

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΜΕΤΡΗΤΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΥΓΡΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ  
ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΥΨΗΛΗΣ  
ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ»



Του φοιτητή  
Στυλιανού Λαμπρινάκη  
Αρ. Μητρώου: 51912Μ

Επιβλέπων Καθηγητής  
Χατζόπουλος Αργύριος

Μάρτιος 2023

Τίτλος Δ.Ε.: Μετρητής αγωγιμότητας υγρών με χρήση εναλλασσόμενου ρεύματος υψηλής συχνότητας και αντιστάθμιση θερμοκρασίας

Κωδικός Δ.Ε. 21141

Όνοματεπώνυμο φοιτητή Στυλιανός Λαμπρινάκης

Όνοματεπώνυμο εισηγητή Αργύριος Χατζόπουλος

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 8/9/20

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 3/5/23

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

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

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

## Πρόλογος

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στο τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων, στο πλαίσιο του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Σπουδών με τίτλο "Εφαρμοσμένα Ηλεκτρονικά Συστήματα (ΕΗΣ)", Master of Science in "Applied Electronic Systems" της Σχολής Μηχανικών του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδας (ΔΙΠΑΕ).

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον πρώην επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Μιχαήλ Σπάσο που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με το πολύ ενδιαφέρον αυτό θέμα, και ο λόγος του ενδιαφέροντός μου είναι ότι τέτοιοι αισθητήρες έχουν αμέτρητες εφαρμογές στο πεδίο του γρήγορου ελέγχου της ποιοτικής κατάστασης υγρών, και η ανάπτυξή τους αποτελεί πάντα μια επιστημονική πρόκληση, ώστε αφενός η τελική διάταξη να είναι χαμηλού κόστους, και αφετέρου να είναι ανθεκτικοί και ακριβείς στις μετρήσεις, σε μεγάλο εύρος συνθηκών.

Με την ενασχόλησή μου αυτή, νιώθω ότι απέκτησα ιδιαίτερα χρήσιμες γνώσεις και δεξιότητες, που σχετίζονται με θέματα κατασκευής κυκλωμάτων υψηλής συχνότητας, ελέγχου μετρητικών διατάξεων, επίλυσης προβλημάτων κτλ.

Πιο συγκεκριμένα, ο σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάπτυξη ενός πρωτότυπου πεπλεγμένου αισθητήρα χωρητικότητας μαζί με τη διάταξη διασύνδεσής του. Οι πεπλεγμένοι αισθητήρες βασίζονται σε πυκνωτή που περιέχει πεπλεγμένα ηλεκτρόδια. Η εργασία επικεντρώθηκε στη μελέτη, κατασκευή και βελτιστοποίηση της απόδοσης του αισθητήρα για τη μέτρηση της ποιότητας κυρίως λαδιού μηχανής. Στόχος είναι να παρακολουθείται η αλλαγή στη σύσταση των λαδιών και η εμφάνιση περισσότερων πολικών ενώσεων κατά την παλαίωσή τους, με βάση τις μετρήσεις των μεταβολών της ηλεκτρικής διαπερατότητας (electrical permittivity), με την επίδραση υψηλής συχνότητας. Οι μεταβολές αυτές αντανακλούν την βαθμιαία φθορά και αλλοίωση του λαδιού λόγω οξειδωσης, θέρμανσης, τριβών και άλλων φαινομένων, κατά τη χρήση του, σε αυξημένες θερμοκρασίες. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη μελέτη της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των μετρήσεων της ηλεκτρικής διαπερατότητας, επειδή αυτές μπορεί να είναι σχετικά μικρές, και απαιτείται καλή ευαισθησία του αισθητήρα.

## Περίληψη

Σε αυτήν την εργασία θα πραγματοποιηθεί ένα σύστημα μέτρησης ποιότητας λιπαντικών ελαίων μηχανής μέσω της μέτρησης της μιγαδικής διαπερατότητας τους με την χρήση χωρητικού αισθητηρίου. Ο σκοπός της εργασίας αυτής είναι να αναδείξει την μέθοδο αυτή, ώστε να γίνεται εύκολη και πιο συστηματοποιημένη η παρακολούθηση της ποιότητας ενός λιπαντικού μίας μηχανής. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την σωστή συντήρηση της μηχανής καθώς και την εξοικονόμηση λαδιού, αφού η αλλαγή του λιπαντικού στην μηχανή θα γίνεται τον κατάλληλο χρόνο, σύμφωνα με την χρήση της μηχανής και όχι υποκειμενικά ή εμπειρικά από τον χρήστη.

Η διηλεκτρική φασματοσκοπία συχνά χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό και τον έλεγχο ποιότητας του μέσου, όπως τρόφιμα ή λιπαντικά έλαια καθώς και έλαια μηχανής. Μετράει την επίδραση ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου στο αισθητήριο (δίπολο) την στιγμή που έρχεται σε επαφή με το μέσο (έλαιο). Μία πολύ σημαντική παράμετρος που μετράται είναι η διαπερατότητα που δείχνει πως το ηλεκτρικό πεδίο επηρεάζει τα φορτία του μέσου. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται σε χαμηλές μικροκυμματικές συχνότητες. Το σύστημα μέτρησης αποτελείται από έναν χωρητικό αισθητήρα που βυθίζεται μέσα στο μέσο το οποίο θέλουμε να ερευνήσουμε, και το κύκλωμα επεξεργασίας που μετατρέπει τις αλλαγές του αισθητήρα σε ηλεκτρικό σήμα ικανό να το αναπαράγουμε και να το προβάλλουμε.

Επιτεύχθηκε η λειτουργία του συστήματος και έγιναν οι αντίστοιχες μετρήσεις. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων ήταν ιδιαίτερα ενθαρρυντικά καθώς αποδεικνύουν ότι ένα τέτοιο σύστημα μέτρησης μπορεί να επιτευχθεί και να λειτουργήσει αξιόπιστα. Με το σύστημα της παρούσας διπλωματικής είμαστε σε θέση να διαχωρίσουμε ένα καινούργιο συνθετικό λάδι από ένα μεταχειρισμένο, να ανιχνεύσουμε την ελάττωση της ποιότητας του λαδιού λόγω επιμόλυνσης του από αντιψυκτικό υγρό και να παρατηρήσουμε τις αλλαγές που επιφέρει στην ηλεκτρική διαπερατότητα ο παράγοντας της θερμοκρασίας.

# « Liquid conductivity meter using high frequency AC and temperature compensation »

Stylios Lamprinakis

## **Abstract**

In this thesis was held a meter for the determination of the quality of a synthetic greasing oil through the measuring of the electrical conductivity with the use of a capacitive sensor. The purpose of this thesis is to highlight this method in order to monitor, easier and more systematic, the quality of the greasing oil. As a result, it will be easier for someone to know when is the proper time to replace that oil, leading in longer engine lifespan and economy in oil consumption by changing the oil when it really needs to and according to the use of the engine.

The dielectric spectroscopy is used for the characterization and determination of the quality of a medium, like edible, greasing or engine oil. It measures the effect on an external magnetic field on the sensor (dipole), the moment it contacts with the medium (oil). A very useful parameter that can be measured is the electrical permittivity that shows how the medium is affected by the electrical field. This technique is used with low microwave frequencies. In our system we use a capacitive sensor that is sunk down to the medium we want to test. Then the processing circuit converts the change in capacitance to electrical signal that we are able measure.

The results of the measurements are quite promising because it is proved that this system works and functions. With this circuit we are able to determine if a synthetic oil is new or used, to detect a deterioration caused by mixing antifreeze liquid with engine oil and to notice the changes in electrical permittivity caused by different oil temperatures.

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα από τη θέση αυτή να ευχαριστήσω τον πρώην επιβλέποντα καθηγητή μου, τον καθηγητή κ. Μ. Σπάσο γιατί μου ανέθεσε αυτό το πολύ ενδιαφέρον θέμα και για τη συνεχή καθοδήγησή του, ώστε να το ολοκληρώσω. Επίσης ευχαριστώ τα μέλη της Εξεταστικής επιτροπής για τις παρατηρήσεις.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον κύριο Χατζόπουλο για την καθοδήγηση και τις συμβουλές του στο τελικό στάδιο της εργασίας μου καθώς και στην προετοιμασία για παρουσίαση.

Θα ήταν παράλειψη να μην ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον υποψήφιο Διδάκτορα κ. Βασίλη Δελιμαρά για τη βοήθειά του και την εμπειρία του σε θέματα που αφορούσαν την κατασκευή του κυκλώματος καθώς και την παραχώρηση του αισθητηρίου που χρησιμοποιείται στην εργασία αυτή.

Τέλος εκφράζω την ευγνωμοσύνη μου προς τη σύζυγό μου για την συνεχή στήριξη που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

# Περιεχόμενα

Περίληψη.....	iv
Abstract .....	v
Ευχαριστίες .....	vi
Περιεχόμενα .....	vii
Κατάλογος Σχημάτων .....	ix
Κατάλογος Πινάκων.....	xiii
Κεφάλαιο 1 <sup>ο</sup> : Διηλεκτρικά υλικά και πόλωση .....	1
1.1 Το φαινόμενο της πόλωσης ενός διηλεκτρικού μέσου.....	1
1.2 Διηλεκτρική σταθερά και ηλεκτρική διαπερατότητα.....	1
1.3 Τύποι ηλεκτρικών αισθητήρων μέτρησης ηλεκτρικής διαπερατότητας.....	7
1.4 Πεπλεγμένοι αισθητήρες μέτρησης διαπερατότητας (Interdigitated sensors).....	16
1.5 Επίδραση της θερμοκρασίας και αντιστάθμιση στους πεπλεγμένους αισθητήρες χωρητικότητας	
22	
1.6 Επίδραση της συχνότητας ταλαντωτή στους πεπλεγμένους αισθητήρες χωρητικότητας .....	24
1.7 Βέλτιστη θέση τοποθέτησης δείγματος στους επίπεδους αισθητήρες .....	24
Επίλογος – Σκοπός της εργασίας.....	25
Κεφάλαιο 2ο: Εφαρμογές αισθητήρων χωρητικότητας στην παρακολούθηση της ποιότητας ελαίων και λιπαντικών .....	26
2.1 Εισαγωγή.....	26
2.2 Εδώδιαμα έλαια, σύσταση και διαδικασίες αποσύνθεσής τους .....	26
2.3 Ορυκτέλαια και λιπαντικά, σύσταση και διαδικασίες αποικοδόμησης.....	28
2.4 Επίλογος. Αναγκαιότητα και οφέλη από τη χρήση αισθητήρων ελέγχου ποιότητας ελαίων.....	30
Κεφάλαιο 3ο: Ημιτονικός Ταλαντωτής Clapp .....	32
3.1 Εισαγωγή στους ταλαντωτές LC .....	32
3.2 Συντονισμός .....	34
3.3 Ο Ταλαντωτής Colpitts.....	34
3.4 Ταλαντωτής Clapp .....	35
Κεφάλαιο 4ο : Phased locked loop (Βρόγχος Κλειδωμένης Φάσης) .....	37
4.1 Εισαγωγή.....	37
4.2 Βαθμίδες που αποτελούν το PLL .....	38
4.2.1 Ο ανιχνευτής φάσης (Phase detector).....	38
4.2.2 Ταλαντωτής ελεγχόμενος από τάση (VCO) .....	40
4.3 Σχεδιασμός PLL .....	41
4.3.1 Κλείνοντας το βρόχο .....	41

4.3.2 Περιοχή κλειδώματος (lock range) και περιοχή σύλληψης (capture range) Θενός PLL .....	42
4.4 Εφαρμογές PLL.....	42
4.4.1 Πολλαπλασιαστής συχνότητας.....	42
4.4.2 Κλασματική σύνθεση συχνοτήτων.....	43
4.4.3 Αποδιαμόρφωση FM.....	44
4.4.4 Ψηφιακή αποδιαμόρφωση.....	45
Κεφάλαιο 5ο : Φίλτρα .....	46
5.1 Εισαγωγή στα φίλτρα.....	46
5.2 Παθητικά Φίλτρα.....	47
5.3 Ενεργά φίλτρα .....	48
5.4 Τοπολογίες και τεχνολογίες φίλτρων .....	48
5.5 Τάξη κυκλώματος.....	50
5.6 Ευαισθησία.....	50
5.7 Κυκλώματα Sallen-Key .....	51
5.7.1 Βαθυπερατό Φίλτρο 2ης τάξης Sallen and Key .....	51
Κεφάλαιο 6ο : Ψηφιακή απεικόνιση και επεξεργασία .....	53
6.1 Arduino.....	53
6.2 Ιστορικά.....	53
6.3 Υλικό (Hardware).....	54
6.4 Λογισμικό (Software).....	55
Κεφάλαιο 7ο: Μεθοδολογία .....	56
7.1 Εισαγωγή.....	56
7.2 Χρονοδιάγραμμα εξέλιξης της πειραματικής εργασίας .....	56
Κεφάλαιο 8ο: Ανάπτυξη του αισθητήρα.....	57
8.1 Κατασκευή του επίπεδου πεπλεγμένου αισθητήρα χωρητικότητας.....	57
8.2 Κατασκευή του κυκλώματος.....	58
8.3 Δοκιμές εφαρμογής του αισθητήρα στη μέτρηση δειγμάτων ελαίων .....	61
8.4 Επίλογος – Σχολιασμός της απόδοσης του αισθητήρα .....	66
Κεφάλαιο 9ο: Συμπεράσματα .....	68
Κεφάλαιο 10ο: Μελλοντικές προτάσεις ανάπτυξης.....	69
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	70
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Κώδικας λογισμικού στο Arduino IDE .....	73

## Κατάλογος Σχημάτων

- Σχήμα 1: Διηλεκτρικό υλικό υπό την επίδραση εναλλασσόμενου ηλεκτρικού πεδίου.....Σελ. 2
- Σχήμα 2: Σχηματική απεικόνιση διαφορετικών διηλεκτρικών απωλειών χαλαρώσεων που παρατηρούνται σε στερεό μονωτικό υλικό.....Σελ. 3
- Σχήμα 3 Μεταβολές στις διηλεκτρικές απώλειες με την επίδραση διαφορετικών συχνοτήτων, και θερμοκρασιών, για ένα ηλιέλαιο [5]. .....Σελ. 6
- Σχήμα 4 Μεταβολές στις διηλεκτρικές απώλειες με την επίδραση διαφορετικών συχνοτήτων, και θερμοκρασιών, για τυπικό ορυκτέλαιο [5].....Σελ. 6
- Σχήμα 5. Κατηγοριοποίηση μεθόδων που βασίζονται σε συντονιστές για την μελέτη ιδιοτήτων των υλικών [20].....Σελ.8
- Σχήμα 6 Σχηματική αναπαράσταση της εξέλιξης της διάταξης των δύο ηλεκτροδίων πυκνωτή, που είναι τοποθετημένα σε διάταξη είτε παράλληλη, είτε γωνιακή είτε ομοεπίπεδη [31].....Σελ.9
- Σχήμα 7. Σχηματική αναπαράσταση της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου ανάμεσα α) σε δύο ηλεκτρόδια σε παράλληλη θέση (αριστερά) και β) σε δύο ομοεπιφανειακά ηλεκτρόδια δεξιά [30].  
.....Σελ.9
- Σχήμα 8. Σχηματική αναπαράσταση της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου σε δύο «δακτυλιοειδή ομοεπιφανειακά ηλεκτρόδια», που στην επιφάνεια τους έχει τοποθετηθεί ποσότητα λιπαντικού [1].  
.....Σελ.10
- Σχήμα 9. Σχηματική αναπαράσταση των επίπεδων πυκνωτών, πεπλεγμένου τύπου (πάνω) και παράλληλων επίπεδων πλακών (κάτω) [31] .....Σελ.10
- Σχήμα 10. Διάταξη ενός χωρητικού αισθητήρα (αριστερά) και επικοινωνία του με κατάλληλο λογισμικό μέσω ενός κυκλώματος διασύνδεσης (δεξιά) [7] .....Σελ.11
- Σχήμα 11. Αισθητήρας μικροκυμάτων dual-band που βασίζεται σε συμπληρωματικό συντονιστή διαχωρισμένου δακτυλίου: (α) Διάταξη του αισθητήρα CSRR μαζί με την πιπέτα για υγρά δείγματα. (β) Μετρημένη και προσομοιωμένη μετάδοση απόκρισης για το σκέτο αισθητήρα. [22].....Σελ.12
- Σχήμα 12. Όψεις κορυφής και διατομής (α) και φωτογραφία (β) του CSRR. Οι διαστάσεις είναι:  $W = 1 = 5,92 \text{ mm}$ ,  $c = d = 0,5 \text{ mm}$ ,  $W_0 = 1,15 \text{ mm}$ ,  $W_1 = 11 = 9,92 \text{ mm}$ ,  $h_1 = 1,27 \text{ mm}$ ,  $h_2 = 3,81 \text{ mm}$ ,  $h_3 = 7,2 \text{ mm}$  και  $t = 35 \text{ m}$ . Το υπόστρωμα είναι Rogers RO3010 με διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r = 10,2$  και το δοχείο είναι FR4. [29].....Σελ.13
- Σχήμα 13. Άποψη διατομής της περιοχής υποδοχής του CSRR, με τις γραμμές ηλεκτρικού πεδίου και τη συμβολή στη συνολική χωρητικότητα και τη διηλεκτρική αντίσταση του CSRR. (α) Με άδειο δοχείο. β) με γεμάτο δοχείο. [29] .....Σελ.13
- Σχήμα 14. Αναπαράσταση ενός αισθητήρα χωρητικότητας κυλινδρικού τύπου, όπου το λιπαντικό προς μέτρηση ρέει ανάμεσα από το εσωτερικό και εξωτερικό περίβλημα. [11] .....Σελ.14
- Σχήμα 15. Αισθητήρας κυλινδρικής κοιλότητας: (α) Κατασκευασμένος κυλινδρική κοιλότητα συντονισμού με την κοιλότητα κατά μήκος. (β) Μετρημένες και προσομοιωμένες αποκρίσεις μετάδοσης. ....Σελ.15
- Σχήμα 16. Αισθητήρας με τον κυματοδηγό ενσωματωμένο στο υπόστρωμα (SIW): (α) Διάταξη του αισθητήρα SIW κατά μήκος, με ενσωματωμένο το μικροσωλήνα. (β) Μετρημένη και προσομοιωμένη

