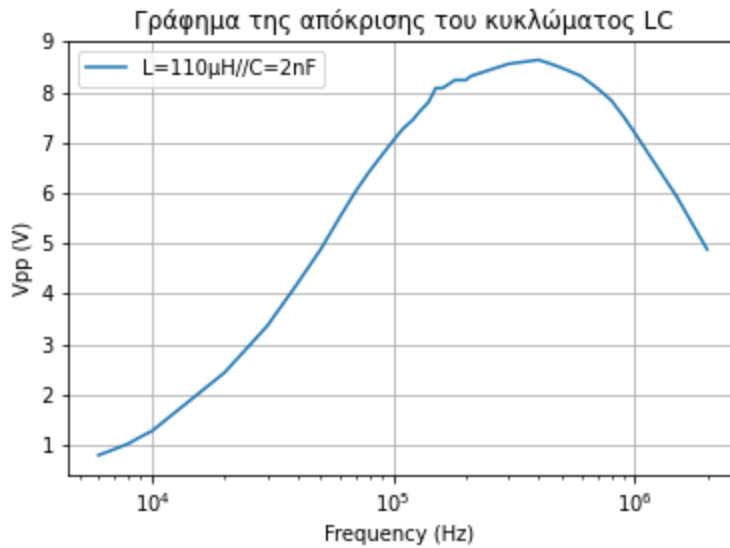
Πίνακας 6.4: Μετρήσεις από το εν παραλλήλω κύκλωμα LC με $L=110\mu\text{H}$ και $C=2\text{nF}$.

Συχνότητα (Hz)	V _{pp} (V)	Συχνότητα (Hz)	V _{pp} (V)
6000	0.8	150000	8.08
7000	0.92	160000	8.08
8000	1.033	170000	8.16
9000	1.169	180000	8.24
10000	1.28	190000	8.24
20000	2.44	200000	8.24

Πίνακας 6.4: (Συνέχεια)

Συχνότητα (Hz)	V_{pp} (V)	Συχνότητα (Hz)	V_{pp} (V)
30000	3.36	210000	8.32
40000	4.2	300000	8.56
50000	4.88	400000	8.64
60000	5.52	450000	8.56
70000	6.04	500000	8.48
80000	6.44	600000	8.32
90000	6.76	700000	8.08
100000	7.04	800000	7.84
110000	7.28	900000	7.52
120000	7.44	1000000	7.2
130000	7.64	1500000	5.92
140000	7.8	2000000	4.88

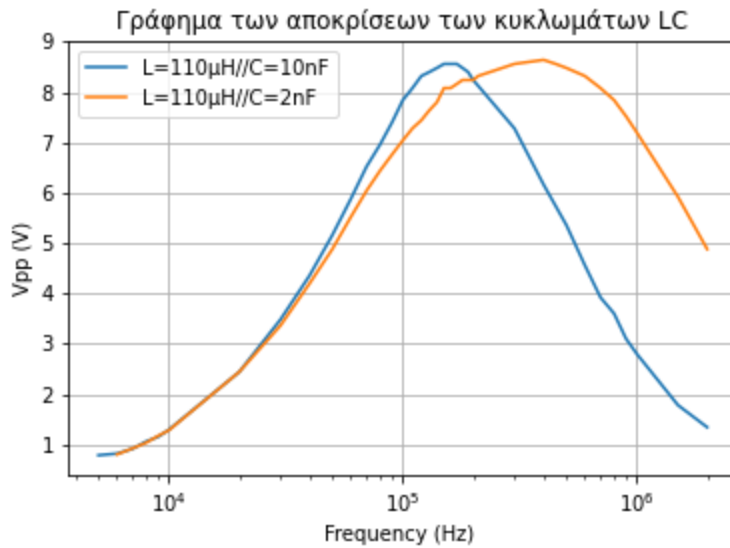
Η αντίστοιχη γραφική παράσταση είναι η άνωθι. Στον οριζόντιο άξονα είναι οι τιμές των συχνοτήτων και στον κατακόρυφο της τάσης V_{pp} όπως φαινόταν από τον παλμογράφο. Λόγω του μεγάλου εύρους συχνοτήτων χρησιμοποιήθηκε λογαριθμική κλίμακα για τον οριζόντιο άξονα.



Σχήμα 6.21: Γραφική Παράσταση του εν παραλλήλω κυκλώματος LC με $L=110\mu\text{H}$ και $C=2\text{nF}$, η συχνότητα είναι σε λογαριθμική κλίμακα μέσω του Jupyter notebook περιβάλλοντος, Google Colaboratory.

Παρακάτω, σχεδιάστηκε ένα γράφημα στο οποίο παρουσιάζονται οι δύο καμπύλες που αφορούν τους δύο πυκνωτές 2nF και 10nF αντίστοιχα παράλληλους στο πηνίο των $110\mu\text{H}$.

Είναι ευδιάκριτο ότι τα δύο κυκλώματα έχουν διαφορετικές συχνότητες συντονισμού, καθώς και ότι το κύκλωμα με την μεγαλύτερη χωρητικότητα (δηλαδή των 10nF - μπλε καμπύλη) έχει απόκριση η οποία “πέφτει πιο γρήγορα” σε σχέση με το κύκλωμα με την μικρότερη χωρητικότητα (δηλαδή των 2nF - πορτοκαλί καμπύλη).



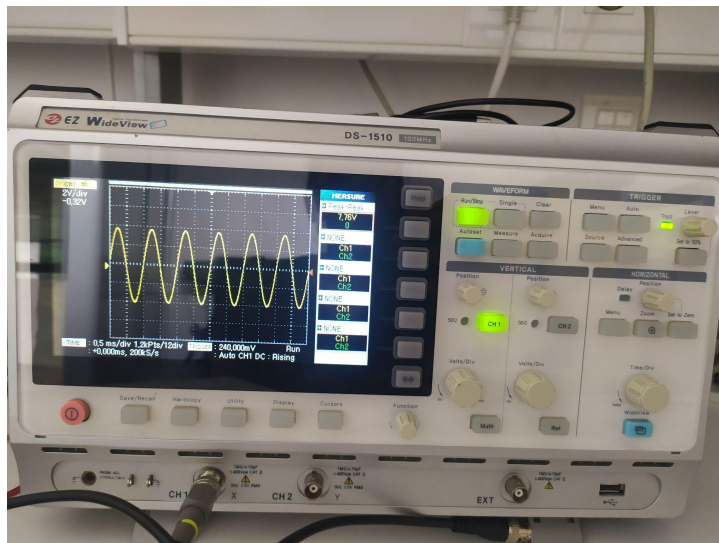
Σχήμα 6.22: Γραφική Παράσταση του εν παραλλήλω κυκλώματος LC με $L=110\mu\text{H}$ και $C=2\text{nF}$, η συχνότητα είναι σε λογαριθμική κλίμακα μέσω του Jupyter notebook περιβάλλοντος, Google Colaboratory.

6.1.2 Πειραματικές Μετρήσεις με τον πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων

Στη συνέχεια, έγιναν κάποιες μετρήσεις σχετικά με ένα LC κύκλωμα στο οποίο ο πυκνωτής πλέον ήταν ο πυκνωτής ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο παράλληλος με το πηνίο των 12mH. Η διάταξη ήταν εν παραλλήλω. Οι συγκεκριμένες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με την βοήθεια ενός παλμογράφου¹³ και μιας γεννήτριας¹⁴ του Εργαστηρίου Αισθητήρων, τα οποία εμφανίζονται και στις παρακάτω εικόνες. Στόχος αυτής της διαδικασίας ήταν μέσω του υπολογισμού της συχνότητας συντονισμού του κυκλώματος να ήταν φανερή η αλλαγή της χωρητικότητας του πυκνωτή όταν εναποτεθεί μικρή ποσότητα απιονισμένου νερού στην επιφάνειά του.