- απόκριση ανάκλασης για κενό (αέρας), καθαρή ισοπροπανόλη, μείγμα ισοπροπανόλης και νερού (85% / 15 %), και τέλος απεσταγμένο νερό. Οι συμπαγείς και οι διακεκομμένες γραμμές αντιπροσωπεύουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και της μέτρησης, αντίστοιχα [27].....Σελ.16
- Σχήμα 17. Τυπική διάταξη ενός πεπλεγμένου αισθητήρα [2] .....Σελ.17
- Σχήμα 18. Κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού (περίπτωση  $N = 5$ ) σε ένα επίπεδο αισθητήρα χωρητικότητας (με κόκκινο χρώμα το υψηλό δυναμικό και με μπλε χρώμα το χαμηλό δυναμικό) [1].  
.....Σελ.17
- Σχήμα 19. Πεπλεγμένος αισθητήρας χωρητικότητας (αριστερά το σχέδιο) δεξιά η κατασκευή του [9]  
.....Σελ.18
- Σχήμα 20. Η πειραματική διάταξη και τα μέρη ενός IDE αισθητήρα χωρητικότητας. [9] .....Σελ.18
- Σχήμα 21. Πεπλεγμένος (interdigital) πυκνωτής ηλεκτρικός συντονιστής LC για διηλεκτρικό χαρακτηρισμό υλικών. Ο αισθητήρας resonator βασίζεται σε ηλεκτρικό LC(ELC): (α) Διάταξη ενός τυπικού αισθητήρα ELC. (β) Μετρήθηκε και προσομοιωμένη απόκριση μετάδοσης της δομής [24].  
.....Σελ.19
- Σχήμα 22. (α) Διάγραμμα του ανώτερου στρώματος του προτεινόμενου αισθητήρα (όλες οι γεωμετρικές παράμετροι είναι σε mm). (β) Συντελεστής της προσομοιωμένης παραμέτρου σκέδασης  $|S_{11}|$  του αισθητήρα στον αέρα, που υποστηρίζεται από υπόστρωμα PLA (πολυλακτίδιο) (γκρίζα περιοχή) στο εύρος συχνοτήτων λειτουργίας του αισθητήρα [16] .....Σελ.20
- Σχήμα 23. Συνολική κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου για (α) τον πρώτο συντονισμό στα 4,958 GHz, (β) τον δεύτερο συντονισμό στα 5,652 GHz, (γ) εγκάρσια διατομή στη μέση των δακτυλιοειδών συντονιστών στα 5,652 GHz.[16]. .....Σελ.20
- Σχήμα 24. Δομές του πεπλεγμένου μικροηλεκτροδίου (αριστερά) και του μικροπεριέκτη (δεξιά) [14].  
.....Σελ.21
- Σχήμα 25. Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου α) κατά τη μέτρηση λαδιού. (β) κατανομή δυναμικού κατά τη μέτρηση του νερού [14]. .....Σελ.21
- Σχήμα 26. Διάταξη μέτρησης μεταβολών της διαπερατότητας του αργού πετρελαίου με πεπλεγμένο αισθητήρα χωρητικότητας (IDC) και ταυτόχρονη μέτρηση της μεταβολής της θερμοκρασίας μέσα στο δοχείο του δείγματος πετρελαίου. ....Σελ.22
- Σχήμα 27. Αποτελέσματα από τις δοκιμές ελέγχου της γραμμικότητας της μέτρησης διαπερατότητας σε σχέση με τη θερμοκρασία, για τα μέταλλα χαλκός, άργυρος, μολυβδένιο, που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των ηλεκτροδίων των πεπλεγμένων αισθητήρων. ....Σελ.23
- Σχήμα 28. Σχετική διαπερατότητα ως συνάρτηση της συχνότητας για διάφορους επίπεδους πεπλεγμένους αισθητήρες χωρητικότητας .....Σελ.24
- Σχήμα 29. Η πιθανή θέση του MUT: (α) Πάνω από τα χάλκινα ηλεκτρόδια: (β) Μέσα στο υπόστρωμα [25]. .....Σελ.25
- Σχήμα 30. Γενικός μηχανισμός που περιγράφει τις αντιδράσεις οξειδωσης, διάσπασης και υδρόλυσης των φυτικών ελαίων με σχηματισμό υδροϋπεροξειδίων, αλδεϋδών, ελεύθερων ριζών κλπ.....Σελ.27
- Σχήμα 31. Μετρήσεις χωρητικότητας σε συχνότητα 1 KHz, μετά από επαναλαμβανόμενα τηγανίσματα ελαιολάδου, χρησιμοποιώντας πέντε παραπλήσιους ως προς την κατασκευή πεπλεγμένους αισθητήρες [9]. .....Σελ.28

Σχήμα 32. Γενικός μηχανισμός που περιγράφει τις αντιδράσεις οξειδωσης, διάσπασης και υδρόλυσης των ορυκτών ελαίων με σχηματισμό υδροϋπεροξειδίων, αλδεϋδών, ελεύθερων ριζών κλπ. [33]..	Σελ.29
Σχήμα 33. Απλός ταλαντωτής LC .....	Σελ.32
Σχήμα 34. Μηχανική ταλάντωση .....	Σελ.32
Σχήμα 35. Ταλάντωση πηνίου - πυκνωτή .....	Σελ.33
Σχήμα 36. Στάδια ταλάντωσης ενός συστήματος πηνίου - πυκνωτή .....	Σελ.33
Σχήμα 37. Τυπικό κύκλωμα ταλαντωτή Clapp .....	Σελ.35
Σχήμα 38. Σχηματικό PLL .....	Σελ.37
Σχήμα 39. Λειτουργία ανιχνευτή φάσης .....	Σελ.38
Σχήμα 40. Έξοδος ανιχνευτή φάσης .....	Σελ.39
Σχήμα 41. Κλείδωμα φάσης .....	Σελ.39
Σχήμα 42. Ανιχνευτής φάσης τύπου Π .....	Σελ.40
Σχήμα 43. Περιοχές λειτουργίας PLL .....	Σελ.42
Σχήμα 44. Πολλαπλασιαστής συχνότητας .....	Σελ.43
Σχήμα 45. Υλοποίηση κλασματικής σύνθεσης συχνοτήτων .....	Σελ.44
Σχήμα 46. Λειτουργία της αποδιαμόρφωσης FM .....	Σελ.44
Σχήμα 47. Μέθοδος βρόγχου τετράγωνου .....	Σελ.45
Σχήμα 48. Το σήμα εξόδου ενός συστήματος στο πεδίο των συχνοτήτων δίνεται από το γινόμενο του σήματος εισόδου επί την συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος: (α) απεικόνιση πλατών συναρτήσει της συχνότητας, (β) απεικόνιση μιγαδικών σε μία συχνότητα μόνο.....	Σελ.47
Σχήμα 49. Τύποι φίλτρων .....	Σελ.47
Σχήμα 50. Δικτυωτή και κλιμακωτή διάταξη φίλτρων .....	Σελ.49
Σχήμα 51. Ισοδύναμα κυκλώματα πυκνωτών - πηνίων .....	Σελ.50
Σχήμα 52. Βαθυπερατό φίλτρο με τελεστικό ενισχυτή .....	Σελ.51
Σχήμα 53. Βαθυπερατό φίλτρο μοναδιαίου κέρδους $R1=R2$ .....	Σελ.52
Σχήμα 54. Arduino Uno .....	Σελ.53
Σχήμα 55. Λογότυπο Arduino .....	Σελ.53
Σχήμα 56. Arduino Uno .....	Σελ.54
Σχήμα 57. Χωρητικός αισθητήρας .....	Σελ.57
Σχήμα 58. Σχηματικό στο Proteus .....	Σελ.59
Σχήμα 59. Αποτελέσματα προσομοίωσης ταλαντωτή στο PSpice .....	Σελ.59
Σχήμα 60. Υλοποίηση του κυκλώματος .....	Σελ.60

Σχήμα 61. Διάγραμμα Ροής .....	Σελ.61
Σχήμα 62. Σχηματική αναπαράσταση αποτελεσμάτων πίνακα 1 .....	Σελ.62
Σχήμα 63. Διαφοροποίηση της τάσης εξόδου ανάλογα με την συχνότητα ταλάντωσης στην ομάδα 1 .....	Σελ.63
Σχήμα 64. Σχηματική αναπαράσταση αποτελεσμάτων πίνακα 3 .....	Σελ.64
Σχήμα 65. Διαφοροποίηση της τάσης εξόδου ανάλογα με την συχνότητα ταλάντωσης στην ομάδα 2 .....	Σελ.64
Σχήμα 66. Σχηματικές απεικονίσεις και πολυωνυμικές εξισώσεις των αποτελεσμάτων της ομάδας 3 .....	Σελ.66
Σχήμα 67. Σχηματική απεικόνιση της εκτιμώμενης μέσης πολυωνυμικής εξίσωσης για την αντιστάθμιση θερμοκρασίας.....	Σελ.67

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Διηλεκτρικές σταθερές μερικών κοινών υλικών [17].....	Σελ.5
Πίνακας 2. Αποτελέσματα ομάδας 1 .....	Σελ.62
Πίνακας 3. Επίδραση επιμόλυνσης λαδιού με αντιψυκτικό στην τάση εξόδου .....	Σελ.63
Πίνακας 4. Επίδραση θερμοκρασίας στο δείγμα 1 .....	Σελ.65
Πίνακας 5. Επίδραση θερμοκρασίας στο δείγμα 2 .....	Σελ.65
Πίνακας 6. Επίδραση θερμοκρασίας στο δείγμα 3 .....	Σελ.65
Πίνακας 7. Επίδραση θερμοκρασίας στο δείγμα 4 .....	Σελ.65
Πίνακας 8. Επίδραση θερμοκρασίας στο δείγμα 5 .....	Σελ.65

# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Διηλεκτρικά υλικά και πόλωση

## 1.1 Το φαινόμενο της πόλωσης ενός διηλεκτρικού μέσου

Ένα υλικό που είναι αγωγός ρεύματος όταν βρεθεί υπό την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου, οι φορείς ηλεκτρικού φορτίου που έχει από τη φύση του, δηλαδή, αν είναι μέταλλο, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, αν είναι διάλυμα ηλεκτρολύτη τα θετικά και αρνητικά του ιόντα, ακολουθούν τις οποιοσδήποτε μεταβολές του ηλεκτρικού πεδίου, και με τον τρόπο αυτό συμβάλλουν στην εμφάνιση αγωγιμότητας στο υλικό. Αντίθετα, όταν το υλικό είναι διηλεκτρικό, δηλαδή μπορεί να πολωθεί κατά την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου, τα θετικά του φορτία κινούνται προς την φορά των δυναμικών γραμμών του πεδίου και τα αρνητικά φορτία αντίθετα (πόλωση), παρόλο που το συνολικό φορτίο του μέσου είναι μηδενικό, και τα μόρια συμπεριφέρονται μακροσκοπικά ως δίπολα. Αυτό το φαινόμενο είναι αντιστρεπτό και μόλις διακοπεί το εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο όλα τα φορτία επανέρχονται εκεί που βρίσκονταν. Κατά συνέπεια, όταν το ηλεκτρικό πεδίο μεταβάλλεται με το χρόνο, προκύπτουν αντίστοιχες μεταβολές στην πόλωση του μέσου. [19] Σημειώνεται ότι σε κάθε αναστροφή του ηλεκτρικού πεδίου, επειδή τα δίπολα πρέπει να προσανατολιστούν παράλληλα με τις δυναμικές γραμμές, χρειάζονται ορισμένο χρόνο, και αυτός ο χρόνος χαρακτηρίζεται ως «χρόνος χαλάρωσης».

## 1.2 Διηλεκτρική σταθερά και ηλεκτρική διαπερατότητα

Ένα πλήθος από παράγοντες επηρεάζουν την ανταπόκριση ενός διηλεκτρικού υλικού όταν ασκείται επάνω του εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι αφενός αυτές που αφορούν το πεδίο (πλάτος και συχνότητά του) και αφετέρου αυτές που αφορούν το υλικό (θερμοκρασία και μοριακή δομή του) [19]. Το χαρακτηριστικό μέγεθος που εκφράζει το διηλεκτρικό υλικό όταν αυτό βρίσκεται υπό την επίδραση στατικού ηλεκτρικού πεδίου είναι η διηλεκτρική σταθερά (dielectric constant). Σε συνθήκες εναλλασσόμενου πεδίου η διηλεκτρική σταθερά γενικεύεται στην μιγαδική ηλεκτρική διαπερατότητα (dielectric permittivity) ποσότητα που εξαρτάται από την συχνότητα του πεδίου και δίνεται από την σχέση 1

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon'' \quad (1.1)$$

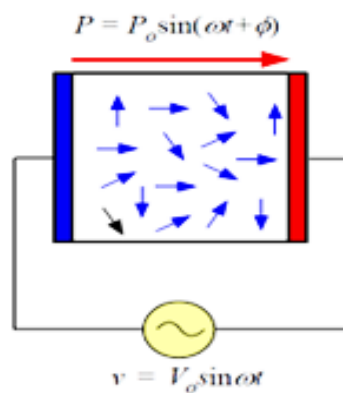
όπου  $\varepsilon'$  και  $\varepsilon''$  το πραγματικό και φανταστικό μέρος της ηλεκτρικής διαπερατότητας. Οι δύο αυτές διαπερατότητες συνδέονται μεταξύ τους ορίζοντας την εφαπτομένη ή παράγοντα των απωλειών,  $\tan \delta$ , που σχετίζεται με την διαχεόμενη στο υλικό ενέργεια ανά κύκλο φόρτισης

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (1.2)$$

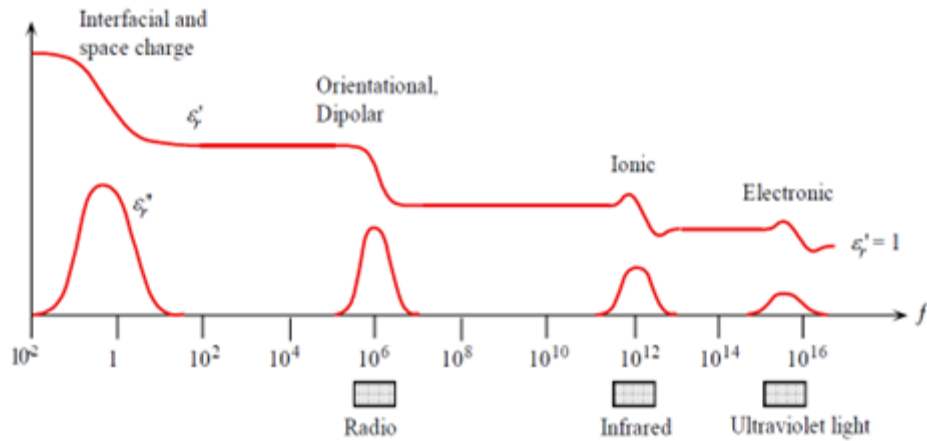
Αντίστοιχα η πειραματική τεχνική που ενδείκνυται να χρησιμοποιείται για τη μελέτη των μεταβολών της απόκρισης ενός διηλεκτρικού υλικού όταν εκτίθεται σε εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο ως προς το χρόνο είναι η Διηλεκτρική Φασματοσκοπία (Dielectric Spectrometry) [1]. Η διηλεκτρική φασματοσκοπία συχνά χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό και τον έλεγχο ποιότητας του μέσου, όπως τρόφιμα ή λιπαντικά έλαια καθώς και έλαια μηχανής. Μετράει την επίδραση ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου στο αισθητήριο (δίπολο) την στιγμή που έρχεται σε επαφή με το μέσο (έλαιο). Μία πολύ σημαντική παράμετρος που μετράται είναι η διαπερατότητα που δείχνει πως το ηλεκτρικό πεδίο

επιρεάζει τα φορτία του μέσου. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται σε χαμηλές μικροκυματικές συχνότητες. Το σύστημα μέτρησης αποτελείται από έναν χωρητικό αισθητήρα που βυθίζεται μέσα στο μέσο το οποίο θέλουμε να ερευνήσουμε, και το κύκλωμα επεξεργασίας που μετατρέπει τις αλλαγές του αισθητήρα σε ηλεκτρικό σήμα ικανό να το αναπαράγουμε και να το προβάλουμε. [1]

Σε γενικές γραμμές η εφαρμογή της τεχνικής στην εξέταση της ποιότητας ελαίων είναι απλή. Μικρή ποσότητα από το δείγμα λαδιού που ελέγχεται μεταφέρεται στο εσωτερικό μέρος ενός κατάλληλου πυκνωτή γνωστής γεωμετρίας, στα άκρα του οποίου εφαρμόζεται το εναλλασσόμενο πεδίο, Σχήμα 1, και λειτουργεί ως ένα διηλεκτρικό κελί (dielectric cell) . Με την εφαρμογή του ηλεκτρικού πεδίου στον πυκνωτή, δίπολα μόρια/ίοντα του υπό εξέταση υλικού τείνουν να ευθυγραμμιστούν με την κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου. Αν η συχνότητα [19] εναλλαγής είναι πολύ μικρή (δηλ. ο χρόνος άσκησης του πεδίου πολύ μεγάλος) τότε τα πάσης φύσεως δίπολα έχουν την δυνατότητα να ευθυγραμμισθούν με το πεδίο. Στην περίπτωση αυτή επιτυγχάνεται η μέγιστη πόλωση του υλικού, στην οποία αντιστοιχεί και η στατική τιμή της ηλεκτρικής διαπερατότητας. Όσο αυξάνεται η συχνότητα του πεδίου τα ηλεκτρικά δίπολα δυσκολεύονται να παρακολουθήσουν την κίνησή του με αποτέλεσμα να εμφανίζονται φαινόμενα διηλεκτρικής χαλάρωσης. Σε αυτήν την περίπτωση η πόλωση όσο και η ηλεκτρική διαπερατότητα παίρνουν μικρότερες τιμές, Σχήμα 2. Κάθε διεργασία χαλάρωσης εμφανίζεται σε διαφορετική περιοχή συχνοτήτων, έτσι το φάσμα χαλαρώσεων ενός υλικού μπορεί να περιλαμβάνει περισσότερες από μία διεργασίες, Σχήμα 2 [19]. Στο εύρος συχνοτήτων κάθε διεργασίας χαλάρωσης το πραγματικό μέρος της ηλεκτρικής διαπερατότητας παρουσιάζει μία μετάβαση από υψηλές σε χαμηλές τιμές, η τιμή του  $\epsilon'$  στο κάτω άκρο του εύρους των συχνοτήτων αντιστοιχεί στην στατική τιμή της διαπερατότητας για την συγκεκριμένη διεργασία, ενώ η τιμή της διαπερατότητας στο άνω άκρο των συχνοτήτων αντιστοιχεί στην τιμή υψηλών συχνοτήτων.



Σχήμα 1: Διηλεκτρικό υλικό υπό την επίδραση εναλλασσόμενου ηλεκτρικού πεδίου.



Σχήμα 2: Σχηματική απεικόνιση διαφορετικών διηλεκτρικών απωλειών χαλαρώσεων που παρατηρούνται σε στερεό μονωτικό υλικό.

Οι διηλεκτρικές απώλειες χαλαρώσεις περιγράφονται μαθηματικά μέσω των εξισώσεων διασποράς του Debye. Σύμφωνα με αυτές η μιγαδική έκφραση της διαπερατότητας  $\epsilon^*$  δίνεται από την σχέση:

$$\epsilon^* = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + i\omega\tau} \quad (1.3)$$

ενώ το πραγματικό μέρος  $\epsilon'$  και το φανταστικό μέρος  $\epsilon''$  από τις εκφράσεις:

$$\begin{aligned} \epsilon' &= \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2} \\ \epsilon'' &= \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty)\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \end{aligned} \quad (1.4)$$

όπου  $\epsilon_s$  είναι η στατική τιμή της διαπερατότητας,  $\epsilon_\infty$  είναι η τιμή της διαπερατότητας στις υψηλές συχνότητες,  $\tau$  είναι ο χρόνος χαλάρωσης και  $\omega$  η κυκλική συχνότητα του πεδίου αντίστοιχα.

Πειραματικά, τοποθετώντας δείγμα του λαδιού στο διηλεκτρικό κελί του αισθητήρα, με βάση τις μετρήσεις χωρητικότητας (capacity, C) και τις μετρήσεις του παράγοντα απωλειών (D) (που ταυτίζεται με την εφαιπτομένη των απωλειών, δηλ.  $D = \tan \delta$ ) [19] υπολογίζονται αντίστοιχα το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της ηλεκτρικής διαπερατότητας ως εξής:

$$\epsilon' = \frac{C}{C_0(1+D^2)} \quad (1.5)$$

$$\epsilon'' = \frac{C \cdot D}{C_0(1+D^2)} = \epsilon' D$$

Όπου με C συμβολίζονται οι μετρήσιμες τιμές χωρητικότητας με το διηλεκτρικό, με C<sub>0</sub> οι μετρήσιμες τιμές χωρητικότητας στο κενό και με D οι τιμές του παράγοντα απωλειών.

Συνοψίζοντας, η διηλεκτρική σταθερά περιγράφει την αλληλεπίδραση των μορίων μιας ουσίας και ενός ταλαντούμενου ηλεκτρικού πεδίου (δηλ. ενός ηλεκτρικού πεδίου που ταλαντώνεται μεταξύ θετικών και αρνητικών τιμών σε συγκεκριμένη AC συχνότητα). Η διηλεκτρική σταθερά που περιγράφηκε παραπάνω είναι μια θεμελιώδης φυσικοχημική ιδιότητα των υλικών, όπως και το σημείο βρασμού, το σημείο τήξης, το ιξώδες και ο δείκτης διάθλασης.

Σε τεχνικό επίπεδο, όλα τα παραπάνω μπορούν να μελετηθούν, να βελτιστοποιηθούν και να εφαρμοστούν, χρησιμοποιώντας τις λεγόμενες κοιλότητες συντονισμού (resonance cavities). Οι κοιλότητες συντονισμού είναι δομές που επιτυγχάνουν υψηλές τιμές παραγόντων ποιότητας (Q) σε ορισμένες συχνότητες [6]. Μια κοιλότητα μπορεί να θεωρηθεί ως ο χώρος που περικλείεται από μια αγωγίμη επιφάνεια και μέσα του ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μπορεί να διεγερθεί. Η ηλεκτρική και η μαγνητική ενέργεια αποθηκεύονται στο χώρο της κοιλότητας. Αυτό τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία μπορεί να διεγείρονται ή να είναι σε σύζευξη με ένα εξωτερικό κύκλωμα, μέσω μικρών καθετήρων ομοαξονικής γραμμής ή βρόχων. Οι κοιλότητες συντονισμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση της σύνθετης διαπερατότητας ενός υλικού. Στην πραγματικότητα, η εισαγωγή του δείγματος μέσα στη δομή και η αλληλεπίδρασή του με το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο προκαλεί αλλαγές στην απόκριση της συχνότητας της κοιλότητας.

Όπως προαναφέρθηκε, η αλληλεπίδραση μεταξύ ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και μιας μη μαγνητικά διαπερατής ουσίας μπορεί να περιγραφεί με όρους σύνθετης διαπερατότητας [6]:

$$\epsilon = \epsilon_r' + j \epsilon_r'' \quad (1.6)$$

όπου το φανταστικό μέρος  $\epsilon_r''$  καθορίζει τις διηλεκτρικές απώλειες. Εναλλακτικά οι απώλειες περιγράφονται με όρους εφαπτομένης απώλειας:

$$\tan \delta = \epsilon_r'' / \epsilon_r' \quad (1.7)$$

Κάθε αλλαγή στην απόκριση συχνότητας της κοιλότητας που προκαλείται από την εισαγωγή δείγματος μπορεί να περιγραφεί ως «μετατόπιση συχνότητας συντονισμού» και ως «διακύμανση του παράγοντα ποιότητας». Για να συσχετιστεί αυτή η αλλαγή με τη σύνθετη διαπερατότητα του δείγματος υπάρχει μια θεωρητική ανάλυση που αποδεικνύει ότι το πραγματικό μέρος  $\epsilon_r'$  της ηλεκτρικής διαπερατότητας εξαρτάται γραμμικά από τη σχετική μετατόπιση συχνότητας:

$$\epsilon_r' = K_s \cdot \frac{f_0 - f_1}{f_1} + 1 \quad (1.8)$$

ενώ το φανταστικό μέρος  $\epsilon_r''$  εξαρτάται γραμμικά από τη μεταβολή του παράγοντα ποιότητας

$$\epsilon_r'' = K_s \cdot \frac{1}{2} \left( \frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_0} \right) \quad (1.9)$$

όπου  $f_0$  και  $Q_0$  είναι αντίστοιχα η συχνότητα συντονισμού και συντελεστής ποιότητας που μετρούνται με την κενή κοιλότητα, και  $f_1$  και  $Q_1$  είναι οι τιμές που μετρήθηκαν με το δείγμα που έχει εισαχθεί. Η  $K_s$  είναι μια παράμετρος που εξαρτάται από το μέγεθος της αλληλεπίδρασης του ηλεκτρικού πεδίου με το δείγμα [6].

Τις πυκνωτές με παράλληλες πλάκες οπλισμού, η χωρητικότητα υπολογίζεται με βάση τις τιμές διηλεκτρικής σταθεράς ( $\epsilon'$ ) των δειγμάτων, χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση:

$$C_p = A \epsilon_0 \epsilon' / d \quad (1.10)$$

όπου,  $C_p$  είναι χωρητικότητα λαδιού (σε F),  $d$  είναι η απόσταση ανάμεσα στις παράλληλες πλάκες οπλισμού (σε m),  $A$  είναι το εμβαδόν της κάθε πλάκας (σε  $m^2$ ),  $\epsilon'$  είναι η σχετική διηλεκτρική σταθερά του λαδιού και  $\epsilon_0$  είναι η απόλυτη διηλεκτρική σταθερά του κενού χώρου =  $8,85 \cdot 10^{-12}$  (σε F/m ή σε  $C^2 N^{-1} m^{-2}$ ) [15].

Στους πεπλεγμένους αισθητήρες χωρητικότητας, μια απλή προσέγγιση για τον υπολογισμό της χωρητικότητας γίνεται όταν δεν ληφθούν υπόψη οι περιφερειακές επιδράσεις που δεν είναι σημαντικές [18]. Σ' αυτή την περίπτωση η ηλεκτρική χωρητικότητα του πυκνωτή με πεπλεγμένα ηλεκτρόδια (IDE) θα μπορούσε να προσεγγιστεί από τη σχέση:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{S} \cdot N \quad (1.11)$$

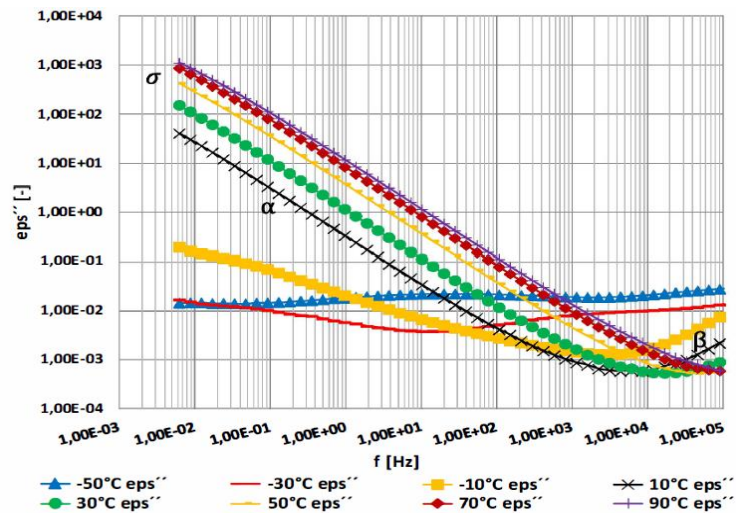
όπου  $\epsilon_0$  είναι η σταθερά διαπερατότητας του κενού χώρου, η οποία όπως προαναφέρθηκε είναι 8,854 pF/m,  $\epsilon_r$  είναι η σχετική διηλεκτρική σταθερά του μέσου, (π.χ. για τα διάφορα τηγανέλαια έχει τιμές που κυμαίνονται περίπου από 2 έως 4),  $S$  είναι η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων και  $N$  είναι ο αριθμός των ηλεκτροδίων.  $A$  είναι το εμβαδόν του ηλεκτροδίου, το οποίο υπολογίζεται από την εξίσωση  $A = L \times W$ , όπου  $L$  και  $W$  είναι το μήκος και το πλάτος του ηλεκτροδίου. Όπως φαίνεται στην εξίσωση αυτή, η χωρητικότητα  $C$  είναι ανάλογη με τη διηλεκτρική σταθερά διαπερατότητας του μέσου  $\epsilon_r$ , και είναι επίσης ανάλογη με την TPM του συγκεκριμένου λαδιού. Μετρώντας την χωρητικότητα  $C$  του IDE, μπορεί να εκτιμηθεί το συνολικό φορτίο πολικών ενώσεων του λαδιού (TPM) που είναι δείκτης της φθοράς του.

Η διηλεκτρική σταθερά είναι αδιάστατος αριθμός (δεν έχει μονάδες). Σε καθαρές απλές χημικές ενώσεις, οι τιμές του σημείου βρασμού, του σημείου τήξης, του ιξώδους και του δείκτη διάθλασης επηρεάζονται έντονα από τη διηλεκτρική τους σταθερά. [17]. Ο Πίνακας 1 δίνει τις τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς για μια σειρά από κοινά υλικά, με δεδομένο ότι η διηλεκτρική σταθερά του κενού ορίζεται ως 1,00.

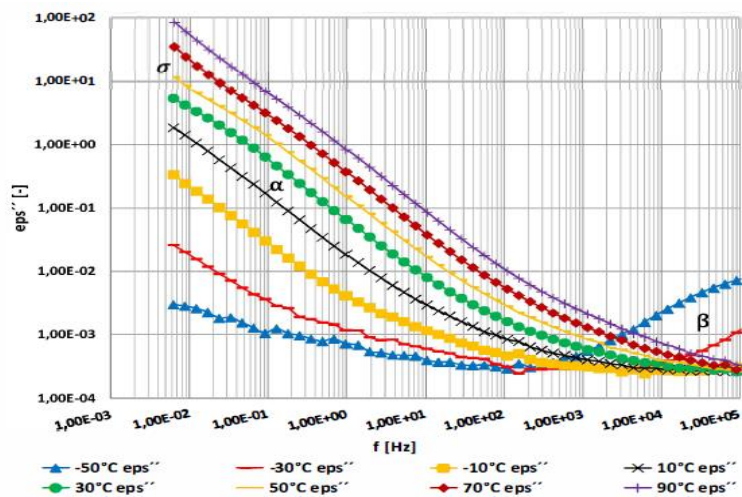
**Πίνακας 1 Διηλεκτρικές σταθερές μερικών κοινών υλικών [17]**

ΥΛΙΚΟ	ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΑ
Κενό	1,00 (ακριβώς)
Μέταλλα	Άπειρη
Αέρια	1,00 xx (σε πίεση 1 Ατμόσφαιρας)
Άζωτο	1.4680 (-210 °C)
Αιθάνιο	1.9356 (-178 °C)
Νερό	87,9 (0 C) με 55,5 (100°C)
Εξάνιο	1,8865 (20°C)
Βενζόλιο	2,285 (20°C)
Λιπαντικά Έλαια	2,1 to 2,8 (θερμοκρασία δωματίου)

Ειδικότερα για τα ορυκτέλαια και τα φυτικά έλαια, που είναι και τα κυριότερου ενδιαφέροντος υλικά αυτής της εργασίας, ισχύει ότι οι διηλεκτρικές απώλειες μεταβάλλονται με την επίδραση διαφορετικών συχνοτήτων, και οι μεταβολές αυτές επηρεάζονται και από την θερμοκρασία [5]. Στο Σχήμα 3 δίνονται αυτές οι μεταβολές, για την περίπτωση ενός ηλιέλαιου και στο Σχήμα 4 οι αντίστοιχες ενός τυπικού ορυκτελαίου.



Σχήμα 3 Μεταβολές στις διηλεκτρικές απώλειες με την επίδραση διαφορετικών συχνοτήτων, και θερμοκρασιών, για ένα ηλιέλαιο [5].



Σχήμα 4 Μεταβολές στις διηλεκτρικές απώλειες με την επίδραση διαφορετικών συχνοτήτων, και θερμοκρασιών, για τυπικό ορυκτέλαιο [5].

### 1.3 Τύποι ηλεκτρικών αισθητήρων μέτρησης ηλεκτρικής διαπερατότητας

Τα τελευταία 20 χρόνια γίνονται σημαντικές προσπάθειες για την ανάπτυξη αισθητήρων συντονισμού μικροκυμάτων για χαρακτηρισμό υλικών και μέσων σε ποικίλες εφαρμογές. Τα κύρια πλεονεκτήματα των αισθητήρων μικροκυμάτων έναντι άλλων αντίστοιχων, όπως π.χ οπτικοί αισθητήρες ή μικροηλεκτρομηχανικές συσκευές (MEMs), είναι ότι οι αισθητήρες χωρητικότητας μικροκυμάτων είναι παθητικοί, το κόστος τους είναι χαμηλό και παρέχουν γενικότερη ανίχνευση μεταβολών για διάφορους τύπους δειγμάτων [10]. Υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες συσκευών μέτρησης μικροκυμάτων: (i) ευρυζωνικοί αισθητήρες που χρησιμοποιούν γραμμές μετάδοσης ή κυματοδηγούς και (ii) αισθητήρες που βασίζονται σε συντονισμό, που επίσης χρησιμοποιούν κυματοδηγούς ή γραμμές μετάδοσης αλλά αυτές είναι φορτωμένες με συντονιστές (resonators). Οι αισθητήρες που βασίζονται σε συντονισμό προσφέρουν πιο ακριβή μέτρηση σε μια στενότερη ζώνη συχνοτήτων λόγω του εξαιρετικά πυκνού ηλεκτρικού πεδίου που παρέχεται από τους συντονιστές τους, το οποίο τους κάνει ευαίσθητους στα διηλεκτρικά φορτία. Έχει προταθεί ποικιλία διαμορφώσεων που αναπτύχθηκε για αισθητήρες τύπου συντονισμού μικροκυμάτων, ανάλογα με την εφαρμογή. Γενικά, κατά τους Ebrahimi et al. [10], οι επίπεδοι συντονιστές είναι προτιμώμενοι σε σύγκριση με τους αισθητήρες με κοιλότητα συντονισμού, λόγω της συμβατότητας ως προς την ενσωμάτωσή τους στην τεχνολογία lab-on-a-chip. Ωστόσο, συνήθως παρέχουν κάπως χαμηλότερη ευαισθησία σε σχέση με τους αισθητήρες κοιλότητας συντονισμού και αυτό αποτελεί περιοριστικό παράγοντα σε αρκετές εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ευαισθησία και ανάλυση.

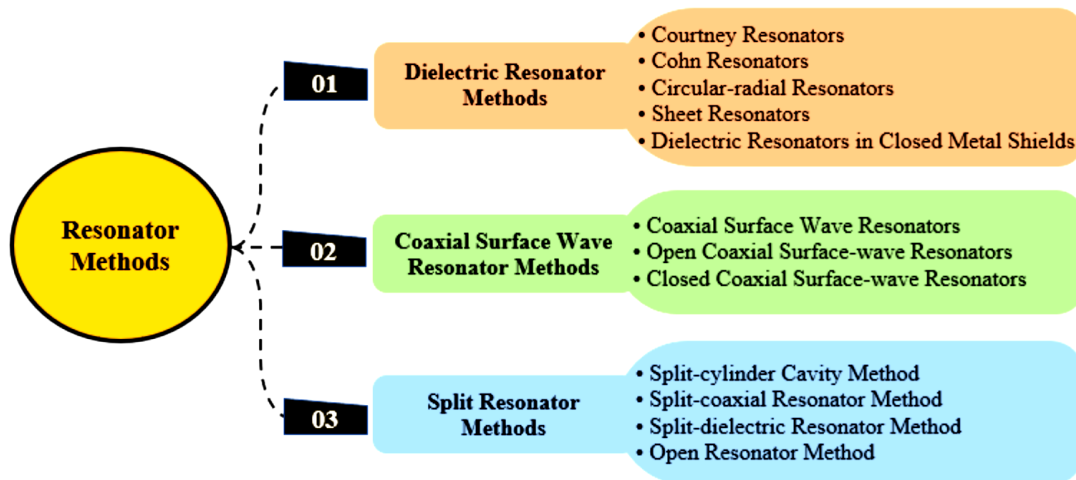
Η σημασία της μελέτης του χαρακτηρισμού υλικού είναι μεγάλη επειδή το υλικό αυτό μπορεί να χρησιμοποιείται για πολλές εφαρμογές [20] όπως π.χ. α) στη γεωργία, για τη μέτρηση υγρασίας και εκτίμηση της ξήρανσης των σιτηρών, και την κατάλληλη επεξεργασία των σπόρων προκειμένου να βελτιωθεί η βλάστησή τους, αλλά και ο έλεγχος των εντόμων σε αποθηκευτικούς χώρους κόκκων χρησιμοποιώντας ηλεκτρικά πεδία υψηλής συχνότητας και μικροκυμάτων, β) στην επεξεργασία τροφίμων για τον έλεγχο της ποιότητας και της ασφάλειάς τους, όπως στα γαλακτοκομικά προϊόντα για να προσδιορίζονται χονδρικά η περιεκτικότητα του γάλακτος σε ιοντικές ενώσεις, λίπη, υδατάνθρακες και πρωτεΐνες, στην συντήρηση νωπών προϊόντων όπως φρούτων και λαχανικών επειδή υπάρχει ανάγκη για γρήγορες μη καταστροφικές μετρήσεις της ποιότητάς τους για να γίνεται εκτίμηση της φρεσκάδας τους. Αυτό χρησιμοποιείται επίσης για τη γεωεπιστήμη επειδή κατά τη μελέτη των διηλεκτρικών ιδιοτήτων, γ) στη φαρμακοβιομηχανία προκειμένου να ελεγχθεί και να επικυρωθεί η ποιότητα και η ασφάλεια στα φάρμακα, κλπ. Η αναζήτηση στη βιβλιογραφία με χρήση των όρων «αισθητήρας μικροκυμάτων», «επίπεδοι συντονιστές μικροκυμάτων» πεπλεγμένοι αισθητήρες, αισθητήρες ηλεκτρικής διαπερατότητας, κ.ά. δίνει μόνο για την τελευταία δεκαετία σημαντικό αριθμό από ερευνητικές εργασίες.

Ιδιαίτερα, λόγω της αυξημένης βιομηχανικής ζήτησης σε διάφορους τομείς ελέγχου ποιότητας υγρών (π.χ. ποιότητα λαδιών και ορυκτελαίων, μέτρηση περιεχόμενης υγρασίας και νερού σε προϊόντα, μέτρηση περιεκτικότητας γλυκόζης σε υγρά, κ.λπ.), οι ερευνητές έχουν σχεδιάσει διάφορες μορφές αισθητήρων με υψηλή ακρίβεια, ευαισθησία αλλά και μικρό και συμπαγές μέγεθος. Υπάρχουν επίσης πολλές διαθέσιμες τεχνικές για την μέτρηση των πραγματικών και φανταστικών μερών της σύνθετης (μιγαδικής) διαπερατότητας (διηλεκτρική σταθερά, εφαπτομένη απώλεια).

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές για τη μέτρηση της ηλεκτρικής διαπερατότητας των υλικών [6]. Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να διακριθούν σε:

- τεχνικές ελεύθερου χώρου (free space),
- τεχνικές κυματοδηγών (waveguides),
- τεχνικές ομοαξονικού ανιχνευτή (coaxial probe) και
- τεχνική διαταραχής κοιλότητας (cavity perturbation).

Η τελευταία περίπτωση μπορεί να χαρακτηριστεί ως τεχνική συντονισμού ενώ οι άλλες είναι μη συντονιστικές τεχνικές. Οι μη συντονιστικές τεχνικές παρέχουν λιγότερο ακριβή αποτελέσματα αλλά σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων, ενώ από την άλλη πλευρά, οι τεχνικές συντονισμού είναι πολύ ακριβέστερες αλλά λειτουργούν αποδοτικά για μικρό φάσμα συχνοτήτων [6]. Οι τελευταίες, οι τεχνικές συντονισμού διακρίνονται επιπλέον σε υποκατηγορίες. Το Σχήμα 5 δείχνει μια κατηγοριοποίηση των τεχνικών συντονισμού ως προς τις μεθόδους μέτρησης των διηλεκτρικών ιδιότητες υλικού [20].