¹³ Το μοντέλο του παλμογράφου ονομάζεται EZ WideView TM DS -1500 Series.

¹⁴ Το μοντέλο της γεννήτριας ονομάζεται 33220A Function / Arbitrary Waveform Generator, 20 MHz, Agilent.



Σχήμα 6.23: Παλμογράφος του Εργαστηρίου Ηλεκτρονικών Αισθητηρίων ρυθμισμένος να δίνει ένδειξη στο κανάλι 1.



Σχήμα 6.24: Γεννήτρια του Εργαστηρίου Ηλεκτρονικών Αισθητηρίων ρυθμισμένη να τροφοδοτεί το κύκλωμα με ημιτονοειδές σήμα πλάτους 5V.

Ο πυκνωτής που θα χρησιμοποιήθηκε για όλα τα πειράματα είναι ο συγκεκριμένος πυκνωτής¹⁵ που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο και που φαίνεται στο Σχήμα 5.6.

¹⁵ Να σημειωθεί ότι ο πυκνωτής είναι κατασκευασμένος από χαλκό, με αποτέλεσμα να παρατηρείται οξείδωση με το πέρασμα των ημερών, κάτι που συμβάλλει στην αλλοίωση των μετρήσεων.

Με τη βοήθεια του LCR, μετρήθηκε η χωρητικότητα του πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων, και συγκεκριμένα ένα ενδεικτικό εύρος χωρητικοτήτων, με και χωρίς ποσότητα απιονισμένου νερού. Χωρίς ποσότητα, δηλαδή εν κενώ, η χωρητικότητα του πυκνωτή είναι της τάξης των pF, και συγκεκριμένα περίπου ίση με 0.2pF, ενώ με μία σταγόνα απιονισμένου νερού στην επιφάνειά του κυμαίνεται στα 10-15nF¹⁶, δηλαδή ανεβαίνει μία τάξη μεγέθους.

6.1.2.1 Θεωρητικός υπολογισμός της συχνότητας συντονισμού για LC κύκλωμα με πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων παράλληλο σε πηνίο 12mH

Σύμφωνα με την σχέση (6-1), η συχνότητα συντονισμού για ένα LC κύκλωμα με τον εν λόγω πυκνωτή εν κενώ (δηλαδή χωρητικότητας 0.2pF) παράλληλο σε πηνίο 12mH είναι:

$$f \simeq 3.2MHz$$

Μετά την εναπόθεση ποσότητας απιονισμένου νερού ο πυκνωτής έχει ένα εύρος χωρητικοτήτων γύρω στα 10-15nF. Για τον θεωρητικό υπολογισμό θα ληφθούν υπόψιν οι δύο ακραίες τιμές.

Σύμφωνα με την σχέση (6-1), για χωρητικότητα ίση με 10nF:

$$f \simeq 15kHz$$

και για χωρητικότητα ίση με 15nF:

$$f \simeq 12kHz$$

¹⁶ Αναλόγως της έκτασης της σταγόνας και εάν εξαπλωθεί σε όλη την επιφάνεια του πυκνωτή ή παραμείνει στο κέντρο αλλάζει και η χωρητικότητα. Το σημαντικό είναι ότι παραμένει στην τάξη των nF.

6.1.2.2 Πειραματικός υπολογισμός της συχνότητας συντονισμού για LC κύκλωμα με πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων παράλληλο σε πηνίο 12mH

Η συνδεσμολογία περιλαμβάνει τον πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων εν παραλλήλω με ένα πηνίο των 12mH. Η γεννήτρια τροφοδοτεί με ημιτονοειδές σήμα 5V σε ένα εύρος συχνοτήτων 10Hz έως 2MHz. Οι ακροδέκτες της γεννήτριας είναι συνδεδεμένοι στα άκρα του πυκνωτή, καθώς και η ανάγνωση από τον παλμογράφο γίνεται πάλι μέσω των ακροδεκτών του παλμογράφου στα άκρα του πυκνωτή.

Με αρχική συχνότητα 10Hz η οποία αυξάνεται σταδιακά, καταγράφηκαν κάποιες μετρήσεις σχετικά με την τάση V_{pp} στα άκρα του πυκνωτή και κατόπιν σχεδιάστηκαν σε γραφική παράσταση¹⁷.

Παρακάτω φαίνεται ο πίνακας των τιμών που λήφθηκαν και καταγράφηκαν τόσο για τον πυκνωτή εν κενώ (χωρητικότητας 0.2pF), όσο και για τον πυκνωτή με μικρή ποσότητα απιονισμένου νερού (χωρητικότητας 10-15nF).

Πίνακας 6.5: Μετρήσεις από το εν παραλλήλω κύκλωμα LC με $L=12mH$ και $C=0.2pF$.

Συχνότητα (Hz)	V_{pp} (V)	Συχνότητα (Hz)	V_{pp} (V)	Συχνότητα (Hz)	V_{pp} (V)	Συχνότητα (Hz)	V_{pp} (V)
10	0.2	1500	8.8	50000	10.08	400000	9.84
100	2.76	2000	9.32	60000	10.08	450000	9.84
150	3	2500	9.56	70000	10.08	500000	9.84
200	3.34	3000	9.72	80000	10.08	600000	9.84
250	3.66	3500	9.8	90000	10.08	700000	9.84

¹⁷ Λόγω του μεγάλου εύρους συχνοτήτων (από Hz έως και MHz) χρησιμοποιήθηκε λογαριθμική κλίμακα για τον άξονα των συχνοτήτων.

Πίνακας 6.5: (Συνέχεια)

Συχνότητα (Hz)	V _{pp} (V)	Συχνότητα (Hz)	V _{pp} (V)	Συχνότητα (Hz)	V _{pp} (V)	Συχνότητα (Hz)	V _{pp} (V)
300	4.02	4000	9.92	100000	10.08	800000	9.84
350	4.4	4500	10	110000	10	1000000	9.92
400	4.74	5000	10.08	120000	10	2000000	9.92
450	5.06	10000	10.08	130000	10	3000000	10
500	5.1	11000	10.08	140000	10	4000000	9.92
550	5.76	12000	10.08	150000	10	5000000	9.92
600	6.08	13000	10.08	200000	9.92	10000000	8.8
650	6.32	14000	10.08	210000	9.92	11000000	8.48
700	6.6	20000	10.08	220000	9.84	12000000	8.16
750	6.84	21000	10.08	230000	9.84	13000000	7.68
800	7.04	22000	10.08	240000	9.84	14000000	7.36
850	7.24	23000	10.08	250000	9.84	15000000	6.88
900	7.48	30000	10.16	300000	9.84	20000000	5.12
1000	7.84	40000	10.08	350000	9.84		

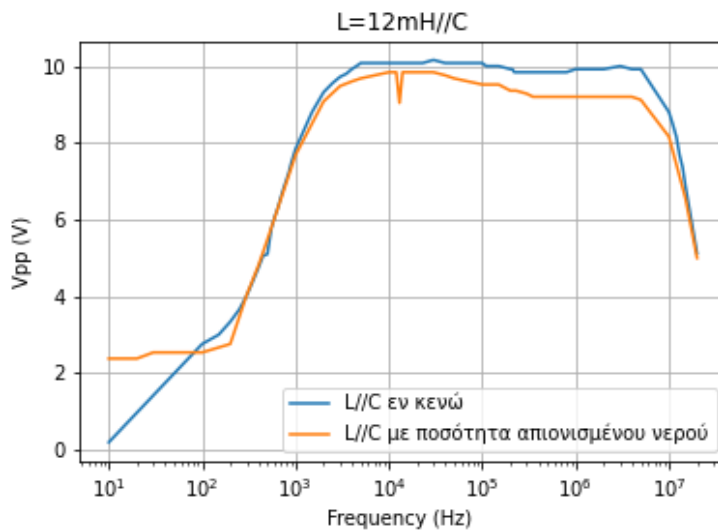
Πίνακας 6.6: Μετρήσεις από το εν παραλλήλω κύκλωμα LC με L=12mH και C=10-15nF.