Σχήμα 5. Κατηγοριοποίηση μεθόδων που βασίζονται σε συντονιστές για την μελέτη ιδιοτήτων των υλικών [20]

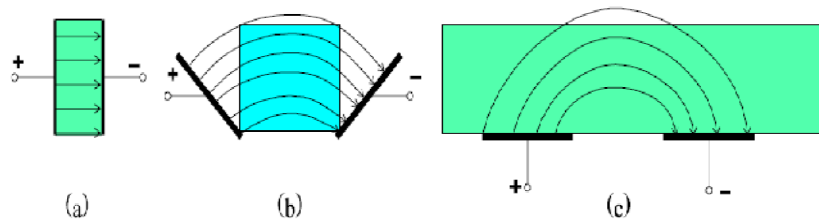
Η μέτρηση της ηλεκτρικής διαπερατότητας των λιπαντικών ελαίων είναι μία πολύ αποτελεσματική μέθοδος για την εξακρίβωση της κατάστασης και της ποιότητας τους. Ο αισθητήρας μετράει τις αλλαγές στην ηλεκτρική διαπερατότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων του, χρησιμοποιώντας υψηλές συχνότητες. Το κύκλωμα έχει σαν έξοδο μία τάση που σχετίζεται με τον παράγοντα απωλειών του μέσου που βρίσκεται υπό μελέτη. Το σύστημα αυτό έχει πολύ χαμηλό κόστος κατασκευής, μπορεί να βαθμονομηθεί ώστε να λειτουργεί με οποιοδήποτε λιπαντικό έλαιο και μπορεί να μας παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα σχετικά με την αλλαγή στην ποιότητα του. [2]

Όπως προαναφέρθηκε, μία ένδειξη για την κατάσταση ενός λαδιού μπορεί να παραχθεί από την μέτρηση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του. Αυτή τη στιγμή υπάρχουν διάφοροι τύποι αισθητήρων για την ποιότητα των λαδιών που βασίζονται στην αγωγιμότητα και την διαπερατότητα σε μια συχνότητα. Οι αισθητήρες που βασίζονται σε μετρήσεις διαπερατότητας χωρίζονται σε δύο τύπους ανάλογα με την έξοδό τους. Η πρώτη κατηγορία αισθητήρων μετράει τις αλλαγές στο πραγματικό μέρος της διαπερατότητας και η δεύτερη κατηγορία σχετίζεται με την μέτρηση της σύνθετης διαπερατότητας. Στην περίπτωση της πρώτης κατηγορίας, γίνονται μετρήσεις για αλλαγή στην χωρητικότητα των αισθητηρίων ενώ στην περίπτωση που οι αισθητήρες μετρούν την σύνθετη διαπερατότητα, εκτός από τις αλλαγές στην χωρητικότητα των αισθητηρίων γίνονται μετρήσεις και στις διηλεκτρικές απώλειες.

Η παράμετρος που σχετίζει το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της σύνθετης διαπερατότητας ονομάζεται συντελεστής απωλειών (D). Η σύνθετη διαπερατότητα ενός λιπαντικού ελαίου αλλάζει με την χρήση, δηλαδή την τριβή ή την θέρμανση, εξαιτίας της διαδικασίας οξείδωσης και της γενικότερης υποβάθμισης των διαφόρων πρόσθετων υλικών. Αυτή η διαδικασία επηρεάζεται από διάφορες προσμείξεις που μολύνουν το λάδι, όπως το νερό, η γλυκόλη, σωματίδια αιθάλης, μεταλλικά σωματίδια που μπορεί να οφείλονται σε μηχανικές τριβές και γενικότερα προϊόντα της καύσης. [2] Σε αυτήν την εργασία θα χρησιμοποιηθεί ένα αισθητήριο πεπλεγμένων ηλεκτροδίων (interdigitated electrode – IDE).

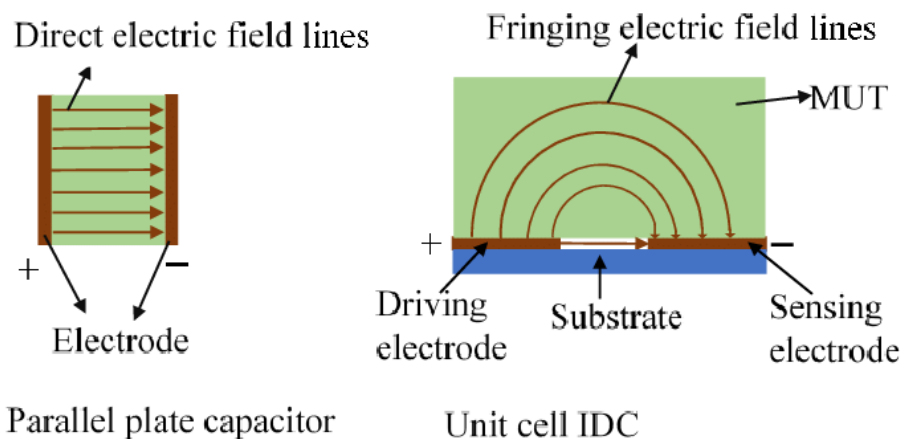
Τέτοιου είδους αισθητήρια χρησιμοποιούνται αρκετά σήμερα σε πολλές διατάξεις όπως σε μετρητές επιφανειακών ακουστικών κυμάτων, χημικούς αισθητήρες και βιοαισθητήρες MEMS. Ο αισθητήρας αυτός μπορεί να λύσει το πρόβλημα των σύνθετων βαθμονομήσεων βοηθώντας στην βελτίωση της ακρίβειας του συστήματος. Ακόμα, το σχήμα του και η κατασκευή του γενικότερα, δίνουν το πλεονέκτημα του ότι δεν υπάρχουν κινητά μέρη, η κατασκευή του είναι σχετικά εύκολη και απλή και ο σχεδιασμός του είναι εξαιρετικά ευέλικτος και κατάλληλος για πολλές εφαρμογές.[3]

Υπάρχουν αρκετοί τύποι ηλεκτρικών αισθητήρων (sensors) για τον έλεγχο της ποιότητας υγρών και πιο συγκεκριμένα λαδιών, είτε λαδιών μηχανής είτε εδωδιμων λαδιών. Οι σημαντικότεροι από αυτούς με βάση την αρχή λειτουργίας τους, είναι οι αισθητήρες μέτρησης ηλεκτρικής διαπερατότητας. Στους αισθητήρες αυτούς περιλαμβάνονται οπωσδήποτε δύο ηλεκτρόδια τουλάχιστον, σε διάταξη είτε παράλληλη, είτε γωνιακή είτε ομοεπίπεδη [31], όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 6 που δείχνει αυτή τη σταδιακή εξέλιξη των πυκνωτών τέτοιου τύπου.

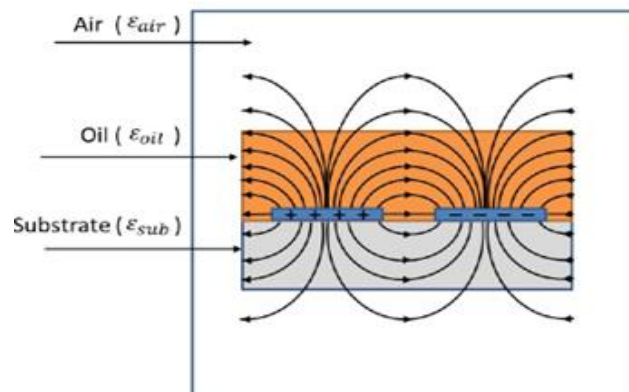


Σχήμα 6. Σχηματική αναπαράσταση της εξέλιξης της διάταξης των δύο ηλεκτροδίων πυκνωτή, που είναι τοποθετημένα σε διάταξη είτε παράλληλη, είτε γωνιακή είτε ομοεπίπεδη [31],

Ανάμεσα στα οποία δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο, όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 7α για δύο ηλεκτρόδια σε θέσεις έναντι και για δύο ηλεκτρόδια σε ομοεπίπεδη διάταξη και στο Σχήμα 7β για δύο συνεπίπεδα (coplanar) ηλεκτρόδια δακτυλοειδούς μορφής (ring electrodes).

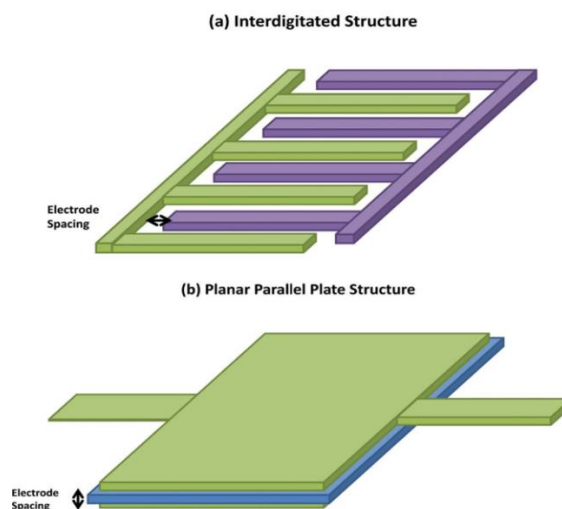


Σχήμα 7. Σχηματική αναπαράσταση της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου ανάμεσα α) σε δύο ηλεκτρόδια σε παράλληλη θέση (αριστερά) και β) σε δύο ομοεπιφανειακά ηλεκτρόδια δεξιά [30].



Σχήμα 8. Σχηματική αναπαράσταση της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου σε δύο «δακτυλιοειδή ομοεπιφανειακά ηλεκτρόδια», που στην επιφάνεια τους έχει τοποθετηθεί ποσότητα λιπαντικού [1].

Στις επίπεδες διατάξεις πυκνωτών περαιτέρω εξέλιξη της χρήσης δύο ηλεκτροδίων είναι η χρήση πολλών ηλεκτροδίων. Ένας πολύ διαδεδομένος τύπος επίπεδου πυκνωτή μεγάλης τεχνολογικής σημασίας είναι ο πυκνωτής επάλληλων ηλεκτροδίων που χαρακτηρίζεται ως «πεπλεγμένος πυκνωτής» (interdigitated capacitor, IDC) και αντίστοιχα πεπλεγμένων ηλεκτροδίων (interdigitated electrodes, IDE). Στο Σχήμα 9 φαίνεται η διαφοροποίηση στους πυκνωτές από την απλή μορφή των παράλληλων ηλεκτροδιακών πλακών στη σύγχρονη μορφή των επάλληλων ηλεκτροδίων [31].



Σχήμα 9. Σχηματική αναπαράσταση των επίπεδων πυκνωτών, πεπλεγμένου τύπου (πάνω) και παράλληλων επίπεδων πλακών (κάτω) [31]

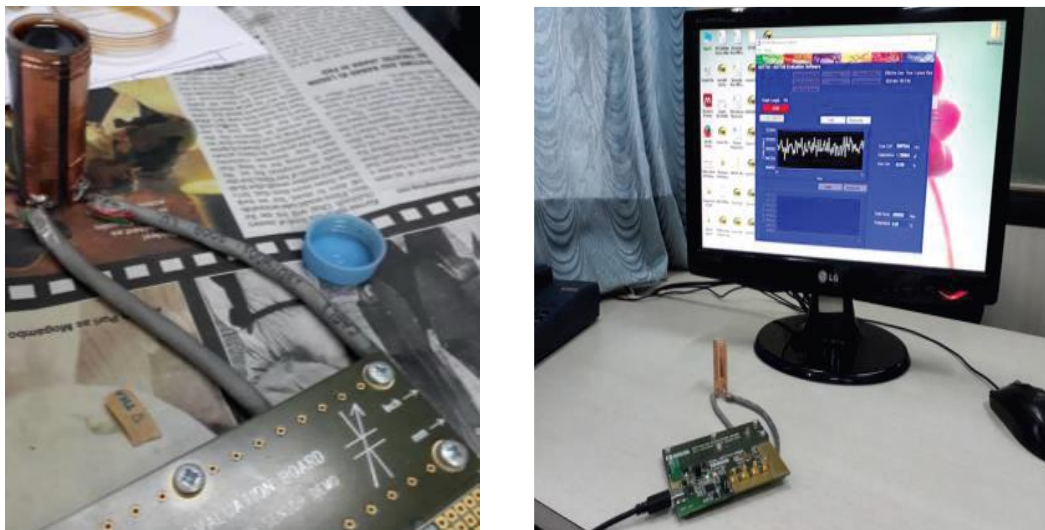
Η συνολική χωρητικότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων, (χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα ηλεκτρόδια αντιστάθμισης) διακρίνεται στις παρακάτω τρεις επιμέρους χωρητικότητες [21]:

- 1) την  $C_{upper}$  που περιλαμβάνει το πεδίο στον χώρο πίσω από τα ηλεκτρόδια.
- 2) την  $C_{thickness}$  που περιλαμβάνει το πεδίο που σχετίζεται με το πάχος των ηλεκτροδίων

3) την  $C_{material}$  που περιλαμβάνει το πεδίο που διεισδύει στο υλικό το οποίο θέλουμε να μετρήσουμε.

Θεωρείται ότι οι χωρητικότητες  $C_{upper}$  και  $C_{thickness}$  είναι σταθερές και πρακτικά δεν επηρεάζονται από το υλικό που είναι στο κάτω μέρος του αισθητήρα. Επομένως μπορούν να υπολογιστούν σαν σφάλματα μέτρησης στην κυρίως τιμή της χωρητικότητας του πυκνωτή, που είναι η τρίτη από αυτές. Με μια κατάλληλη διάταξη αντιστάθμισης μπορεί η κυρίως τιμή της χωρητικότητας του πυκνωτή να διορθωθεί με αφαίρεση των δύο άλλων τιμών [21].

Οι Shinde et al., [7] ανέπτυξαν μια εύχρηστη και μικρή σχετικά διάταξη που αποτελείται από ένα χωρητικό αισθητήρα με ένα ζεύγος κυλινδρικών ηλεκτροδίων κατασκευασμένων από μαλακό αυτοκόλλητο φύλλο χαλκού. Τα ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα στην εξωτερική πλευρά ενός πλαστικού σωλήνα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 10 Αυτό επιτρέπει την μη καταστρεπτική για το δείγμα του λιπαντικού, και χωρίς επαφή μέτρηση του υπό δοκιμή δείγματος λαδιού κινητήρα. Η διάμετρος του πλαστικού σωλήνα είναι 17,5 mm, το πάχος τοιχώματος 0,7 mm και το μήκος 52,5 mm. Το μήκος κάθε ηλεκτροδίου είναι 52 mm και η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι 2 mm. Ο χωρητικός αισθητήρας έχει αρχική χωρητικότητα 2,6474 pF με καθαρό λάδι ως διηλεκτρικό υλικό. Οι αισθητήρες χωρητικότητας συνδέονται με μονωμένα καλώδια σε διατάξεις AD7745/46 με ακροδέκτες για μέτρηση χωρητικότητας. Με τη χρήση του λογισμικού αξιολόγησης AD7745/46, η χωρητικότητα μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια 0,000001 pF.

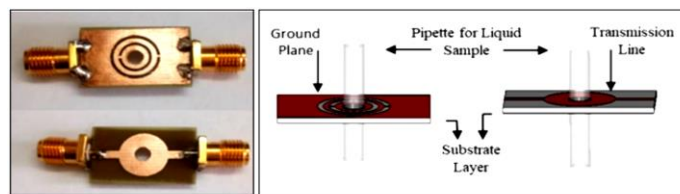


Σχήμα 10. Διάταξη ενός χωρητικού αισθητήρα (αριστερά) και επικοινωνία του με κατάλληλο λογισμικό μέσω ενός κυκλώματος διασύνδεσης (δεξιά) [7]

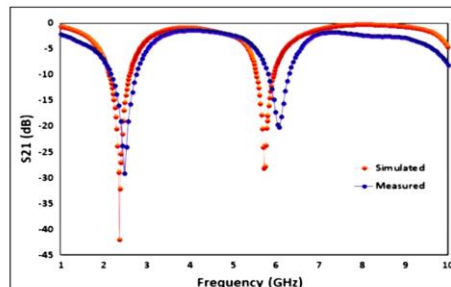
Οι παραπάνω ερευνητές [17] συμπέραναν ότι η αλλαγή της χωρητικότητας και η αλλαγή στο ιξώδες του λιπαντικού είναι ευθέως ανάλογες μεταξύ τους. Επιπλέον παρατήρησαν ότι και τα τρία είδη λαδιών που εξέτασαν έδειξαν πτωτική τάση στις τιμές των παραπάνω παραμέτρων με αύξηση των χιλιομέτρων που διανύθηκαν από το όχημα που έφερε τον κινητήρα. Ωστόσο, η αλλαγή στην χωρητικότητα είναι πολύ μικρότερη από αυτήν που ανέμεναν οι ερευνητές, ίσως λόγω τροποποίησης στην κατασκευή του χρησιμοποιημένου αισθητήρα. Η σχετική ερευνητική βιβλιογραφία προτείνει ως

βελτιωτικές τροποποιήσεις στον αισθητήρα την αύξηση του πάχους, του μήκους της λωρίδας χαλκού, τη μείωση του πάχους τοιχώματος του πλαστικού δοχείου, χρησιμοποίηση πολλαπλών χάλκινων πλακών τοποθετημένων με τον ίδιο τρόπο γύρω από το δοχείο, κλπ. προκειμένου να αυξηθούν οι τιμές των μεταβολών της χωρητικότητας.

Οι Khanna και Awasthi [22] παρουσίασαν έναν αισθητήρα μικροκυμάτων διπλής ζώνης (dual band) που βασίζεται σε έναν CSRR που λειτουργεί στα 2,45 GHz και 5,8 GHz. Το CSRR ήταν χαραγμένο στη βάση κατάλληλου υποστρώματος, το οποίο δημιουργεί μαγνητικό πεδίο εξ επαγωγής και την κατάλληλο χωρητικότητα. Αυτός ο συνδυασμός επαγωγής και χωρητικότητας. Το σχήμα 11 δείχνει το CSRR τόσο για το υπόστρωμα όσο και για τα επίπεδα στρώματα της γραμμής μεταφοράς που είναι ευθυγραμμισμένα με μια οπή για την πιπέτα, όπου τοποθετείται το δείγμα υγρών υλικών για τη δοκιμή. Ο αισθητήρας λειτουργεί ανέπαφο με το δείγμα και έχει σταθερή θέση δείγματος για δοκιμή υλικών. Δοκιμάστηκε για δυαδικά υγρά μίγματα όπως γάλακτος-ουρίας, νερού-αιθανόλης κλπ. Όταν γεμίζει η πιπέτα με υγρό δείγμα, οι αποκρίσεις αλλάζουν και στις δύο ζώνες συχνοτήτων. Αυτό δείχνει ότι ο αισθητήρας δεν έχει σχεδιαστεί για διπλή ανίχνευση που βασίζεται στις διπλές συχνοτήτες. Σε ανάλογες περιπτώσεις άλλοι ερευνητές [23] χρησιμοποίησαν τη μια ζώνη συχνότητας για ένα δείγμα αναφοράς και την άλλη ζώνη συχνότητας για τα δείγματα μέτρησης, ώστε να υπάρχει αντιστάθμιση.



(a)

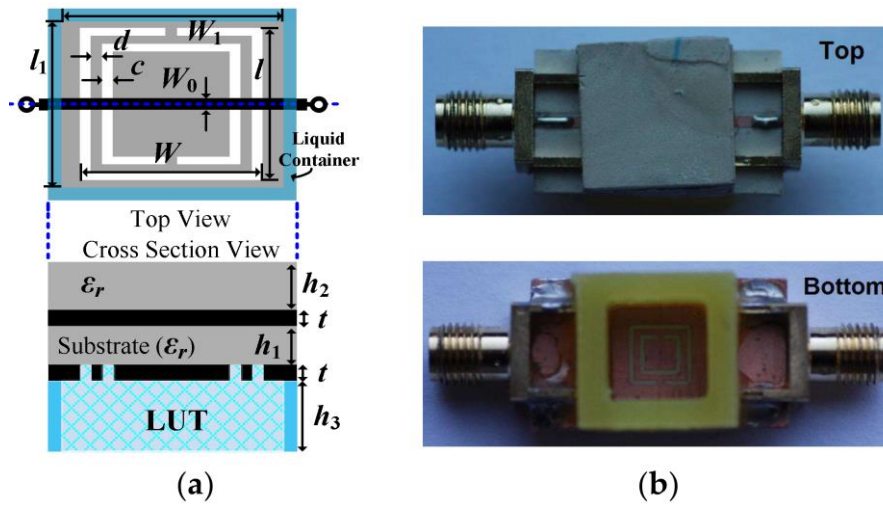


(b)

Σχήμα 11. Αισθητήρας μικροκυμάτων dual-band που βασίζεται σε συμπληρωματικό συντονιστή διαχωρισμένου δακτυλίου: (α) Διάταξη του αισθητήρα CSRR μαζί με την πιπέτα για υγρά δείγματα. (β) Μετρημένη και προσομοιωμένη μετάδοση απόκρισης για το σκέτο αισθητήρα. [22].