Συχνότητα (Hz)	V _{pp} (V)	Συχνότητα (Hz)	V _{pp} (V)	Συχνότητα (Hz)	V _{pp} (V)
10	2.38	12000	9.84	400000	9.2
20	2.38	13000	9.04	450000	9.2
30	2.54	14000	9.84	500000	9.2

Πίνακας 6.6: (Συνέχεια)

Συχνότητα (Hz)	V _{pp} (V)	Συχνότητα (Hz)	V _{pp} (V)	Συχνότητα (Hz)	V _{pp} (V)
40	2.54	15000	9.84	550000	9.2
50	2.54	20000	9.84	600000	9.2
100	2.54	30000	9.84	700000	9.2
200	2.76	40000	9.76	800000	9.2
300	4.04	50000	9.68	900000	9.2
400	4.8	100000	9.52	1000000	9.2
500	5.48	110000	9.52	2000000	9.2
1000	7.68	150000	9.52	3000000	9.2
2000	9.08	200000	9.36	4000000	9.2
3000	9.48	210000	9.36	5000000	9.12
4000	9.6	220000	9.36	10000000	8.16
5000	9.68	230000	9.36	15000000	6.56
10000	9.84	300000	9.28	20000000	5
11000	9.84	350000	9.2		

Για λόγους σύγκρισης, παρακάτω φαίνεται το γράφημα με τις δύο γραφικές παραστάσεις που αφορούν τις δύο διαφορετικές καταστάσεις του πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων. Στον οριζόντιο άξονα είναι οι τιμές των συχνοτήτων και στον κατακόρυφο της τάσης V_{pp} όπως φαινόταν από τον παλμογράφο. Λόγω του μεγάλου εύρους συχνοτήτων χρησιμοποιήθηκε λογαριθμική κλίμακα για τον οριζόντιο άξονα.



Σχήμα 6.25: Γραφική Παράσταση του εν παραλλήλω κυκλώματος LC με $L=12\text{mH}$ και πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων, η συχνότητα είναι σε λογαριθμική κλίμακα μέσω του Jupyter notebook περιβάλλοντος, Google Colaboratory.

Φαίνεται πως τα κυκλώματα δίνουν παρόμοιες αποκρίσεις μέχρι να φτάσουν την συχνότητα συντονισμού ωστόσο, στην πορεία είναι εμφανής ο διαχωρισμός τους αφού το κύκλωμα με τον πυκνωτή που έχει την μεγαλύτερη χωρητικότητα (δηλαδή των $10\text{-}15\text{nF}$ - πορτοκαλί καμπύλη) έχει απόκριση η οποία “πέφτει πιο γρήγορα” σε σχέση με το κύκλωμα με την μικρότερη χωρητικότητα (δηλαδή των 0.2pF - μπλε καμπύλη) που αφορά τον πυκνωτή εν κενώ.

Πρέπει να σημειωθεί εδώ, ότι αναμενόταν με βάση τους θεωρητικούς υπολογισμούς, ότι ο πυκνωτής εν κενώ θα είχε συχνότητα συντονισμού πολύ μεγαλύτερη από αυτήν που τελικά έδωσε στην απόκριση στον παλμογράφο. Ωστόσο, με ποσότητα απιονισμένου νερού εμφάνισε συχνότητα συντονισμού κοντά στα 15kHz , δηλαδή στις αναμενόμενες, λόγω θεωρητικών υπολογισμών, τιμές. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι ο πυκνωτής ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων ενδεχομένως να μην λειτουργεί ως μία απλή χωρητικότητα, αλλά να έχει ένα ισοδύναμο κύκλωμα πιο περίπλοκο (όπως πυκνωτής σε σειρά με μία αντίσταση).

7 - Κατασκευή ηλεκτρονικού κυκλώματος

Για την σωστή λειτουργία του κυκλώματος πρέπει να αντικατασταθεί η λειτουργία της γεννήτριας και του παλμογράφου με κατάλληλο εξοπλισμό. Σκοπός της εργασίας είναι η κατασκευή ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος, που να μπορεί μέσω υπολογιστή ή μέσω κινητού τηλεφώνου (όπως για παράδειγμα μέσω μίας εφαρμογής) να παράγει ένα σήμα αναλόγως με αυτό που θέλει ο χρήστης (ημίτονο, τετράγωνο, τρίγωνο) και με την δυνατότητα για ρύθμιση της συχνότητας μέσα σε ένα συγκεκριμένο εύρος, αναλόγως τις ανάγκες του κυκλώματος (frequency sweep).

Στην συγκεκριμένη εργασία, θα ήταν ιδανικό ένα εύρος της τάξης των Hz έως της τάξης MHz, για παράδειγμα 10Hz-3MHz. Ουσιαστικά η λειτουργία που περιγράφηκε παραπάνω είναι η λειτουργία της απλής γεννήτριας που έχει ένα εργαστήριο. Εκτός αυτής της λειτουργίας, το κύκλωμα πρέπει να μπορεί να διαβάζει την απόκριση του κυκλώματος και να την εμφανίζει πάλι σε μία συσκευή (υπολογιστή/ κινητό τηλέφωνο), ώστε να μπορεί ο χρήστης να την δει και να την μελετήσει, και να προβεί στα αντίστοιχα συμπεράσματα για το εξεταζόμενο κύκλωμα.

Οι μικροελεγκτές οι οποίοι είναι ικανοί να υποστηρίξουν τις παραπάνω λειτουργίες πρέπει είτε να έχουν ήδη ενσωματωμένα εξαρτήματα που να τους επιτρέπει την δυνατότητα για μετατροπή από ψηφιακό σε αναλογικό σήμα, στα αγγλικά Digital-to-Analog-Conversion ή αλλιώς DAC, όπως το Arduino Due, είτε να έχουν την δυνατότητα για προσθήκη εξωτερικής μονάδας (όπως το μικροτσιπ MCP4725) που να υποστηρίζει λειτουργία DAC.

Στα πλαίσια του εργαστηρίου χρησιμοποιήθηκε ένας μικροελεγκτής που έχει ήδη ενσωματωμένο κύκλωμα που μετατρέπει ψηφιακό σε αναλογικό σήμα (DAC). Ο εν λόγω μικροελεγκτής ανήκει στην οικογένεια των μικροελεγκτών ESP32 και συγκεκριμένα ονομάζεται Wemos LOLIN32 [41], [42].

7.1 Περιγραφή της οικογένειας μικροελεγκτών ESP32

Οι μικροελεγκτές της οικογένειας ESP32 είναι μια σειρά χαμηλού κόστους και χαμηλής ισχύος μικροελεγκτές με ενσωματωμένο Wi-Fi και διπλής λειτουργίας Bluetooth. Ο μικροεπεξεργαστής που υποστηρίζει είναι είτε Tensilica Xtensa LX6 σε έναν ή δύο πυρήνες, και λειτουργεί στα 160 ή 240 MHz και αποδίδει μέχρι και σε 600 DMIPS.

Οι συγκεκριμένοι μικροελεγκτές διακρίνονται για την στιβαρότητα της κατασκευής τους δεδομένου ότι είναι κατασκευασμένοι για να λειτουργούν σε βιομηχανικούς χώρους και σε ένα εύρος θερμοκρασιών -40°C έως $+125^{\circ}\text{C}$, δηλαδή δύνανται να λειτουργήσουν και σε ακραίες συνθήκες. Διακρίνονται επίσης για την χαμηλή κατανάλωση ισχύος, εφόσον είναι κατασκευασμένοι για κινητές συσκευές, φορητά ηλεκτρονικά και εφαρμογές IoT.