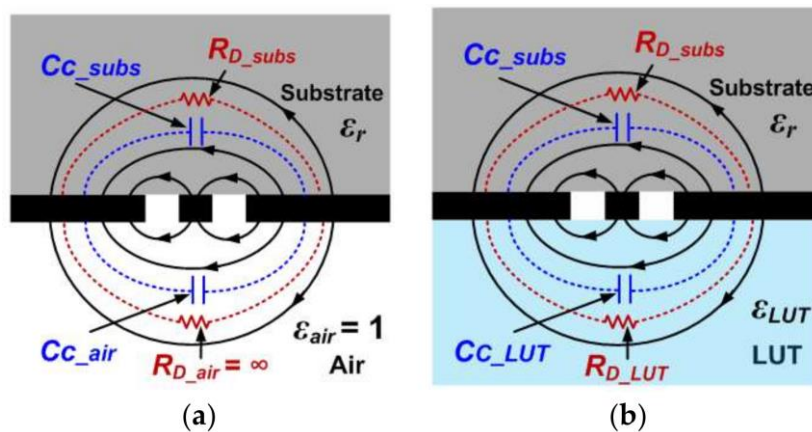
Οι Su et al. ανέπτυξαν ένα μικροκυματικό αισθητήρα με προτεινόμενη δομή ανίχνευσης που απεικονίζεται στο Σχήμα 12. Αποτελείται από μια ενσωματωμένη μικρολωρίδα φορτωμένης με ένα συμπληρωματικό συντονιστή διαχωρισμένου δακτυλίου τετραγωνικού σχήματος (complementary split ring resonator, CSRR), το οποίο λειτουργεί ως ανιχνευτής. Το κύριο πλεονέκτημα της χρήσης ενός CSRR είναι ότι αυτός ο συντονιστής εμφανίζει κατανομημένη χωρητικότητα σε όλη την περίμετρο, και για το λόγο αυτό, η χωρητικότητά του είναι αρκετά ευαίσθητη στην παρουσία ενός δείγματος (Liquid Under Test, LUT) από πάνω του. Με άλλα λόγια, η συχνότητα είναι αρκετά ευαίσθητη στη

διαπερατότητα του LUT. Επιπλέον, ένα δοχείο τοποθέτησης του υγρού προστίθεται στο επίπεδο γείωσης που περιβάλλει το CSRR.



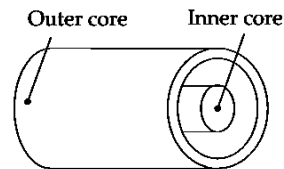
Σχήμα 12. Όψεις κορυφής και διατομής (α) και φωτογραφία (β) του CSRR. Οι διαστάσεις είναι:  $W = 1 = 5,92 \text{ mm}$ ,  $c = d = 0,5 \text{ mm}$ ,  $W_0 = 1,15 \text{ mm}$ ,  $W_1 = 11 = 9,92 \text{ mm}$ ,  $h_1 = 1,27 \text{ mm}$ ,  $h_2 = 3,81 \text{ mm}$ ,  $h_3 = 7,2 \text{ mm}$  και  $t = 35 \text{ m}$ . Το υπόστρωμα είναι Rogers RO3010 με διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r = 10,2$  και το δοχείο είναι FR4. [29]

Με την εισαγωγή το LUT σε ένα τέτοιο δοχείο όπως περιγράφηκε παραπάνω [29], είναι δυνατό να επιτευχθεί συγκεκριμένο βάθος υγρού, το οποίο είναι απαραίτητο στην προτεινόμενη μέθοδο ανίχνευσης (ιδιαίτερα, το βάθος του δοχείου όταν εάν είναι πλήρως γεμάτο με το LUT, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ευαισθησία). Η επίδραση του βάθους γεμίσματος του δείγματος στη μορφή του πεδίου, φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 13.



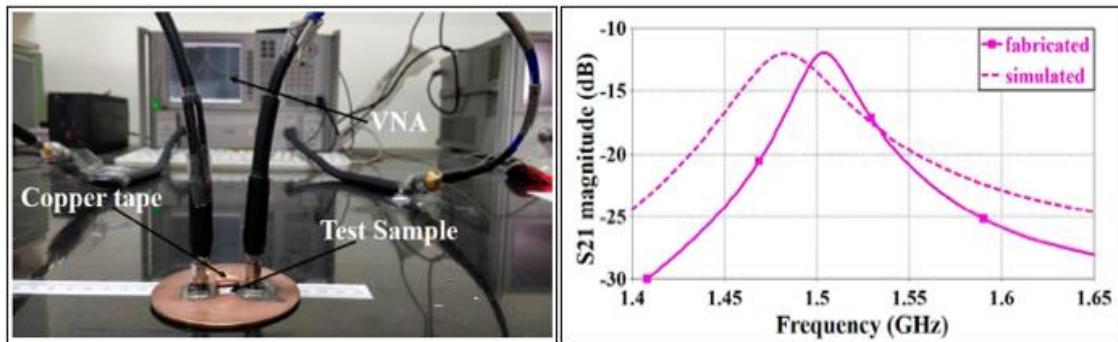
Σχήμα 13. Αποψη διατομής της περιοχής υποδοχής του CSRR, με τις γραμμές ηλεκτρικού πεδίου και τη συμβολή στη συνολική χωρητικότητα και τη διηλεκτρική αντίσταση του CSRR. (α) Με άδειο δοχείο. β) με γεμάτο δοχείο. [29]

Η συνεχής ηλεκτρονική παρακολούθηση (on line monitoring) υπολειμμάτων στο λιπαντικό έχει αυξημένο ενδιαφέρον και για την λειτουργία του περιστρεφόμενου και του παλινδρομικού μέρους των αεροκινητήρων τύπου turbo, για ευνόητους λόγους ασφαλείας αλλά και οικονομικούς λόγους. Και στην περίπτωση αυτή είναι επιθυμητό να αναπτυχθεί κατάλληλος αισθητήρας που να λειτουργεί σε ιδιαίτερα πολύπλοκο και απαιτητικό περιβάλλον. Για το σκοπό αυτό οι Han et al., [11] ανέπτυξαν κυλινδρικού τύπου χωρητικό αισθητήρα που μπορεί απλά να είναι ενσωματωμένος εν ροή στον αγωγό του συστήματος λαδιού κινητήρα, για να μπορεί να ανιχνεύει αποτελεσματικά, διαρκώς και σε πραγματικό χρόνο την αλλαγή της κατάστασης του λαδιού (Σχήμα 14). Στην εργασία τους γίνεται μια προσπάθεια πειραματικής κατασκευής κυλινδρικού χωρητικού αισθητήρα που προσομοιώνει τις πραγματικές συνθήκες του συστήματος λίπανσης στον αεροκινητήρα. Επιπλέον, επειδή η θερμοκρασία και ο ρυθμός ροής του λαδιού επηρεάζουν την μεταβολή χωρητικότητας ο έλεγχος του αισθητήρα έγινε με διάφορα πειράματα προσομοίωσης, όπου μεταβάλλονταν όλοι αυτοί οι παράγοντες. Αυτά τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι ο κυλινδρικός χωρητικός αισθητήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση των υπολειμμάτων στο λιπαντικό και κατ' επέκταση της κατάστασης της υγείας του αεροκινητήρα.



Σχήμα 14. Αναπαράσταση ενός αισθητήρα χωρητικότητας κυλινδρικού τύπου, όπου το λιπαντικό προς μέτρηση ρέει ανάμεσα από το εσωτερικό και εξωτερικό περίβλημα. [11]

Άλλοι ερευνητές [26] σχεδίασαν ένα αισθητήρα με κυλινδρική κοιλότητα (SIW) σε συχνότητα λειτουργίας 1,5 GHz και στη συνέχεια συνέκριναν τα αποτελέσματά τους με ένα αισθητήρα με ορθογώνια κοιλότητα (SIW) λαμβάνοντας υπόψη τις ίδιες παραμέτρους. Ο κυλινδρικός αισθητήρας SIW που αναπτύχθηκε παρουσίασε αύξηση στην ευαισθησία κατά 25% και ελαχιστοποιήθηκε το συνολικό μέγεθος κυκλώματος κατά 22% σε σύγκριση με έναν ορθογώνιο αισθητήρα SIW. Το Σχήμα 15 δείχνει τον κυλινδρικό αισθητήρα με την κοιλότητα συντονισμού μαζί με το φορτωμένο δείγμα. Η κοιλότητα συντονισμού σχεδιάστηκε σε βασική λειτουργία TM<sub>010</sub> σε συχνότητα λειτουργίας 1,5 GHz και χρησιμοποιήθηκε για ανίχνευση στερεών δειγμάτων. Οι συντονιστές με κυλινδρική κοιλότητα παράγουν συνήθως υψηλό ηλεκτρικό πεδίο για μεγαλύτερη ευαισθησία και ακρίβεια μέτρησης.

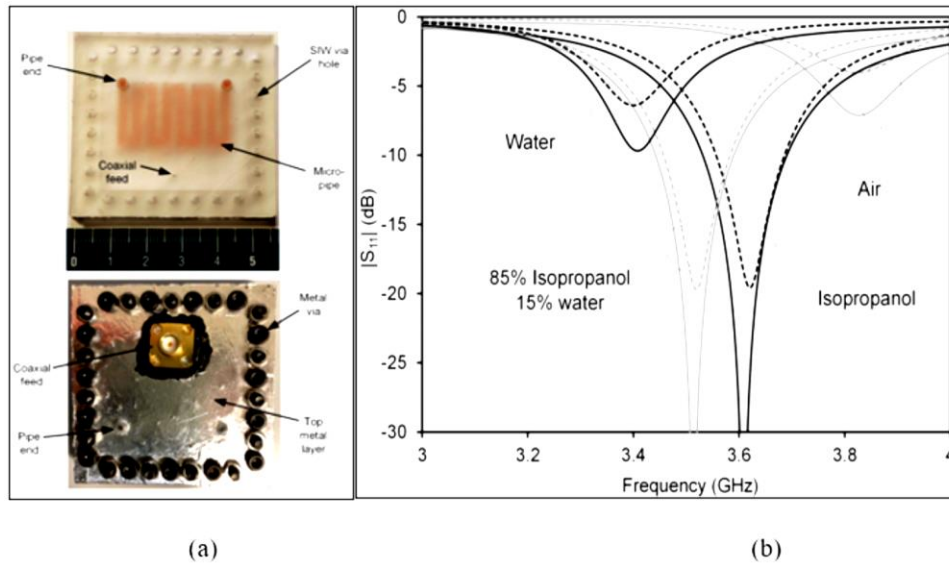


(a)

(b)

Σχήμα 15. Αισθητήρας κυλινδρικής κοιλότητας: (α) Κατασκευασμένος κυλινδρική κοιλότητα συντονισμού με την κοιλότητα κατά μήκος. (β) Μετρημένες και προσομοιωμένες αποκρίσεις μετάδοσης.

Οι Rocco et al. [27] εφάρμοσαν μια διαφορετική τεχνική για την ανάπτυξη ενός συντονιστή κοιλότητας με βάση το υπόστρωμα. (Τεχνολογία Substrate-Integrated Waveguide, SIW). Ο αισθητήρας SIW αναπτύχθηκε με βάση μια τετράγωνο δομή κοιλότητας και ένα 3D-εκτυπωμένο και ενσωματωμένο πολυαναδιπλούμενο σωλήνα, που είναι ένας «εσωτερικός μαιανδρικός σωλήνας», με είσοδο και έξοδο για την έγχυση υγρών δειγμάτων, και τροφοδοτούνταν από κατάλληλα προσαρμοσμένο ομοαξονικό καθετήρα. Αν και το υλικό τρισδιάστατης εκτύπωσης είχε μεγάλες διηλεκτρικές απώλειες, οι οποίες υποβάθμισαν την ποιότητα των μετρήσεων, οι ερευνητές ελαχιστοποίησαν το διηλεκτρικό μέσο πλήρωσης της κοιλότητας και επίσης ελαχιστοποίησαν το πάχος των τοιχωμάτων του σωλήνα. Αυτό έγινε για να αποφευχθεί η σημαντική απώλεια στην κοιλότητα, η οποία επηρέαζε την εφαπτομένη απώλεια του δείγματος. Το Σχήμα 16α απεικονίζει το σχέδιο του ενσωματωμένου στο υπόστρωμα κυματοδηγού μαζί με το τρισδιάστατο εκτυπωμένο κανάλι για ροή του εξεταζόμενου υγρού από την είσοδο προς την έξοδο. Χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή υλικών με υψηλό εύρος διαπερατότητας από 4 έως 76, σε συχνότητα λειτουργίας 3,82 GHz. Σε αυτή τη μελέτη, με την τεχνική SIW, χρησιμοποιήθηκε ειδικό μέταλλο, που μέσω αυτού παράγαγε υψηλό ηλεκτρικό πεδίο για να αυξήσει την ευαισθησία. Όμως τελικά, αυτό αύξησε το κόστος της κατασκευής και της μέτρησης λόγω της πολυπλοκότητας του σχεδιασμού.

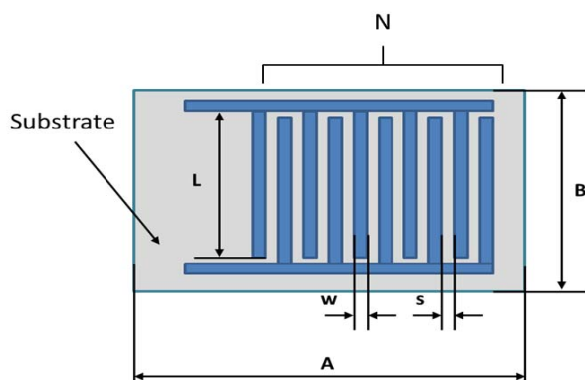


Σχήμα 16. Αισθητήρας με τον κυματοδηγό ενσωματωμένο στο υπόστρωμα (SIW): (α) Διάταξη του αισθητήρα SIW κατά μήκος, με ενσωματωμένο το μικροσωλήνα. (β) Μετρημένη και προσομοιωμένη απόκριση ανάκλασης για κενό (αέρας), καθαρή ισοπροπανόλη, μείγμα ισοπροπανόλης και νερού (85% / 15 %), και τέλος απεσταγμένο νερό. Οι συμπαγείς και οι διακεκομμένες γραμμές αντιπροσωπεύουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και της μέτρησης, αντίστοιχα [27].

## 1.4 Πεπλεγμένοι αισθητήρες μέτρησης διαπερατότητας (Interdigitated sensors)

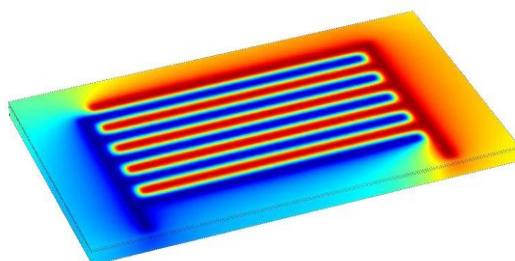
Μια ιδιαίτερη κατηγορία, όπως προαναφέρθηκε, αισθητήρων είναι οι λεγόμενοι Πεπλεγμένοι αισθητήρες μέτρησης ηλεκτρικής διαπερατότητας ή Πεπλεγμένοι αισθητήρες χωρητικότητας. Αντίστοιχα στην περίπτωση αυτή η μέθοδος χαρακτηρίζεται εκτός από Διηλεκτρική Φασματομετρία και Πεπλεγμένη Διηλεκτρομετρία [8].

Οι Torres-Perez και Hartfield ανέπτυξαν ένα ηλεκτρικό αισθητήρα χωρητικότητας και περιέγραψαν λεπτομερώς τις αρχές λειτουργίας για τον έλεγχο ποιότητας λιπαντικών ελαίων σε πραγματικό χρόνο. Ο αισθητήρας βασίζεται σε οριακό ταλαντωτή για την παρακολούθηση των απωλειών του διηλεκτρικού σε υψηλά επίπεδα συχνότητας (>1 MHz). Μέσα από κατάλληλο σχεδιασμό με ηλεκτρονική εκτύπωση κατασκευάζεται ένας χαμηλού κόστους, αποτελεσματικός και ανθεκτικής εφαρμογής αισθητήρας κατάλληλος για χρήση σε σκληρές συνθήκες περιβάλλοντος και υγρού μέσου. [2]



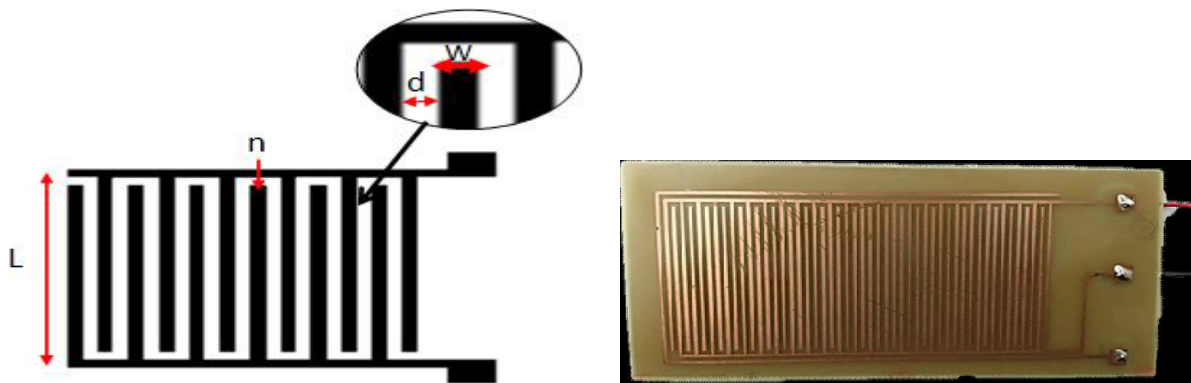
Σχήμα 17. Τυπική διάταξη ενός πεπλεγμένου αισθητήρα [2]

Οι Fendri et al. [1] ανέπτυξαν ένα πεπλεγμένο αισθητήρα επίπεδου τύπου, ικανό για παρακολούθηση της ποιότητας βρώσιμων λαδιών. Σύμφωνα με διαφορετικές μελέτες για τη μέτρηση λαδιού, σχετικές με τον χαρακτηρισμό είτε των βρώσιμων ελαίων είτε των τηγανέλαιων, η διηλεκτρική σταθερά είναι στην περιοχή τιμών από 2,5 έως 4. Η μεταβολή είναι πολύ μικρή, της τάξης του 0,01, οπότε είναι σαφές ότι αυτή η μέτρηση είναι πολύ κρίσιμη, και είναι πολύ δύσκολο να εντοπιστεί αυτή η μικρή αλλαγή διηλεκτρική σταθερά, παρά μόνο εάν αντιστοιχηθεί σε υψηλή μεταβολή του τιμή χωρητικότητας και χρήση πολύ ακριβούς μετρητή. Για να ικανοποιηθούν αυτές οι απαιτήσεις, η γεωμετρία του αισθητήρα έπρεπε να βελτιστοποιηθεί. Το μοντέλο του επίπεδου αισθητήρα αναπτύχθηκε στο Comsol Multiphysics για να διερευνηθεί η γεωμετρία του αισθητήρα. Εφαρμόστηκε δυναμικό AC με πλάτος 1 V στο εύρος συχνοτήτων [40 Hz – 10 MHz]. Το Σχήμα 18 δείχνει την κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού στο περίπτωση  $N = 5$ , στην επιφάνεια του αισθητήρα.



Σχήμα 18. Κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού (περίπτωση  $N = 5$ ) σε ένα επίπεδο αισθητήρα χωρητικότητας (με κόκκινο χρώμα το υψηλό δυναμικό και με μπλε χρώμα το χαμηλό δυναμικό) [1].