Τέλος, οι μικροελεγκτές ESP32 μπορούν να αλληλεπιδράσουν με άλλα συστήματα για την παροχή λειτουργιών όπως Wi-Fi και Bluetooth μέσω των θυρών SPI / SDIO ή I2C / UART [41], [42].

7.1.1 Περιγραφή του μικροελεγκτή Wemos LOLIN32

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο μικροελεγκτής που θα χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια της εργασίας είναι ο Wemos LOLIN32. Παρακάτω, στο Σχήμα 7.1, φαίνεται αναλυτικά η λειτουργία και ο σκοπός εξυπηρέτησης κάθε pin.

Συγκεκριμένα, διαθέτει 26 θύρες εισόδου/ εξόδου γενικού σκοπού, εκ των οποίων οι 16 διαθέτουν και λειτουργία αναλογικής προς ψηφιακή μετατροπής σήματος (ADC). Η μετατροπή γίνεται από το εύρος τάσης εισόδου 0-3.3 V σε ένα εύρος 0-4095, με 12-bit. Επίσης δύο από τις θύρες συνολικά, οι GPIO25 (κανάλι 1) και GPIO26 (κανάλι 2) λειτουργούν ως θύρες των 8-bit ψηφιακής προς αναλογική μετατροπή σήματος (DAC).

7.2 Λειτουργία γεννήτριας

7.2.1 Περιγραφή της λειτουργίας μετατροπής από ψηφιακό σε αναλογικό σήμα

Στη συνέχεια θα περιγραφεί η λειτουργία του μέρους του κυκλώματος που λειτουργεί ως γεννήτρια, δηλαδή η παραγωγή μιας κυματομορφής αναλόγως με αυτή που θέλει ο χρήστης (τετραγωνική, τριγωνική, πριονωτή, ημιτονική) και η συχνότητα του οποίου να δύνανται να μεταβάλλεται μέσα σε ένα συγκεκριμένο εύρος, αναλόγως με τις ανάγκες του κυκλώματος (frequency sweep).

Το κύκλωμα χρειάζεται ένα αναλογικό σήμα οποιασδήποτε μορφής (ημίτονο, τετράγωνο, τρίγωνο) όπως το έδινε η γεννήτρια. Ο μικροελεγκτής που μελετάται ωστόσο δεν μπορεί να το δώσει απευθείας αναλογικό, αλλά ψηφιακό. Με τη βοήθεια του DAC του ESP32 το σήμα μετατρέπεται σε αναλογικό με δυνατότητα για μεταβολή της συχνότητας η οποία μπορεί να γίνει είτε με την βοήθεια του hardware (push button) είτε με την βοήθεια του software (κώδικας).

Ενας 8-bit DAC δύνανται να έχει 256 διακριτές τιμές εξόδου. Για εύρος τάσης του μικροελεγκτή 3.3V είναι ευνόητο ότι από αρχή 0 έως τα 255 με βήμα 1 αντιστοιχεί σε μεταβολή περίπου $3.3V \div 256 = 12.9\text{ mV}$.

7.2.2 Παραγωγή σήματος μεταβλητής συχνότητας

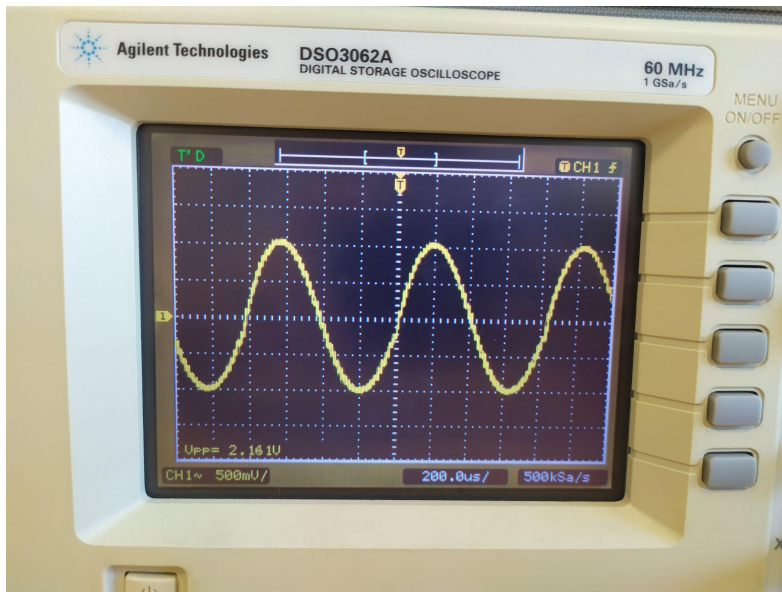
Ο μελετούμενος μικροελεγκτής είναι συμβατός με το περιβάλλον Arduino, όπου και εκεί γράφτηκε ο απαιτούμενος κώδικας σε C. Για να γίνει συμβατός χρειάστηκαν κάποια βήματα εγκατάστασης του μικροελεγκτή LOLIN32 στο περιβάλλον αυτό τα οποία περιελάμβαναν την εισαγωγή κάποιων επιπλέον πακέτων. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η έκδοση που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας και είναι η

1.0.6. Ύστερα από τα βήματα εγκατάστασης έπρεπε να επιλεγεί η κατάλληλη πλακέτα, δηλαδή το WEMOS LOLIN32.



Σχήμα 7.3: Η έκδοση της εγκατάστασης του μικροελεγκτή LOLIN32 στο περιβάλλον Arduino.

Στη συνέχεια έγινε σύνδεση της πλακέτας με την τροφοδοσία που δίνει ο υπολογιστής (θύρα USB). Το κομμάτι κώδικα που είναι υπεύθυνο για την παραγωγή κυματομορφής συγκεκριμένης συχνότητας και συγκεκριμένου είδους (τετραγωνική, τριγωνική, πριονωτή, ημιτονική) έγινε φόρτωση και μεταγλώττιση. Για λόγους πληρότητας, η πρώτη δοκιμή έγινε στον παλμογράφο του εργαστηρίου, δηλαδή δίνοντας τροφοδοσία στο κύκλωμα μέσω του υπολογιστή και λαμβάνοντας έξοδο στον παλμογράφο. Το ψηφιακό σήμα δόθηκε μέσω της θύρας 25 του μικροϋπολογιστή η οποία υποστηρίζει DAC. Έχοντας ορίσει baud rate 115200 στην αρχή (στο μέρος του setup()), για την παραγωγή του ημιτόνου χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση dacWrite(Channel, Value); η οποία έχει δύο ορίσματα: το Channel είναι το κανάλι και είναι είτε το DAC1 είτε το DAC2, και στην συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε η θύρα 25, και το Value είναι η τιμή την οποία αναθέτει ο χρήστης. Άρα, το ψηφιακό σήμα δίνεται στην θύρα 25 πάντα όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα. Για την παραγωγή ημιτονικής κυματομορφής χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση με τα εξής ορίσματα, dacWrite(25, int(128 + 80 * (sin(deg*PI/180))));. Το 128 λειτουργεί σαν αντιστάθμισμα (offset) ώστε να εμφανίζεται στη μέση της οθόνης η κυματομορφή, αφού η ανάλυση του DAC του μικροϋπολογιστή ESP32 είναι 256, και $256 \div 2 = 128$. Η μεταβλητή deg είναι το βήμα, το οποίο αυξάνεται από 0 έως 360 με βήμα 8. Όσο πιο μεγάλο είναι το deg τόσο πιο μεγάλη είναι η συχνότητα. Παρακάτω φαίνεται η απόκριση του παλμογράφου. Όπως φαίνεται είναι ένα κανονικό ημίτονο.