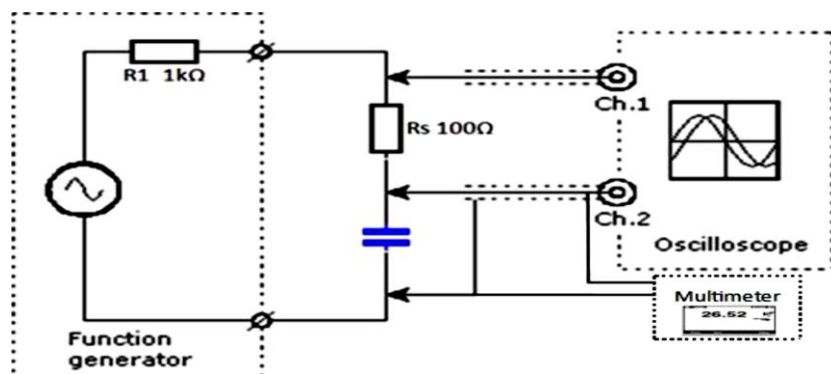
Μια χωρητική μέθοδος ανίχνευσης αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας το μοντέλο IDE (Inter-Digital Electrode sensor) για την εκτίμηση της αποικοδόμησης του μαγειρικού λαδιού [9]. Οι αισθητήρες IDE χρησιμοποιήθηκαν ευρέως στην ανίχνευση μεταβολών πίεσης, επιτάχυνσης, παραμόρφωσης, μετατόπισης και θέσης. Επιπλέον, οι διαμορφώσεις IDE έχουν πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις άλλες διαμορφώσεις συμπεριλαμβανομένου του ευέλικτου σχεδιασμού, της ευκολίας κατασκευής, της απουσίας κινούμενων μερών, το χαμηλό κόστος και τη μονόπλευρη πρόσβαση στο αισθητηριακό στρώμα. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 19, το σχηματικό του αισθητήρα IDE αποτελείται από τα δύο μέρη της μη συνδεδεμένης γραμμής. Οι παράμετροι του αισθητήρα περιλαμβάνουν τα εναλλάξ δακτυλιοειδή ηλεκτρόδια,  $n$ , με πλάτος ηλεκτροδίου,  $w$ ; την απόσταση μεταξύ δύο πόλων,  $d$ , και το μήκος του ηλεκτροδίου,  $L$ . Ο IDE αισθητήρας χωρητικότητας φαίνεται σχεδιαστικά στο αριστερό μέρος του Σχήματος 19 ενώ η κατασκευή του με βάση τον Idros et al. [9] στο δεξί μέρος.



Σχήμα 19. Πεπλεγμένος αισθητήρας χωρητικότητας (αριστερά το σχέδιο) δεξιά η κατασκευή του [9]

Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 19, το διάγραμμα ροής δείχνει το διαδικασία από την αρχή μέχρι την ολοκλήρωση του πείραμα. Στο πρώτο βήμα, ο εξοπλισμός για αυτό Το πείραμα ρυθμίστηκε με τη γεννήτρια συναρτήσεων, παλμογράφο και πολύμετρο. Η τάση εισόδου ορίστηκε στα 10 V και ο αισθητήρας IDE εισήχθη στο Μαγειρικό λάδι. Στη συνέχεια, τέσσερις διαφορετικές συχνότητες. 10 Hz, Τα 50Hz, 100Hz και 1kHz δόθηκαν στον αισθητήρα IDE από τη γεννήτρια συναρτήσεων. Στη συνέχεια, η χωρητικότητα και η κορυφή μετρήθηκαν μέχρι την τιμή της μέγιστης τάσης. Η αξία του Η χωρητικότητα θα συγκριθεί με τη διαφορετική ποιότητα λαδιού με βάση τους αριθμούς που χρησιμοποιούνται και τη συχνότητα που παρέχεται.

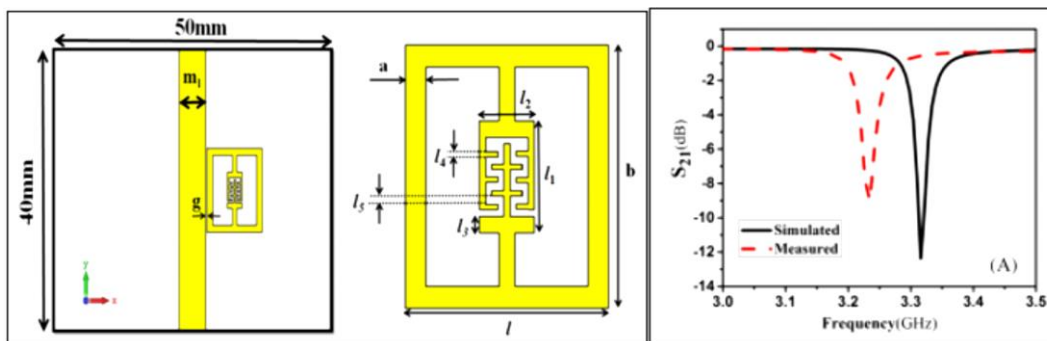
Η συνολική διάταξη του πειράματος φαίνεται στο Σχήμα 20. Η γεννήτρια συναρτήσεων (function generator), ο IDE αισθητήρας και οι δύο αντιστάσεις (οι R1 και Rs συνδέονται σειρά). Ο παλμογράφος (oscilloscope) συνδέθηκε κατά μήκος του Rs και το πολύμετρο συνδέθηκε στον αισθητήρα IDE. Το R1 και το Rs ορίστηκαν σε 1kΩ και 100Ω αντίστοιχα. Το εισερχόμενο σήμα (input) από τη γεννήτρια συναρτήσεων είναι στη μορφή του ένα ημιτονοειδές κύμα. Το εξερχόμενο σήμα (output) παρακολουθείται και μετρείται τελικά από τον παλμογράφο.



Σχήμα 20. Η πειραματική διάταξη και τα μέρη ενός IDE αισθητήρα χωρητικότητας. [9]

Τα τελευταία χρόνια προέκυψαν αξιοσημείωτες εξελίξεις στο σχεδιασμό των επίπεδων συντονιστών μικροκυμάτων, λόγω του αυξανόμενου ενδιαφέροντος για την ανάπτυξη επίπεδων αισθητήρων συντονισμού που προσφέρουν υψηλή ευαισθησία και ακρίβεια. Οι καλές επιδόσεις των αισθητήρων για ανίχνευση μικρών αλλαγών στην ηλεκτρική διαπερατότητα, είναι ένα από τα

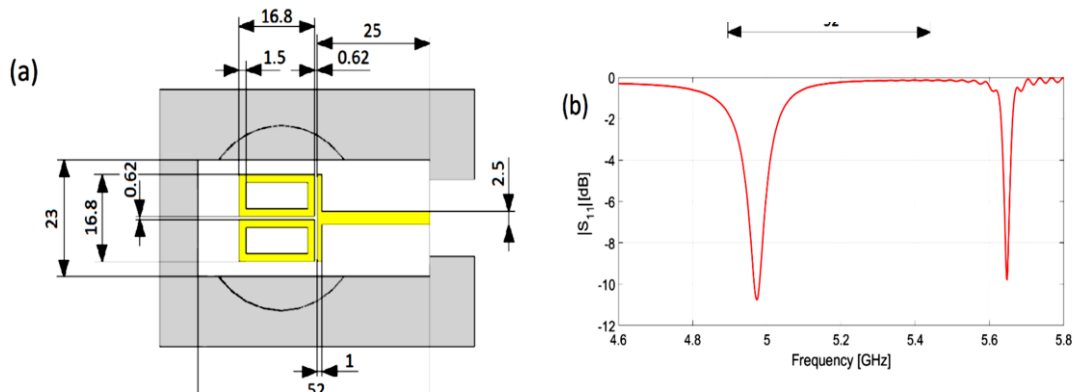
πλεονεκτήματα για την ανίχνευση των ιδιοτήτων διαφόρων τύπων υλικών όπως στερεά, σκόνη και υδατικά διαλύματα [20]. Πρόσφατα, προτάθηκε ένας υψηλής ευαισθησίας αισθητήρας με microstrip με συντονιστή Electric-LC(ELC) προτάθηκε από τον Karoor et al., [24]. Οι ερευνητές αυτοί απέδειξαν την υψηλή ευαισθησία φορτώνοντας το στοιχείο ELC με τον πεπλεγμένο πυκνωτή (interdigital capacitor) (IDC). Ο IDC προσφέρει βελτίωση στην κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή ανίχνευσης, τουλάχιστον στη συχνότητα λειτουργίας του (3,316 GHz) για την οποία σχεδιάστηκε. Αυτή η βελτίωση υποδηλώνει υψηλή ικανότητά του για ανίχνευση μικρών αλλαγών στη σύνθετη διαπερατότητα του δείγματος που δοκιμάστηκε. Το Σχήμα 21 απεικονίζει το συντονιστή ELC ευθυγραμμισμένο, με το επίθεμα στη μπροστινή πλευρά του υποστρώματος. Σε αυτή την κατάσταση, ο συντονιστής ELC θα διεγείρεται από το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται από το IDC και θα δημιουργεί μια αιχμηρή εγκοπή που εμφανίζεται σε συχνότητα συντονισμού 3.316 GHz. Όταν ο αισθητήρας ELC είναι φορτωμένος με ένα δείγμα με διαπερατότητα 10, η συχνότητα συντονισμού μετατοπίζεται προς τα κάτω κατά 1,536 GHz, δίνοντας υψηλή ευαισθησία 170,67 MHz και κανονικοποιημένη ευαισθησία και 5,14%, αντίστοιχα.



Σχήμα 21. Πεπλεγμένος (interdigital) πυκνωτής ηλεκτρικός συντονιστής LC για διηλεκτρικό χαρακτηρισμό υλικών. Ο αισθητήρας resonator βασίζεται σε ηλεκτρικό LC(ELC): (α) Διάταξη ενός τυπικού αισθητήρα ELC. (β) Μετρήθηκε και προσομοιωμένη απόκριση μετάδοσης της δομής [24].

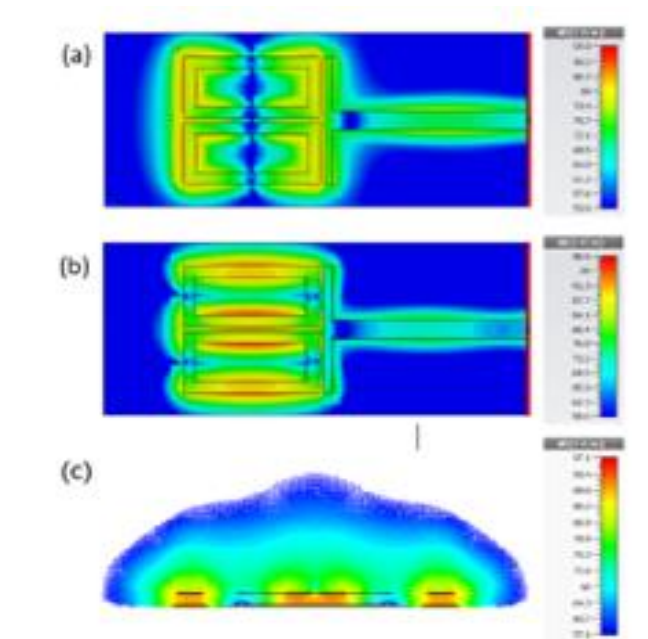
Οι Ivanov et al. [16] ανέπτυξαν ένα νέου αισθητήρα με συντονιστή (resonator) επιπέδου μικροκυμάτων. Η σύζευξη μεταξύ δύο συμμετρικών ορθογώνιων δακτυλίων τύπου μικροταινίας αξιοποιείται για να αυξηθεί η ευαισθησία της συχνότητας του συντονιστή στις διηλεκτρικές ιδιότητες διαφόρων εδωδιμων ελαίων. Εξετάστηκαν δύο είδη ελαιόλαδου και ένα είδος ηλιέλαιου, καθώς και το μείγμα τους σε συγκέντρωση 50%/50%. Σε αντίθεση με το σχεδιασμό συντονιστή μονού τετραγώνου, στον προτεινόμενο σχεδιασμό εισάγεται μια δεύτερη βύθιση συντονισμού ως παράμετρος σκέδασης S11 προκύπτει λόγω της διαμόρφωσης των συζευγμένων δακτυλίων. Ο δεύτερος συντονισμός χαρακτηρίζεται από υψηλότερο παράγοντα ποιότητας Q, και υψηλότερη μετατόπιση συχνότητας όταν η διηλεκτρική σταθερά του η υπό δοκιμή υλικού ποικίλλει, γεγονός που με τη σειρά του οδηγεί σε υψηλότερη ευαισθησία. Ταυτόχρονα, ο δεύτερος συντονισμός έχει υψηλότερη συγκέντρωση πεδίου στο κέντρο της αισθητηριακής περιοχής, η οποία επίσης αυξάνει την ευαισθησία του αισθητήρα. Ο αισθητήρας που προτείνεται στην παραπάνω εργασία δείχνει υψηλή ευαισθησία και παράγοντα Q, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για τον μικροκυματικό χαρακτηρισμό υγρών, όπως τα φυτικά έλαια που έχουν περιορισμένο εύρος τιμών διαπερατότητας. Στα σχήματα που ακολουθούν, περιγράφονται σχηματικά αφενός η δομή του υποστρώματος και η διάταξη του αισθητήρα (Σχήμα

22α) και αφετέρου η κατανομή του πεδίου για την πρώτη και τη δεύτερη συχνότητα συντονισμού (Σχήμα 22β), αντίστοιχα.

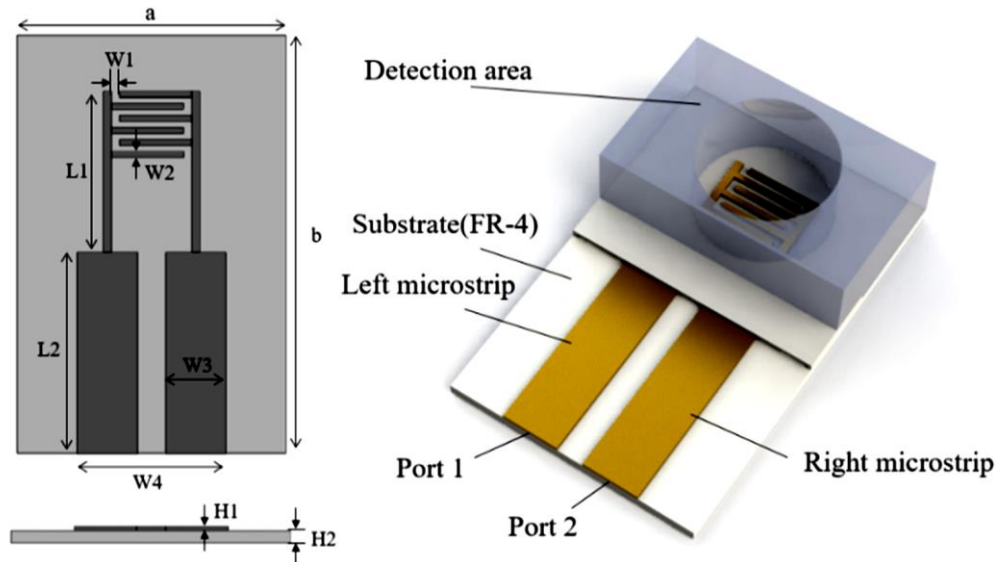


Σχήμα 22. (α) Διάγραμμα του ανώτερου στρώματος του προτεινόμενου αισθητήρα (όλες οι γεωμετρικές παράμετροι είναι σε mm). (β) Συντελεστής της προσομοιωμένης παραμέτρου σκέδασης  $|S_{11}|$  του αισθητήρα στον αέρα, που υποστηρίζεται από υπόστρωμα PLA (πολυλακτίδιο) (γκρίζα περιοχή) στο εύρος συχνοτήτων λειτουργίας του αισθητήρα [16]

Οι Liu et al. [14] κατασκεύασαν ένα πεπλεγμένο μικροηλεκτρόδιο και το ενσωμάτωσαν με ένα τρισδιάστατα εκτυπωμένο μικροπεριέκτη για την παραγωγή ενός μικροαισθητήρα που μπορεί να ανιχνεύσει αλλαγές στην ηλεκτρική διαπερατότητα του λαδιού. Όταν η περιεκτικότητα σε υγρασία στο λάδι αυξάνεται, αυτός ο αισθητήρας μπορεί να ανιχνεύσει την προκύπτουσα αλλαγή στην σύνθετη αντίσταση του λαδιού, η οποία σχετίζεται αντίστοιχα με τη ηλεκτρική διαπερατότητά του, και με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται ο βαθμός στο οποίο έχει παλαιώσει το λάδι. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο προτεινόμενος μικροαισθητήρας έχει τα πλεονεκτήματα του μικρού μεγέθους και της υψηλής ευαισθησίας, καλής ακρίβειας και δυνατότητας συνδυασμού με όργανα χειρός. [14]

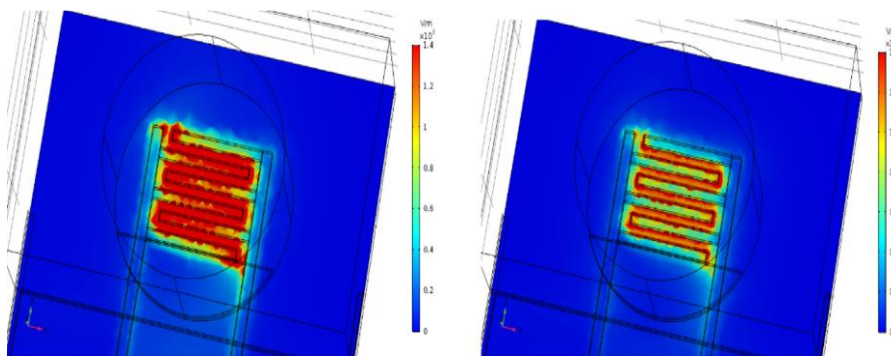


Σχήμα 23. Συνολική κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου για (α) τον πρώτο συντονισμό στα 4,958 GHz, (β) τον δεύτερο συντονισμό στα 5,652 GHz, (γ) εγκάρσια διατομή στη μέση των δακτυλιοειδών συντονιστών στα 5,652 GHz.[16].



Σχήμα 24. Δομές του πεπλεγμένου μικροηλεκτροδίου (αριστερά) και του μικροπεριέκτη (δεξιά) [14].

Η διαφοροποίηση στο πεδίο όταν ελέγχεται δείγμα λαδιού και δείγμα νερού φαίνεται στο Σχήμα 25. Η προτεινόμενη μέθοδος προτείνεται από τους ερευνητές να χρησιμοποιηθεί για τον γρήγορο, χαμηλού κόστους, επιτόπιο προσδιορισμό της γήρανσης του πετρελαίου. [14]

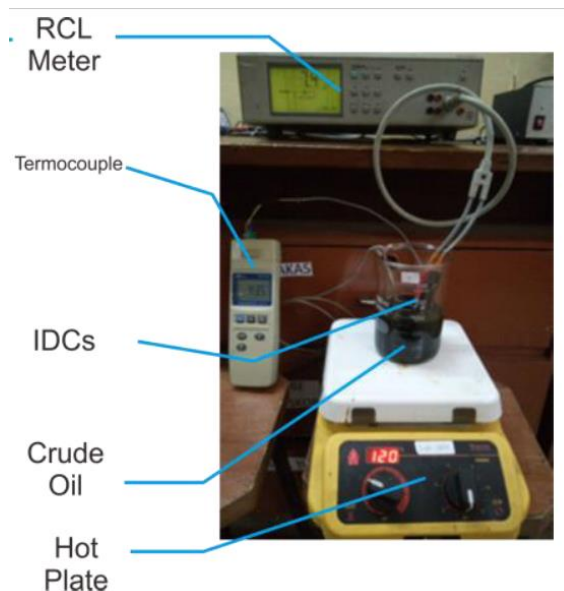


Σχήμα 25. Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου α) κατά τη μέτρηση λαδιού. (β) κατανομή δυναμικού κατά τη μέτρηση του νερού [14].

## 1.5 Επίδραση της θερμοκρασίας και αντιστάθμιση στους πεπλεγμένους αισθητήρες χωρητικότητας

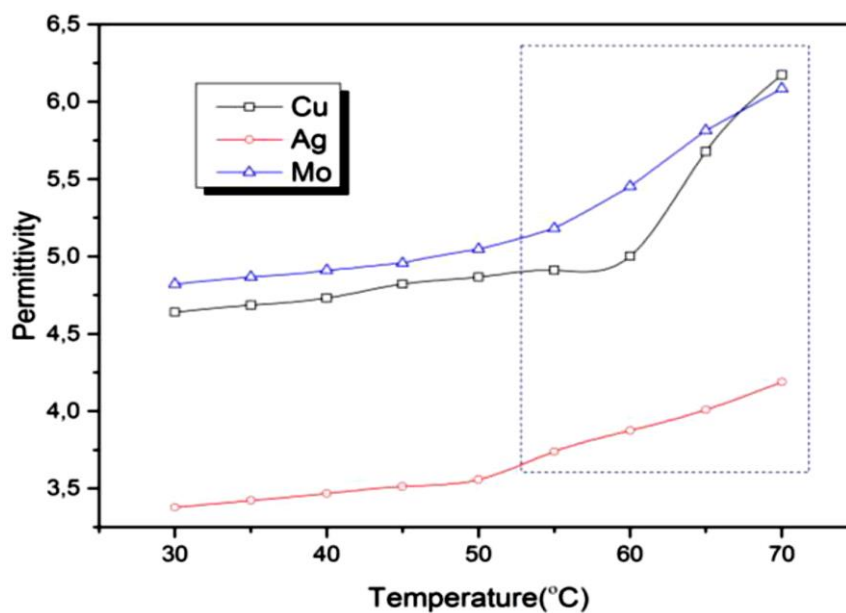
Οι αισθητήρες μέτρησης χωρητικότητας έχουν απλή αρχή λειτουργίας αλλά είναι αναγκαίο κατά το σχεδιασμό να λαμβάνονται υπόψη κάποιοι παράγοντες που μπορεί να προκαλούν αποκλίσεις από την κανονική τους λειτουργία ή αποκλίσεις στις μετρήσεις. Ο τρόπος της διάταξης των επάλληλων ηλεκτροδίων αλλά και των αποστάσεων μεταξύ τους θα πρέπει να βελτιστοποιεί την ευαισθησία του πυκνωτή ενώ παράλληλα η μέτρηση δεν θα πρέπει να εξαρτάται από μικρές αλλαγές στις διαστάσεις ή την θέση του μετρούμενου υλικού, πράγμα που όμως είναι συχνό π.χ. σε μία γραμμή παραγωγής. Κάποιοι παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η υγρασία του αέρα και η επίδραση μεταλλικών αντικειμένων που πιθανώς να βρίσκονται κοντά στον αισθητήρα κανονικά δεν θα πρέπει να επιδρούν στην απόδοσή του ή τουλάχιστον η επίδρασή τους να αντισταθμίζεται [21].

Είναι όμως γνωστό ότι η θερμοκρασία ενός διηλεκτρικού μέσου επιδρά στην τιμή της ηλεκτρικής διαπερατότητάς του και κατ' επέκταση στη μετρούμενη χωρητικότητα ενός αισθητήρα χωρητικότητας. Οι Rahmanina et al. [34] μελέτησαν με μη αυτόματο τρόπο την επίδραση της θερμοκρασίας του μετρούμενου υγρού με σειρά πειραμάτων, χρησιμοποιώντας ένα πεπλεγμένο αισθητήρα χωρητικότητας (IDC) που κατασκεύασαν με αριθμό  $N=40$  επάλληλων ηλεκτροδίων. Χρησιμοποίησαν ως διηλεκτρικό μέσο το αργό πετρέλαιο, που περιέχει και τα βαριά του κλάσματα, (ανάμεσα στα οποία και ορυκτέλαια), και έκαναν τα πειράματα με τη διάταξη του Σχήματος 26, όπου το πετρέλαιο μέσα στο δοχείο, θερμαινόταν με μια θερμαντική πλάκα και μετρούνταν ταυτόχρονα η θερμοκρασία με ένα θερμοζεύγος καθώς και οι μεταβολές της χωρητικότητας του πυκνωτή. Συγκεκριμένα η μέτρηση περιλαμβάνει τις αλλαγές στην χωρητικότητα και επομένως στη διαπερατότητα του αργού πετρελαίου που προκαλούνται από τις αλλαγές θερμοκρασίας. Ελέγχεται η γραμμικότητα, η επαναληψιμότητα και η υστέρηση και λαμβάνονται γραφήματα των μεταβολών.



Σχήμα 26. Διάταξη μέτρησης μεταβολών της διαπερατότητας του αργού πετρελαίου με πεπλεγμένο αισθητήρα χωρητικότητας (IDC) και ταυτόχρονη μέτρηση της μεταβολής της θερμοκρασίας μέσα στο δοχείο του δείγματος πετρελαίου.

Η γραμμικότητα των αποκρίσεων του IDC ελέγχεται μετρώντας την αυξανόμενη θερμοκρασία στη θερμαντική πλάκα. Το εύρος θερμοκρασίας για τη δοκιμή γραμμικότητας ήταν 30 – 70 °C με βαθμιαία αύξηση κατά 5 °C. Το θερμοζεύγος τύπου K χρησιμοποιείται ως βαθμονομητής με εύρος μέτρησης 400 °C. Τα δεδομένα που λαμβάνονται από τον αισθητήρα IDC είναι δεδομένα χωρητικότητας που καταμετρώνται με χρήση μετρητή RCL, και τελικά υπολογίζεται η τιμή διαπερατότητας του αργού πετρελαίου [34]. Η επαναληψιμότητα των αποκρίσεων του IDC δοκιμάστηκε επαναλαμβάνοντας τη μέτρηση της επίδρασης της θερμοκρασίας κατά τρεις φορές. Το εύρος μέτρησης για τις δοκιμές επαναληψιμότητας ήταν σε θερμοκρασίες 30 – 55 °C. Τέλος ο έλεγχος υστέρησης στις αποκρίσεις των IDC πραγματοποιείται με τη μέτρηση των αλλαγών στη διηλεκτρική σταθερά κατά τη διάρκεια διαδοχικής θέρμανσης και ψύξης. Η δοκιμή υστέρησης είναι αναγκαία για να προσδιοριστεί η ακρίβεια των IDC όταν η θερμοκρασία αυξάνεται και μειώνεται σχετικά γρήγορα. Το εύρος μέτρησης θερμοκρασίας για τη δοκιμή υστέρησης από 30 – 55 °C. Η χωρητικότητα του αργού πετρελαίου μετρήθηκε κατά σε συχνότητα 1 kHz με το PM 6303A RCL Το Σχήμα 27 δίνει σε γράφημα τα αποτελέσματα από τις δοκιμές ελέγχου της γραμμικότητας της μέτρησης διαπερατότητας σε σχέση με τη θερμοκρασία, για τα τρία διαφορετικά μέταλλα (χαλκός, άργυρος, μολυβδένιο) που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των ηλεκτροδίων των πανομοιότυπων κατά τα άλλα αισθητήρων. Προέκυψε ότι και για τα τρία μέταλλα, η απόκριση αλλάζει κλίση σε ορισμένη θερμοκρασία, ενώ όταν τα ηλεκτρόδια είναι από άργυρο, λαμβάνονται γενικά μικρότερες τιμές.

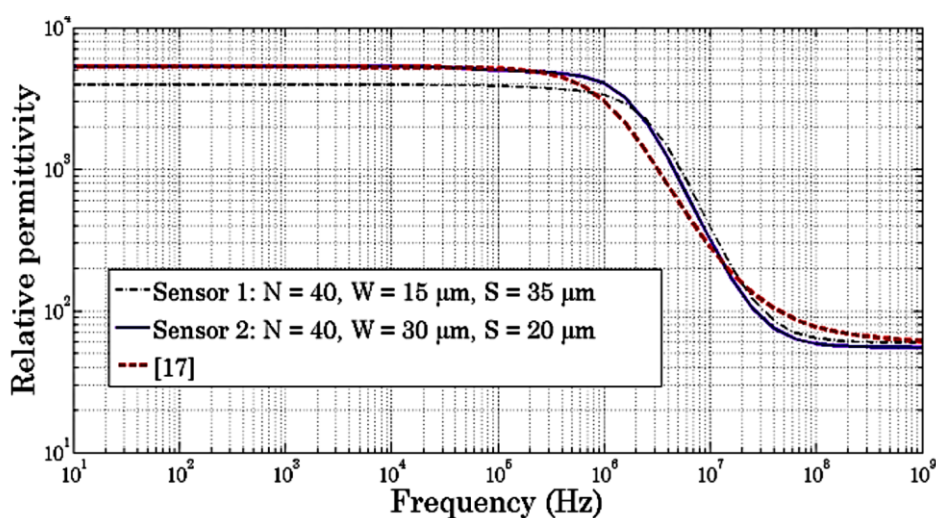


Σχήμα 27. Αποτελέσματα από τις δοκιμές ελέγχου της γραμμικότητας της μέτρησης διαπερατότητας σε σχέση με τη θερμοκρασία, για τα μέταλλα χαλκός, άργυρος, μολυβδένιο, που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των ηλεκτροδίων των πεπλεγμένων αισθητήρων.

Από την έρευνα αυτή, παρόλο που οι ερευνητές δεν συνέδεσαν αυτόματα τις μετρήσεις θερμοκρασίας με τις μετρήσεις της διαπερατότητας (αρχικά χωρητικότητας) ώστε να αντισταθμίζονται σε πραγματικό χρόνο φαίνεται σαφώς η ανάγκη να γίνεται συνεχώς αντιστάθμιση της θερμοκρασίας όταν λειτουργεί ένας τέτοιος αισθητήρας, ώστε να είναι αξιόπιστες οι μετρήσεις των μεταβολών της διαπερατότητας. Επομένως είναι απαραίτητο ένας αισθητήρας να περιλαμβάνει και ταυτόχρονη μέτρηση θερμοκρασίας και μέσω της διεπαφής και του κατάλληλου λογισμικού, να διορθώνονται και να κανονικοποιούνται οι τελικές μετρήσεις, ως προς τη θερμοκρασία.

## 1.6 Επίδραση της συχνότητας ταλαντωτή στους πεπλεγμένους αισθητήρες χωρητικότητας

Οι Ngo et al., [35] στη μελέτη τους παρουσιάζουν ένα φυσικό μοντέλο πεπλεγμένων αισθητήρων που λειτουργεί στην περιοχή συχνοτήτων 10 Hz-1 GHz. Επιπλέον προτείνουν και μια θεωρητική προσέγγιση για τη βελτιστοποίηση της χρήσης του αισθητήρα. Τα αποτελέσματα της αναλυτικής και αριθμητικής προσομοίωσης επιδεικνύουν το πλεονέκτημα της βελτιστοποίησης για επέκταση της χρησιμοποιήσιμης συχνότητας του αισθητήρα. Από την ανάλυση του μοντέλου ισοδύναμου κυκλώματος συμπεραίνουν ότι η χωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας εξαρτάται από το διηλεκτρικό μέσο αλλά και τη γεωμετρία της κατασκευής του αισθητήρα, γι' αυτό και προχώρησαν στη βελτιστοποίηση του αισθητήρα. Στο Σχήμα 28, φαίνεται η μεταβολή της σχετική διαπερατότητας ως συνάρτηση της συχνότητας για επίπεδους πεπλεγμένους αισθητήρες χωρητικότητας με διαφορετικά χαρακτηριστικά κατασκευής.

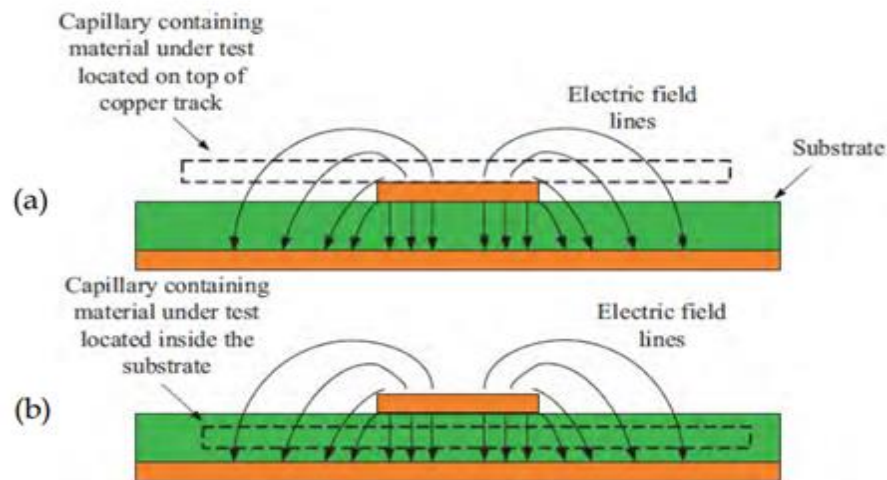


Σχήμα 28. Σχετική διαπερατότητα ως συνάρτηση της συχνότητας για διάφορους επίπεδους πεπλεγμένους αισθητήρες χωρητικότητας

## 1.7 Βέλτιστη θέση τοποθέτησης δείγματος στους επίπεδους αισθητήρες

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας για τη λειτουργία και τις μετρητικές επιδόσεις του αισθητήρα είναι η πιθανή θέση τοποθέτησης του υλικού που εξετάζεται. Συνήθως, οι ιδιότητες των υλικών μπορούν να χαρακτηριστούν χρησιμοποιώντας τους επίπεδους αισθητήρες συντονισμού στους επιλεγμένους τρόπους λειτουργίας για τους οποίους σχεδιάστηκαν. Φυσικά ο καθένας από τους αισθητήρες μέτρησης ηλεκτρικής διαπερατότητας έχει σχεδιαστεί για να εξασφαλίζει τις καλύτερες συνθήκες διέγερσης για αξιωματικά συμμετρικό πεδίο, είτε στην Εγκάρσια Ηλεκτρική (TE) είτε στην Εγκάρσια Μαγνητικές (TM) λειτουργία [20]. Οι απόλυτες τιμές του μέγιστου πεδίου εμφανίζονται στο βασικό τρόπο λειτουργίας (στην πρώτη συχνότητα συντονισμού) σε σύγκριση με τους άλλους τρόπους λειτουργίας. Η απόκριση του αισθητήρα εξαρτάται πλήρως από την αλληλεπίδραση του φορτωμένου MUT και της κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου. Τα εξεταζόμενα υλικά μπορούν να

τοποθετούνται είτε πάνω από τη χάλκινη τροχιά είτε μέσα στο υπόστρωμα, ανάλογα με το σχεδιασμό του αισθητήρα. Ισχύει όμως πάντοτε ότι η ευαισθησία και η ακρίβεια της μέτρησης εξαρτάται από την έκταση της διείσδυσης πεδίου μέσα στο υπό δοκιμή υλικό, οπότε το MUT θα πρέπει να βρίσκεται εκεί όπου εμφανίζεται το μέγιστο ηλεκτρικό πεδίο (E-πεδίο). Το Σχήμα 29 δείχνει τις δύο πιθανές θέσεις του MUT για μέτρηση ενός υγρού υλικού. Στις επίπεδες διατάξεις το ηλεκτρικό πεδίο θα μπορούσε να συγκεντρωθεί περισσότερο στην κορυφή ή μέσα στο υπόστρωμα [25]. Για το λόγο αυτό, είναι προφανές ότι η υψηλότερη ευαισθησία της μέτρησης των μικρών μεταβολών διαπερατότητας θα επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση του υπό δοκιμή υλικού στο μέγιστο ηλεκτρικό πεδίο (πάνω στο χάλκινο μέρος ή μέσα στο υπόστρωμα).



Σχήμα 29. Η πιθανή θέση του MUT: (α) Πάνω από τα χάλκινα ηλεκτρόδια: (β) Μέσα στο υπόστρωμα [25].

## Επίλογος – Σκοπός της εργασίας

Σε αυτήν την εργασία θα αναπτυχθεί ένα σύστημα μέτρησης ποιότητας λιπαντικών ελαίων μηχανής μέσω της μέτρησης της μιγαδικής διαπερατότητας τους με την χρήση χωρητικού αισθητηρίου. Ο σκοπός της εργασίας αυτής είναι να αναδείξει την μέθοδο αυτή, ώστε να γίνεται εύκολη και πιο συστηματοποιημένη η παρακολούθηση της ποιότητας ενός λιπαντικού μίας μηχανής. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την σωστή συντήρηση της μηχανής καθώς και την εξοικονόμηση λαδιού, αφού η αλλαγή του λιπαντικού στην μηχανή θα γίνεται τον κατάλληλο χρόνο, σύμφωνα με την χρήση της μηχανής και όχι υποκειμενικά ή εμπειρικά από τον χρήστη.

## **Κεφάλαιο 2ο: Εφαρμογές αισθητήρων χωρητικότητας στην παρακολούθηση της ποιότητας ελαίων και λιπαντικών**

### **2.1 Εισαγωγή**

Τα λιπαντικά των κινητήρων πρέπει να εκτελούν πολλές λειτουργίες όπως μείωση τριβής, προστασία από οξειδωτική φθορά, διαχείριση θερμότητας, αντιδιαβρωτική προστασία, σφραγιστική ικανότητα, καθαριστική λειτουργία, αντιαφριστικές ιδιότητες κ.λπ. Για το λόγο αυτό η παρακολούθηση της κατάστασης του λαδιού του κινητήρα έχει αυξανόμενο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. [7].

Τα μηχανέλαια, όπως το λάδι κινητήρων, είναι ένα σημαντικό στοιχείο προστασίας στους κινητήρες εσωτερικής καύσης αλλά και τους κινητήρες τουρμπίνας, και κατά συνέπεια εκτίθεται σε διάφορες καταπονήσεις, όπως ισχυρή θέρμανση, τριβές, ανάμιξη με υγρασία και αέρα, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα. Όταν το λάδι του κινητήρα υφίσταται αυτές τις επιδράσεις, συμβαίνουν φυσικοχημικές διεργασίες που το υποβαθμίζουν, επειδή τα αρχικά συστατικά του μετατρέπονται σε προϊόντα οξείδωσης ή υδρόλυσης.

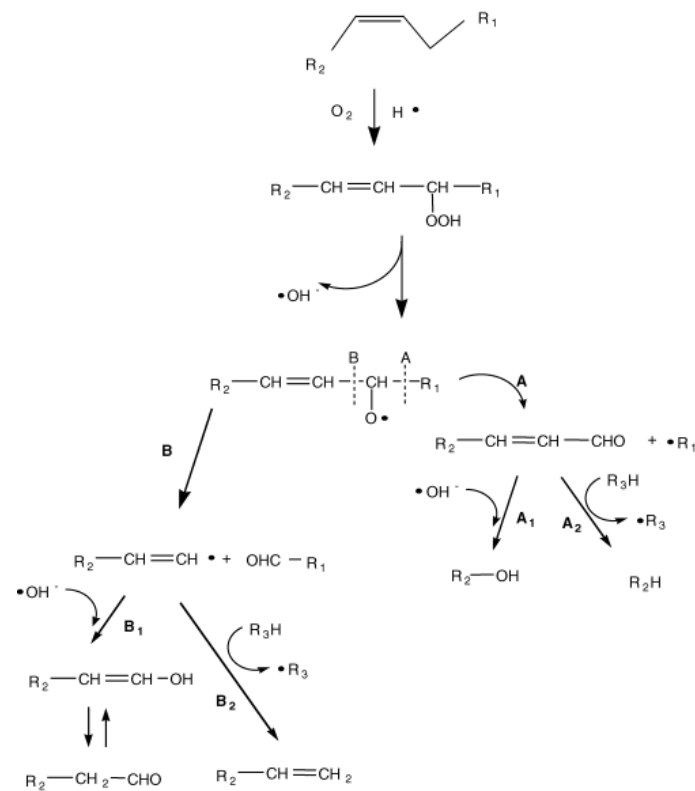
### **2.2 Εδώδιμα έλαια, σύσταση και διαδικασίες αποσύνθεσής τους**

Τα εδώδιμα έλαια είναι συνήθως φυτικά έλαια και περιέχουν ομάδα οργανικών ενώσεων, οι οποίες παράγονται από την αντίδραση ενός οξέος με την αλκοόλη [5]. Τα λίπη και τα έλαια προέρχεται από την εστεροποίηση της γλυκερίνης και των λιπαρών οξέων. Τα φυτικά έλαια περιέχουν φυσικά μόρια εστέρων με τριγλυκερίδια στη σύστασή τους, όπου τα τριγλυκερίδια προέρχονται από τη χημική σύνδεση τριών λιπαρών οξέων σε ένα μόριο γλυκερίνης. Αυτά τα λάδια έχουν εξαιρετική αντοχή στη φωτιά (δεν είναι πολύ εύφλεκτα) και είναι αυξημένης βιοδιασπασιμότητας [5].