Σχήμα 7.4: Η απόκριση του παλμογράφου, ύστερα από το ψηφιακό σήμα που δόθηκε για ημιτονική κυματομορφή μέσω της θύρας 25 του μικροελεγκτή LOLIN32.

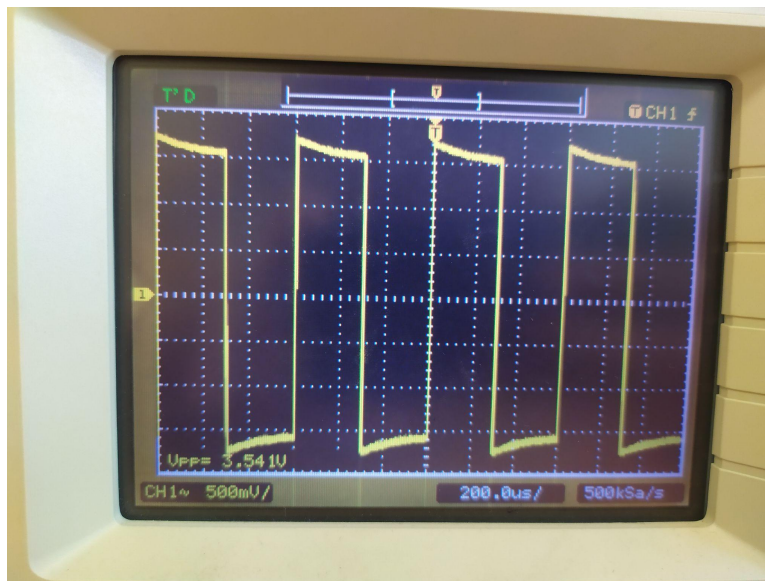
Αλλάζοντας το βήμα με το οποίο αυξάνεται η μεταβλητή deg, αυξάνεται και η συχνότητα. Ενδεικτικά λήφθηκαν κάποιες τιμές συχνότητας στο εργαστήριο, για διαφορετικά βήματα κάθε φορά.

Τα αποτελέσματα φαίνονται στον κάτωθι πίνακα:

Πίνακας 7.1: Οι τιμές της συχνότητας της κυματομορφής που παράγεται χρησιμοποιώντας το αντίστοιχο βήμα.

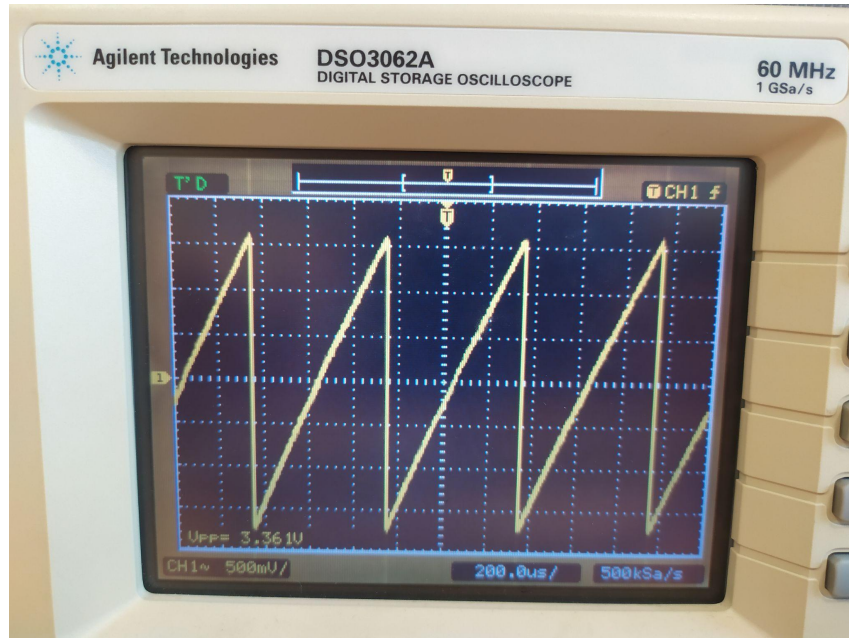
Βήμα	Συχνότητα
4	600Hz
6	910Hz
8	1.2kHz
16	2.4kHz

Στη συνέχεια, η ίδια διαδικασία έγινε για την παραγωγή τετραγωνικής κυματομορφής. Εκεί χρησιμοποιήθηκαν οι αρμονικές περιττής τάξης, οι οποίες για την παραγωγή μιας τέτοιας κυματομορφής κανονικά είναι άπειρες. Συνεπώς, όσο περισσότερες αρμονικές περιττής τάξης συμπεριληφθούν τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια θα έχει το σήμα. Ο παλμογράφος είχε την εξής ένδειξη.

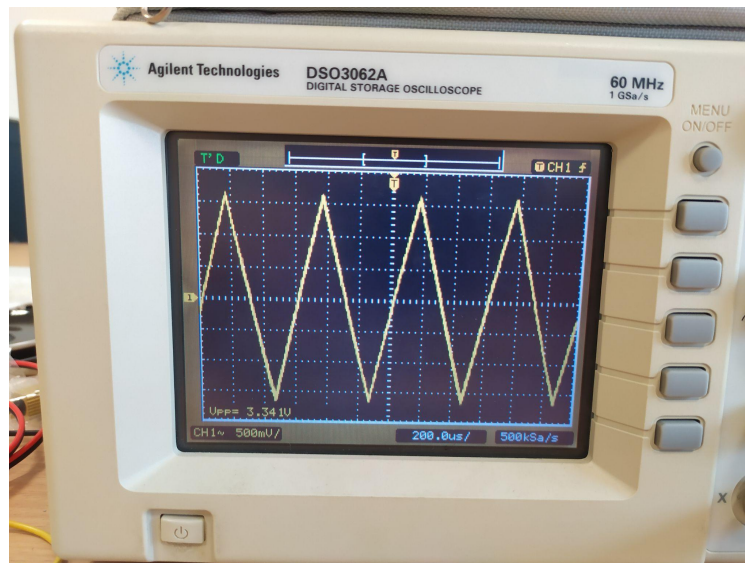


Σχήμα 7.5: Η απόκριση του παλμογράφου, ύστερα από το ψηφιακό σήμα που δόθηκε για τετραγωνική κυματομορφή μέσω της θύρας 25 του μικροελεγκτή LOLIN32.

Αντίστοιχα ακολουθούν οι αποκρίσεις του παλμογράφου για πριονωτή κυματομορφή και για τριγωνική.



Σχήμα 7.6: Η απόκριση του παλμογράφου, ύστερα από το ψηφιακό σήμα που δόθηκε για πριονωτή κυματομορφή μέσω της θύρας 25 του μικροελεγκτή LOLIN32.



Σχήμα 7.7: Η απόκριση του παλμογράφου, ύστερα από το ψηφιακό σήμα που δόθηκε για τριγωνική κυματομορφή μέσω της θύρας 25 του μικροελεγκτή LOLIN32.

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, η ανάλυση του DAC του μικροελεγκτή είναι 256, αλλά αρκεί για απλές περιπτώσεις. Η ταχύτητα μετατροπής είναι γύρω στα 17ms. Για μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων, χρησιμοποιήθηκε ένας πίνακας από τιμές που αφορούν μία περίοδο για κάθε είδος κυματομορφής. Για παράδειγμα, για την παραγωγή πριονωτής κυματομορφής χρησιμοποιήθηκε ο εξής πίνακας:

```
// Sawtooth wave table
{
  0x00, 0x02, 0x04, 0x06, 0x09, 0x0B, 0x0D, 0x10, 0x12, 0x14, 0x16, 0x19, 0x1B, 0x1D, 0x20, 0x22,
  0x24, 0x27, 0x29, 0x2B, 0x2D, 0x30, 0x32, 0x34, 0x37, 0x39, 0x3B, 0x3E, 0x40, 0x42, 0x44, 0x47,
  0x49, 0x4B, 0x4E, 0x50, 0x52, 0x54, 0x57, 0x59, 0x5B, 0x5E, 0x60, 0x62, 0x65, 0x67, 0x69, 0x6B,
  0x6E, 0x70, 0x72, 0x75, 0x77, 0x79, 0x7C, 0x7E, 0x80, 0x82, 0x85, 0x87, 0x89, 0x8C, 0x8E, 0x90,
  0x93, 0x95, 0x97, 0x99, 0x9C, 0x9E, 0xA0, 0xA3, 0xA5, 0xA7, 0xA9, 0xAC, 0xAE, 0xB0, 0xB3, 0xB5,
  0xB7, 0xBA, 0xBC, 0xBE, 0xC0, 0xC3, 0xC5, 0xC7, 0xCA, 0xCC, 0xCE, 0xD1, 0xD3, 0xD5, 0xD7, 0xDA,
  0xDC, 0xDE, 0xE1, 0xE3, 0xE5, 0xE8, 0xEA, 0xEC, 0xEE, 0xF1, 0xF3, 0xF5, 0xF8, 0xFA, 0xFC, 0xFE
},
```

Σχήμα 7.8: Πίνακας τιμών για την πριονωτή κυματομορφή. Οι τιμές αφορούν μία περίοδο.

Κάθε μία τιμή αυτού του πίνακα μέσω της εντολής `dacWrite(25, WaveFormTable[wave_type][i]);`, γραφόταν στην θύρα 25, την θύρα που δίνει το ψηφιακό σήμα.

7.3 Λειτουργία παλμογράφου

7.3.1 Περιγραφή της λειτουργίας μετατροπής από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα

Το διάβασμα μίας αναλογικής τιμής με τον μικροελεγκτή ESP32 μέσω του περιβάλλοντος ARDUINO, σημαίνει ότι γίνεται μέτρηση μίας τάσης μέσα σε ένα εύρος 0-3.3V, εφόσον τα 3.3V είναι η τάση λειτουργίας του μικροελεγκτή. Ύστερα, αντιστοιχίζεται αυτή η τάση σε μία διακριτή τιμή μέσα στο εύρος 0-4095, με τα 0V να αντιστοιχίζονται στην τιμή 0 και τα 3.3V να αντιστοιχίζονται στην τιμή 4095. Όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, οι θύρες ADC του μικροελεγκτή έχουν ακρίβεια 12-bit και $2^{12} = 4096$, εξ ου και το εύρος είναι έως 4095.

Ωστόσο, είναι δόκιμο να υπάρχει ένας περιορισμός στην μέτρηση της τάσης σε περίπτωση που ξεπεραστεί η τιμή των 3.3V. Ο περιορισμός αυτός μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση μίας διόδου χαμηλής ισχύος είτε με την σειριακή σύνδεση μίας κατάλληλης αντίστασης στο κύκλωμα.

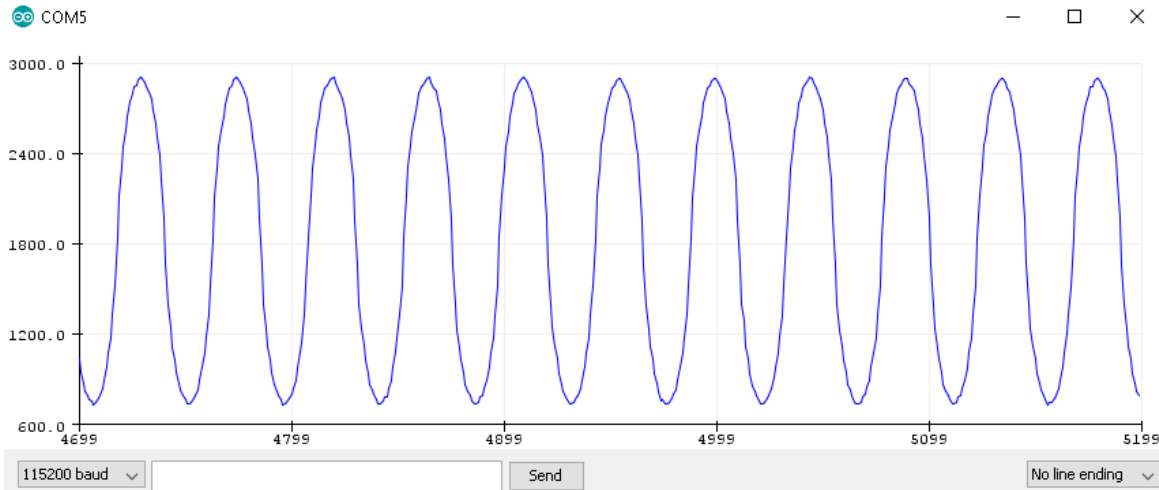
Το διάβασμα της αναλογικής τιμής γίνεται με την βοήθεια της συνάρτησης `analogRead(pin)`; Στη συγκεκριμένη περίπτωση, χρησιμοποιήθηκε η θύρα 32 του μικροελεγκτή.

7.3.2 Εμφάνιση σήματος μεταβλητής συχνότητας

Ο πιο απλός τρόπος εμφάνισης των σημάτων που διαβάζονται μέσω ενός μικροελεγκτή στο περιβάλλον Arduino είναι μέσω του Serial Plotter. Το Serial Plotter λαμβάνει τα δεδομένα από την πλακέτα και τα οπτικοποιεί σε κυματομορφές. Η εμφάνιση των κυματομορφών/ γραφημάτων στο Serial Plotter γίνεται με την βοήθεια της συνάρτησης `Serial.println(variable)`;, όπου δέχεται σαν όρισμα την μεταβλητή που θα εμφανιστεί, ουσιαστικά την αναλογική τιμή που έχει διαβάσει προηγουμένως. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, χρησιμοποιήθηκε baud rate ίσο με 115200 bts.

Με αντίστοιχη διαδικασία που περιγράφηκε και στην παράγραφο 7.2.2 για την παραγωγή της εκάστοτε κυματομορφής, παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα στην οθόνη του υπολογιστή, σε μορφή στιγμιότυπου.

Ενδεικτικά, για ημιτονική κυματομορφή:



Σχήμα 7.9: Η απόκριση του Serial Plotter, ύστερα από το ψηφιακό σήμα που δόθηκε για ημιτονική κυματομορφή μέσω της θύρας 25 του μικροελεγκτή LOLIN32.

Η μεταβολή της συχνότητας μπορεί να γίνει όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα με την αλλαγή του βήματος της μεταβλητής deg.

Έτσι, χρησιμοποιώντας πάλι την αντίστοιχη συνδεσμολογία που έγινε λόγος στα προηγούμενα κεφάλαια είναι εφικτή η μέτρηση και καταγραφή των διαφόρων συχνοτήτων που μπορεί να αφορά ένα κύκλωμα με πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων, σε πλαίσια ηλεκτρονικού κυκλώματος.

8 - Επίλογος

8.1 Σύνοψη και Συμπεράσματα

Κάθε εφαρμογή απαιτεί μία συνετή επιλογή του σχεδιασμού ενός αισθητήρα και σχετίζεται με διάφορες παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπόψιν. Μερικά κριτήρια επιλογής είναι η απλότητα της κατασκευής και ο χρόνος απόκρισης. Συνεπώς, έγκειται στην κρίση του κατασκευαστή η επιλογή των υλικών και των κυκλωμάτων ώστε να επιτευχθεί σωστά η μέτρηση της χωρητικότητας ενός πυκνωτή και άρα η και μέτρηση του αντίστοιχου αισθητήρα.

Συγκεκριμένα, αναφορικά με την συνδεσμολογία του κυκλώματος LC που περιγράφηκε νωρίτερα στο πειραματικό μέρος, έγινε σαφές ότι ήταν σχετικά ευδιάκριτη η διαφορά στις αποκρίσεις με και χωρίς απιονισμένο νερό. Αυτό με μία επέκταση θα μπορούσε να αφορά την ανίχνευση ποσότητας κορονοϊού. Η ανταπόκριση μάλιστα του συστήματος στην ανίχνευση αυτή είναι άμεση.

Όσον αφορά το είδος του πυκνωτή, ενδεχομένως, εάν αντί για χάλκινο πυκνωτή, ο οποίος οξειδώνεται, γινόταν χρήση πυκνωτή από χρυσό ίσως να περιορίζονταν τα σφάλματα στις μετρήσεις και άρα θα περιοριζόταν και η αλλοίωση των αποτελεσμάτων. Επίσης, δεδομένου ότι η ποσότητα του απιονισμένου νερού που εναποτίθενται στην επιφάνεια του πυκνωτή δεν ήταν πάντα σταθερή μετρήσιμη ποσότητα (έπεφτε με γυμνό μάτι), είναι λογικό να υπάρχει διακύμανση κάθε φορά στην χωρητικότητα του πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων, γεγονός που αποτελεί τροχοπέδη για να είναι ακριβείς οι μετρήσεις. Ωστόσο, οι τιμές της χωρητικότητας του πυκνωτή με απιονισμένο νερό κυμαίνονταν πάντα στην τάξη των nF.

Αναφορικά με την υλοποίηση του ηλεκτρονικού κυκλώματος, πρέπει να σημειωθεί πως παρότι ο μικροελεγκτής ESP32 έχει ανάλυση 8bit για την μετατροπή από ψηφιακό σε αναλογικό σήμα, στην πραγματικότητα δεν αντιστοιχίζονται ακριβώς οι τιμές όπως περιγράφηκαν νωρίτερα. Δηλαδή η τιμή 0 δεν αντιστοιχίζεται ακριβώς στα 0V, αλλά λίγο παραπάνω ενώ η τιμή 255 δεν αντιστοιχίζεται ακριβώς στα 3.3V, αλλά στην πραγματικότητα γύρω στα 3.24V και αυτό οφείλεται σε διάφορους τεχνικούς λόγους. Η διαπίστωση αυτή έγινε ύστερα από πειραματική μελέτη στο περιβάλλον Arduino. Τέλος, κατά την περιγραφή της λειτουργίας της μετατροπής από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα σκοπίμως παραλήφθηκε ότι η λειτουργία αυτή δεν είναι απόλυτα γραμμική. Ύστερα από πειραματική μελέτη, διαπιστώθηκε ότι στις ακραίες περιοχές, δηλαδή στα 0V και στα 3.3V, οι τιμές ήταν σχεδόν ίδιες με τις κοντινές τους τιμές, δηλαδή για 0V και για 0.1V, ο ESP32 δεν μπορούσε να ανιχνεύσει κάποια αλλαγή στην μετατροπή, τις αντιστοίχιζε και τις δύο στην τιμή 0 ενώ για τις τιμές 3.2V και 3.3V τις αντιστοίχιζε στην τιμή 4095.

8.2 Προτάσεις για μελλοντική συνέχιση της μελέτης

Όπως προαναφέρθηκε, μία πρόταση για μελλοντική συνέχιση της μελέτης θα ήταν η αντικατάσταση του χάλκινου πυκνωτή από έναν πυκνωτή από χρυσό, ο οποίος δεν οξειδώνεται.

Όσον αφορά την κατασκευή του ηλεκτρονικού μέρους του κυκλώματος θα ήταν χρήσιμες μερικές βελτιώσεις/ επεκτάσεις. Για παράδειγμα, η μεταβολή της συχνότητας (frequency sweep) θα μπορούσε να υλοποιηθεί με την βοήθεια του hardware, για παράδειγμα κάνοντας χρήση ποτενσιόμετρου, όπου περιστρέφοντάς το, αλλάζει και η συχνότητα. Εκεί φυσικά θα ήταν σημαντική η προσθήκη της υστέρησης (η οποία μπορεί να γίνει είτε με software είτε με hardware) ώστε να λαμβάνονται πιο σταθερές οι τιμές και να μην υπάρχουν σφάλματα. Αντίστοιχα, θα μπορούσε πάλι μέσω hardware και συγκεκριμένα με την χρήση μπουτόν (push buttons), να γίνεται η αλλαγή στο είδος της κυματομορφής.

Για μεγαλύτερη ακρίβεια επίσης, αντί για το serial plotter που χρησιμοποιήθηκε χάριν ευκολίας λόγω του περιβάλλοντος Arduino, υπάρχουν και εναλλακτικές όπως ένας ψηφιακός παλμογράφος (digital oscilloscope) το οποίο θα διάβαζε τα δεδομένα από την πλακέτα του ESP32 παρόμοια με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω και θα εμφάνιζε ίσως με μεγαλύτερη ακρίβεια τις κυματομορφές.

Τέλος, όπως ειπώθηκε και στο κεφάλαιο 7, η τάση λειτουργίας του μικροελεγκτή ESP32 είναι τα 3.3V. Επειδή το εύρος είναι σχετικά μικρό, και συνήθως οι περισσότερες εφαρμογές βασίζονται σε κυκλώματα που λειτουργούν σε 5V, ενδεχομένως να απαιτείται η επέκταση του κυκλώματος με την χρήση ενός τελεστικού ενισχυτή για αύξηση της τάσης.

9 - Βιβλιογραφία

- [1] Y.-C. Liu, R.-L. Kuo, and S.-R. Shih, "COVID-19: The first documented coronavirus pandemic in history," *Biomed. J.*, vol. 43, no. 4, pp. 328–333, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.bj.2020.04.007.
- [2] "Archived: WHO Timeline - COVID-19." <https://www.who.int/news/item/27-04-2020-who-timeline---covid-19>.
- [3] C. Bulut and Y. Kato, "Epidemiology of COVID-19," *Turk. J. Med. Sci.*, vol. 50, no. SI-1, pp. 563–570, Apr. 2020, doi: 10.3906/sag-2004-172.
- [4] "WHO Coronavirus (COVID-19) Dashboard." <https://covid19.who.int>.
- [5] E. Mahase, "Covid-19: What is the R number?," *BMJ*, vol. 369, p. m1891, May 2020, doi: 10.1136/bmj.m1891.
- [6] N. M. Linton *et al.*, "Incubation Period and Other Epidemiological Characteristics of 2019 Novel Coronavirus Infections with Right Truncation: A Statistical Analysis of Publicly Available Case Data," *J. Clin. Med.*, vol. 9, no. 2, Art. no. 2, Feb. 2020, doi: 10.3390/jcm9020538.
- [7] Q.-X. Long *et al.*, "Clinical and immunological assessment of asymptomatic SARS-CoV-2 infections," *Nat. Med.*, vol. 26, no. 8, pp. 1200–1204, Aug. 2020, doi: 10.1038/s41591-020-0965-6.
- [8] T. P. Velavan and C. G. Meyer, "The COVID-19 epidemic," *Trop. Med. Int. Health*, vol. 25, no. 3, pp. 278–280, Mar. 2020, doi: 10.1111/tmi.13383.
- [9] "About COVID-19 – National Public Health Institute of Liberia." <https://www.nphil.gov.lr/index.php/about-covid-19/>.
- [10] M.-Y. Wang, R. Zhao, L.-J. Gao, X.-F. Gao, D.-P. Wang, and J.-M. Cao, "SARS-CoV-2: Structure, Biology, and Structure-Based Therapeutics Development," *Front. Cell. Infect. Microbiol.*, vol. 10, p. 587269, Nov. 2020, doi: 10.3389/fcimb.2020.587269.
- [11] J. Yang *et al.*, "Molecular interaction and inhibition of SARS-CoV-2 binding to the ACE2 receptor," *Nat. Commun.*, vol. 11, no. 1, p. 4541, Sep. 2020, doi: 10.1038/s41467-020-18319-6.
- [12] G. Kaur, G. Lungarella, and I. Rahman, "SARS-CoV-2 COVID-19 susceptibility and lung inflammatory storm by smoking and vaping," *J. Inflamm.*, vol. 17, no. 1, p. 21, Jun. 2020, doi: 10.1186/s12950-020-00250-8.
- [13] A. R. Bourgonje *et al.*, "Angiotensin-converting enzyme 2 (ACE2), SARS-CoV-2 and the pathophysiology of coronavirus disease 2019 (COVID-19)," *J. Pathol.*, vol. 251, no. 3, pp. 228–248, Jul. 2020, doi: 10.1002/path.5471.
- [14] K. Chetpattananondh, T. Tapoanoi, P. Phukpattaranont, and N. Jindapetch, "A self-calibration water level measurement using an interdigital capacitive sensor," *Sens. Actuators Phys.*, vol. 209, pp. 175–182, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.sna.2014.01.040.
- [15] R. N. Dean, A. Rane, M. Baginski, Z. Hartzog, and D. J. Elton, "Capacitive fringing field sensors in printed circuit board technology," in *2010 IEEE*

- Instrumentation & Measurement Technology Conference Proceedings*, Austin, TX, USA, 2010, pp. 970–974. doi: 10.1109/IMTC.2010.5488058.
- [16] A. V. Mamishev, K. Sundara-Rajan, Fumin Yang, Yanqing Du, and M. Zahn, “Interdigital sensors and transducers,” *Proc. IEEE*, vol. 92, no. 5, pp. 808–845, May 2004, doi: 10.1109/JPROC.2004.826603.
- [17] “How to Solve the Series RLC Circuit,” *wikiHow*.
<https://www.wikihow.com/Solve-the-Series-RLC-Circuit>.
- [18] A. Westerman, “(75) Inventor: Naoyuki Miyazawa, Yamanashi (JP),” p. 19.
- [19] R. Igreja and C. J. Dias, “Analytical evaluation of the interdigital electrodes capacitance for a multi-layered structure,” *Sens. Actuators Phys.*, vol. 112, no. 2–3, pp. 291–301, May 2004, doi: 10.1016/j.sna.2004.01.040.
- [20] S. L. Schiefelbein, N. A. Fried, K. G. Rhoads, and D. R. Sadoway, “A high-accuracy, calibration-free technique for measuring the electrical conductivity of liquids,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 69, no. 9, pp. 3308–3313, Sep. 1998, doi: 10.1063/1.1149095.
- [21] P. Placidi, L. Gasperini, A. Grassi, M. Cecconi, and A. Scorzoni, “Characterization of Low-Cost Capacitive Soil Moisture Sensors for IoT Networks,” *Sensors*, vol. 20, no. 12, p. 3585, Jun. 2020, doi: 10.3390/s20123585.
- [23] R. Esfandiari, D. W. Maki, and M. Siracusa, “Design of Interdigitated Capacitors and Their Application to Gallium Arsenide Monolithic Filters,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 31, no. 1, pp. 57–64, Jan. 1983, doi: 10.1109/TMTT.1983.1131429.
- [24] Q. Tan *et al.*, “A Novel Interdigital Capacitor Pressure Sensor Based on LTCC Technology,” *J. Sens.*, vol. 2014, pp. 1–6, 2014, doi: 10.1155/2014/431503.
- [25] J. Fraden, *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*, 3rd ed. New York: Springer, 2004.
- [26] N. S. Mazlan *et al.*, “Interdigitated electrodes as impedance and capacitance biosensors: A review,” Krabi, Thailand, 2017, p. 020276. doi: 10.1063/1.5002470.
- [27] “Electricity - Dielectrics, polarization, and electric dipole moment,” *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/electricity>.
- [28] H. Nyquist, “Thermal Agitation of Electric Charge in Conductors,” *Phys. Rev.*, vol. 32, no. 1, pp. 110–113, Jul. 1928, doi: 10.1103/PhysRev.32.110.
- [29] G. D. Alley, “Interdigital Capacitors and Their Application to Lumped-Element Microwave Integrated Circuits,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 18, no. 12, pp. 1028–1033, Dec. 1970, doi: 10.1109/TMTT.1970.1127407.
- [30] “Charging and Discharging a Capacitor.”
http://www.cmm.gov.mo/eng/exhibition/secondfloor/MoreInfo/2_3_5_ChargingCapacitor.htm.
- [31] M. Tomasz, “Use Analog Techniques To Measure Capacitance In Capacitive Sensors,” *Electronic Design*, Nov. 13, 2012.
<https://www.electronicdesign.com/technologies/analog/article/21796004/use-analog-techniques-to-measure-capacitance-in-capacitive-sensors>.
- [32] “An Overview of the 555 Timer.”
<http://www.555-timer-circuits.com/an-overview.html>.
- [33] N. N. Khamis, N. F. Za’bah, A. F. Mansor, and A. N. Nordin, “Arduino-Based Biosensor Impedance Measurement,” in *2016 International Conference on*

- Computer and Communication Engineering (ICCCE)*, Kuala Lumpur, Malaysia, Jul. 2016, pp. 191–194. doi: 10.1109/ICCCE.2016.50.
- [34] M. Plonus, “1 - Circuit Fundamentals,” in *Electronics and Communications for Scientists and Engineers (Second Edition)*, M. Plonus, Ed. Butterworth-Heinemann, 2020, pp. 1–78. doi: 10.1016/B978-0-12-817008-3.00001-2.
- [35] K. Ζαχαρίου, “Κυκλώματα RLC σε σειρά.” [Online]. Available: <http://ikaros.teipir.gr/phyche/Subjects/Varsamis/ergastiria/fisiki2/askisi10.pdf>
- [36] “ΚΥΚΛΩΜΑ RLC ΣΕ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟ (Ηλεκτρικά κυκλώματα) | Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων Τμήμα Φυσικής.” <http://phys-exp.physics.uoi.gr/?p=261>.
- [37] “Radwan - 2013 - Resonance and Quality Factor of the $R_{L_{\alpha}} C$.pdf.”
- [38] Y. Miao, B. Nie, and X. Chen, “A Micro Capacitance Measurement System with Ultra-High Accuracy and Fast Speed,” in *2019 International Conference on Communications, Information System and Computer Engineering (CISCE)*, Haikou, China, Jul. 2019, pp. 44–48. doi: 10.1109/CISCE.2019.00017.
- [39] “PIC16F887 Microcontroller,” *Microcontrollers Lab*, Dec. 28, 2019. <https://microcontrollerslab.com/pic16f887-microcontroller-pinout-programming-examples-applications-features/>.
- [40] “RC Discharging Circuit Tutorial & RC Time Constant,” *Basic Electronics Tutorials*, Aug. 27, 2013. https://www.electronics-tutorials.ws/rc/rc_2.html.
- [41] R. Mischianti, “ESP32 WeMos LOLIN32 high resolution pinout and specs,” *Renzo Mischianti*, Feb. 21, 2021. <https://www.mischianti.org/2021/02/21/esp32-wemos-lolin32-high-resolution-pinout-and-specs/>.
- [42] “ESP32 Wi-Fi & Bluetooth MCU | Espressif Systems.” <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>.