Κατά τη χρήση ή την παλαίωση του εδώδιμου λαδιού μια σειρά από φυσικές και χημικές αλλαγές συμβαίνουν. Για παράδειγμα στα τηγανέλαια σε υψηλές θερμοκρασίες, συμβαίνουν πολυμερισμός, οξείδωση και υδρόλυση [18]. Ακόμη και με την απλή παραμονή του λαδιού σε χώρο με υγρασία, φως, αέρα, θερμοκρασία, παρουσία μετάλλων, κλπ., συμβαίνουν διαδικασίες αυτοοξείδωσης αρκετών από τα συστατικά του, ιδιαίτερα αν το έλαιο δεν έχει επαρκή περιεκτικότητα σε αντιοξειδωτικές ενώσεις (καροτενοειδή, τοκοφερόλες, φωσφολιπίδια, κλπ). Γενικά κατά την οξείδωση των φυτικών ελαίων σχηματίζονται μεταξύ άλλων υδροϋπεροξειδία, ελεύθερες οργανικές ρίζες, και αυτό προκαλεί αύξηση στον λεγόμενο «αριθμό υπεροξειδίου» του ελαίου, ο οποίος κατά μια έννοια εκφράζει την απουσία και επίδραση του οξυγόνου μέσα στο λάδι. Παράλληλα μεταβάλλεται και η οξύτητα του ελαίου λόγω διάσπασης οργανικών καρβοξυλικών οξέων και υδρόλυσης εστέρων και τριγλυκεριδίων [32]. Στο Σχήμα 30 περιγράφονται σχηματικά οι σημαντικότεροι μηχανισμοί χημικής υποβάθμισης των ελαίων.

Κατά τη διαδικασία του τηγανίσματος γίνεται σταδιακή υποβάθμιση της ποιότητας του λαδιού, επειδή όπως διαπιστώθηκε αυξάνουν τα πολικά συστατικά και η οξύτητα, και το χρώμα αλλάζει σημαντικά. Με την παράταση του χρόνου τηγανίσματος, η περιεκτικότητα σε πολυμερή μέσα στο τηγανέλαιο αυξάνεται, η περιεκτικότητα σε ακόρεστα λιπαρά οξέα μειώνεται, η τιμή του ιωδίου και η τιμή σαπωνοποίησης μειώνεται και η τιμή του οξέος και η τιμή του υπεροξειδίου αυξάνονται. Κατά τη δοκιμή της ποιότητας του τηγανελαίου, η μέτρηση των συνολικών πολικών υλικών (TPM),

συνήθως θεωρείται καλή ένδειξη ποιότητας, καθώς περιλαμβάνει κρίσιμες πληροφορίες για το σύνολο της χημικής αποικοδόμησης που συμβαίνει στο λάδι.

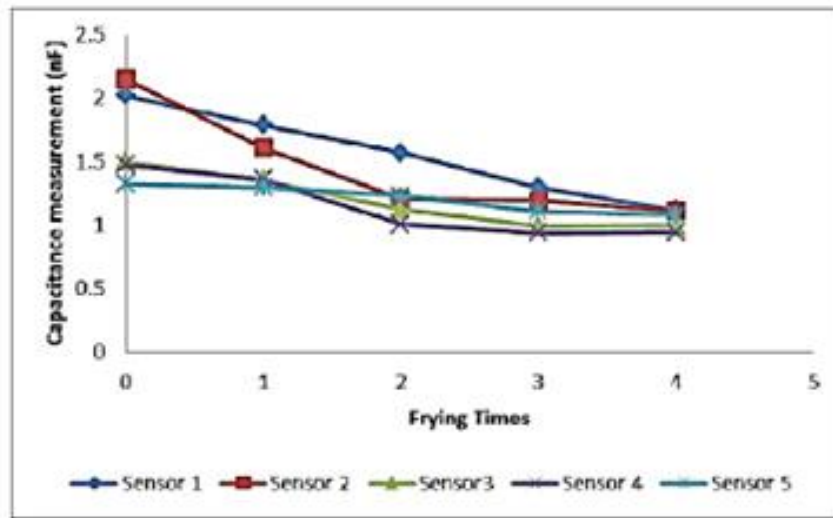


Σχήμα 30. Γενικός μηχανισμός που περιγράφει τις αντιδράσεις οξείδωσης, διάσπασης και υδρόλυσης των φυτικών ελαίων με σχηματισμό υδροϋπεροξειδίων, αλδευδών, ελεύθερων ριζών κλπ. [32]

Το υπερβολικά χρησιμοποιημένο βρώσιμο λάδι μπορεί να περιέχει χημικές ουσίες που είναι επιβλαβείς για την υγεία [9]. Ακατάλληλα αποθηκευμένο χρησιμοποιημένο μαγειρικό λάδι μπορεί να επιτρέψει στα βακτήρια να τραφούν με τα υπολείμματα του τροφίμου που τηγανίστηκε, και να προκαλέσουν δυνητικά κάποιας μορφής έντονη τροφική δηλητηρίαση. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ τροφίμων και λαδιού τηγανίσματος είναι μια σημαντική πτυχή που πρέπει να διερευνηθεί ως προς την κατανόηση των αλλοιώσεων στα τηγανέλαια. Έχει αναφερθεί ότι περισσότερο από το 90% των λιπιδίων στα τηγανητά τρόφιμα προέρχεται από το τηγανέλαιο ενώ περισσότερο από το 85% των λιπιδίων μέσα στα προτηγανισμένα τρόφιμα απελευθερώνονται στο μαγειρικό λάδι κατά το τηγάνισμα. Η φυσική κατάσταση και η υπέρχρησή του μαγειρικού λαδιού μπορούν να επηρεάσουν τη γεύση, την υφή και το χρώμα του φαγητού. Αφού το μαγειρικό λάδι λειτουργεί ως μέσο μεταφοράς θερμότητας, αλλάζοντας η ποιότητα του προκύπτουν αλλαγές και στη γεύση του φαγητού. Τελικά, χρησιμοποιώντας μαγειρικό λάδι συνεχώς ή επανειλημμένα χωρίς παρακολούθηση και έλεγχο της ποιότητάς του, μπορεί να επηρεαστεί η ανθρώπινη υγεία. Επομένως είναι επιτακτική ανάγκη η ανάπτυξη διατάξεων αισθητήρων με μικρό κόστος κατασκευής και λειτουργίας προκειμένου να ενσωματώνονται στις τηγανιέρες και φριτέζες και να παρακολουθούν διαρκώς την κατάσταση οξείδωσής του.

Για να γίνει αντιληπτή η επίδραση των πολλαπλών τηγανισμάτων στην ποιότητα ενός ελαιολάδου, οι Idrow et al. [9] παραθέτουν ένα διάγραμμα μεταβολής της χωρητικότητας που

μετρήθηκε από πέντε πεπλεγμένους αισθητήρες που κατασκεύασαν με μικρές διαφορές τον καθένα. Το διάγραμμα αυτό δίνεται στο Σχήμα 31



Σχήμα 31. Μετρήσεις χωρητικότητας σε συχνότητα 1 KHz, μετά από επαναλαμβανόμενα τηγανίσματα ελαιολάδου, χρησιμοποιώντας πέντε παραπλήσιους ως προς την κατασκευή πεπλεγμένους αισθητήρες [9].

### 2.3 Ορυκτέλαια και λιπαντικά, σύσταση και διαδικασίες αποικοδόμησης

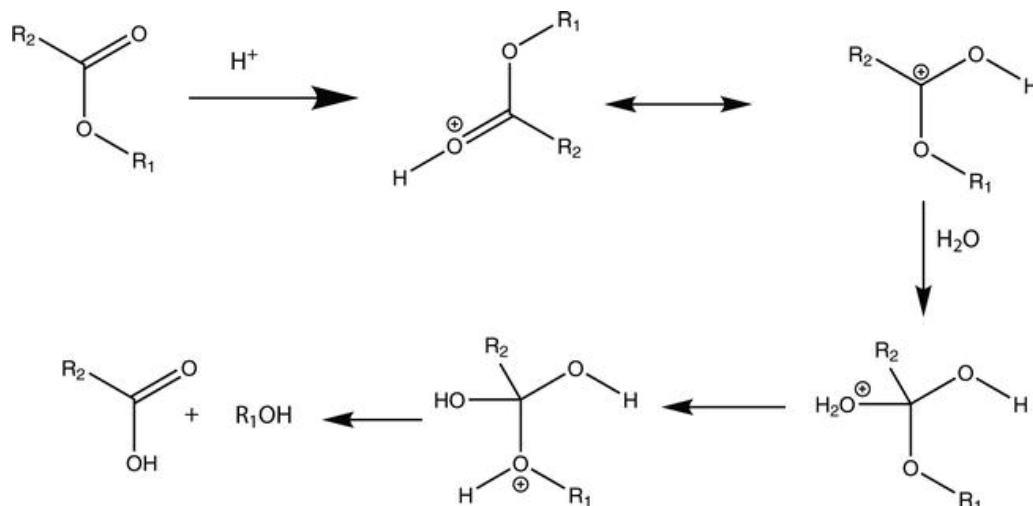
Τα ορυκτέλαια χρησιμοποιούνται συνήθως λιπαντικά σε κινητήρες εσωτερικής καύσης αλλά και άλλων τύπων, σε μηχανές για περιορισμό τριβών, αλλά και ως μονωτικά υγρά στους μετασχηματιστές. Λαμβάνονται με την κλασματική απόσταξη του αργού πετρελαίου ακολουθούμενη από επεξεργασία με θεικό οξύ, σε κάποιο από τα βαρύτερα κλάσματά του. Το συνηθισμένο ορυκτέλαιο είναι ένα μείγμα ναφθενικών, αρωματικών και παραφινικών υδρογονανθράκων. Το τελικό προϊόν που αποτελεί το λάδι κινητήρα (μηχανέλαιο) αποτελείται κυρίως από δύο είδη ουσιών, τα οποία είναι το βασικό ορυκτέλαιο (με τα παραπάνω συστατικά) και τα χημικά πρόσθετα. Τα κύρια πρόσθετα είναι απορρυπαντικά, βελτιωτικά του δείκτη ιξώδους, τροποποιητές τριβής και φθοράς, πρόσθετα βελτίωσης ροής σε χαμηλές θερμοκρασίες, αντιοξειδωτικά, αναστολείς διάβρωσης και σκουριάς, και αντιαφριστικοί παράγοντες [7,33].

Οι ιδιότητες του κοινού ορυκτελαίου εξαρτώνται από τη χημική του σύνθεση. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του ορυκτελαίου είναι οι πολύ καλές διηλεκτρικές ιδιότητές του και η ανθεκτικότητα στην τριβή σε μεγάλες θερμοκρασίες, αλλά στα μειονεκτήματά του συγκαταλέγονται η ευφλεκτότητά του και ο κίνδυνος μόλυνσης του περιβάλλοντος, όταν η μηχανή χρησιμοποιεί «καμένα» λάδια ή όταν απορρίπτονται πρόχειρα ως απόβλητα, χωρίς να ανακυκλώνονται πλήρως [5].

Κατά τη μακροχρόνια χρήση του το ορυκτέλαιο υπόκειται κυρίως στο φαινόμενο της οξειδωσης, που επιτείνεται στις αυξημένες θερμοκρασίες και παρουσία οξυγόνου και νερού. Με βάση το γεγονός ότι τα ορυκτέλαια πετρελαϊκής προέλευσης περιέχουν κυρίως υδρογονάνθρακες (ευθύγραμμους, κυκλικούς και αρωματικούς) κατά την οξειδωσή τους παράγονται κυρίως μίγματα από κετόνες και οργανικά οξέα.

Τα κύρια συστατικά των λαδιών μηχανής, που είναι φυσικής προέλευσης ορυκτέλαια, βασίζονται στο πετρέλαιο αλλά για τις σύγχρονες απαιτήσεις των κινητήρων εσωτερικής καύσης και ιδιαίτερα για τους κινητήρες τουρμπίνας έχουν αναπτυχθεί και συνθετικά λάδια μηχανής, που βασίζονται σε εστέρες (προϊόντα αντίδρασης πολυαλκοολών και καρβοξυλικών εστέρων). Επιπλέον των κύριων συστατικών, στα ορυκτέλαια για μηχανές προστίθενται και διάφορα πρόσθετα. Και στην περίπτωση των συνθετικών λαδιών μηχανής που διατίθενται στο εμπόριο, αυτά περιλαμβάνουν και ποσότητες από διάφορα πρόσθετα, όπως αντιοξειδωτικά, μια αρωματική αμίνη, ένα πρόσθετο αντιδιαβρωτικό, συνήθως έναν φωσφορικό εστέρα, πιθανώς ένα αντιαφριστικό πρόσθετο και τέλος έναν τροποποιητή του ιξώδους και της ρευστότητας του μηχανέλαιου.

Διαδικασίες αποικοδόμησης και αποσύνθεσης υφίστανται και τα κύρια και τα πρόσθετα συστατικά. Στο Σχήμα 32 περιγράφονται ορισμένες από τις συνήθεις χημικές αντιδράσεις αποικοδόμησης που συμβαίνουν κατά την φθορά των λαδιών μηχανής[33].



Σχήμα 32. Γενικός μηχανισμός που περιγράφει τις αντιδράσεις οξείδωσης, διάσπασης και υδρόλυσης των ορυκτών ελαίων με σχηματισμό υδροϋπεροξειδίων, αλδεϋδών, ελεύθερων ριζών κλπ. [33]

Εκτός των παραπάνω μηχανισμών οξείδωσης, όταν το λάδι μηχανής μολύνεται με βρωμιά και σωματίδια μετάλλων, μπορεί να γίνει πολύ παχύρρευστο ή λεπτόρρευστο και να χάσει τις προστατευτικές του ιδιότητες. Αυτό οδηγεί σε ανεπιθύμητη αύξηση των τριβών, και προκειμένου να αποφευχθεί η βλάβη του κινητήρα, το λάδι πρέπει να αντικατασταθεί πριν χάσει ολοσχερώς τις προστατευτικές λιπαντικές του ιδιότητες, με συνέπειες πολύ επιβλαβείς για τον κινητήρα που ταυτόχρονα επιδεινώνουν την απόδοση του οχήματος. Ταυτόχρονα, η αλλαγή του λιπαντικού πολύ νωρίς, συνεπάγεται αναποτελεσματική του χρήση, σπατάλη των ήδη περιορισμένων πόρων λειτουργίας ενός κινητήρα, αλλά και επίσης ανεπιθύμητες επιπτώσεις στο περιβάλλον. Επομένως και για περιβαλλοντικούς αλλά και για οικονομικούς λόγους είναι πάντα χρήσιμο να γνωρίζουμε διαρκώς την ποιότητα του λαδιού που χρησιμοποιείται.

Έχει παρατηρηθεί ότι οι μεν κετόνες επιδρούν περισσότερο στο πραγματικό μέρος της ηλεκτρικής διαπερατότητας ενώ τα οργανικά οξέα επιδρούν περισσότερο στο φανταστικό της μέρος. Προκειμένου να μπορούν να μετρηθούν και να διακριθούν αυτές οι δύο πηγές μεταβολών, σχεδιάστηκαν μια σειρά από εναλλακτικούς «πεπλεγμένους» διηλεκτρομετρικούς αισθητήρες, όπως περιγράφεται από τον Risos [8].

## 2.4 Επίλογος. Αναγκαιότητα και οφέλη από τη χρήση αισθητήρων ελέγχου ποιότητας ελαίων

Οι τεχνικές παρακολούθησης ποιότητας λαδιού σε πραγματικό χρόνο βοηθούν στην εξοικονόμηση πόρων σε πολλούς κλάδους της βιομηχανίας, με την ελαχιστοποίηση του χρόνου διακοπής λειτουργίας λόγω βλαβών στις μηχανές από φθαρμένα μηχανέλαια και με την μείωση του κόστους συντήρησης των μηχανών. Η μέτρηση του  $\alpha$  (σύνθετη διαπερατότητα) του λιπαντικού είναι ένας αποτελεσματικός δείκτης της διαδικασίας αποικοδόμησης του λαδιού και μπορεί να είναι χρήσιμος στον προγραμματισμό της συντήρησης και στην επιλογή του πιο κατάλληλου και ανθεκτικότερου λιπαντικού για σωστό προγραμματισμό της πλήρους αντικατάστασής του. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται εκτεταμένα ηλεκτρικοί αισθητήρες, που μπορούν να λειτουργούν και σε έντονες συνθήκες θερμοκρασίας, οξύτητας και πίεσης [2].

Μια άλλη χρησιμότητα των αισθητήρων αυτών δείχθηκε με τη μελέτη των Sucipto et al., [15]. Οι ερευνητές είχαν ως στόχο να διαφοροποιήσουν το λαρδί από το στέαρ (ζωικό λίπος) και το φοινικέλαιο με βάση τις ηλεκτρικές του ιδιότητες, δηλαδή την αγωγιμότητα, την αντίσταση και την χωρητικότητα. Αυτές οι ιδιότητες μετρήθηκαν σε φασματικές συχνότητες από 4,20 έως 5,00 MHz σε θερμοκρασία δωματίου (26-27 °C). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το λαρδί και το λίπος μπορούν να διαφοροποιηθούν χρησιμοποιώντας ηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών. Επομένως είναι δυνατή η χρήση τέτοιων αισθητήρων όχι μόνο για σκοπούς ελέγχου ποιότητας και φθοράς ελαίων αλλά και ελέγχου αυθεντικότητας και νοθείας εμπορικών προϊόντων. Στην έρευνα αυτή εξάλλου, τονίζονται και τα πιθανά προβλήματα για τέτοιους ελέγχους, λόγω της μεγαλύτερης πολυπλοκότητας των υποστρωμάτων (λίπη, έλαια, εδώδιμα και μη, μίγματά τους αλλά και άλλα τρόφιμα με βάση αυτά τα υλικά). Στο πλαίσιο αυτό απαιτείται η γνώση των φυσικών τιμών στις διηλεκτρικές ιδιότητες πολλών ειδών τροφίμων για την κατανόηση της συμπεριφοράς του υλικού όταν τοποθετείται στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, σε ορισμένες επιθυμητές συχνότητες και θερμοκρασίες. Οι διηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού επηρεάζονται από τη συχνότητα, τη θερμοκρασία, την περιεκτικότητα σε νερό, την πυκνότητα, τη σύνθεση και τη δομή του υλικού.

Στην εργασία τους οι Ulrych et al., [5] ασχολήθηκαν με την ανάλυση και σύγκριση των τις ειδικές διηλεκτρικές ιδιότητες και τη χημική δομή του ηλιέλαιου, του κραμβέλαιου και ενός ορυκτέλαιου που συνήθως χρησιμοποιείται σε μετασχηματιστές. Τα ηλιέλαια και κραμβέλαια είναι φυσικός εστέρας μόρια με τριγλυκεριδική δομή και έχουν πολύ καλή αντοχή στη φωτιά (όχι πολύ εύφλεκτα) και βιοδιασπασιμότητα. Το κοινό ορυκτέλαιο παράγεται από μείγμα υδρογονανθράκων από αργό πετρέλαιο και ανήκει στην ομάδα των ναφθενικών ελαίων που αποτελείται κυρίως από κυκλοαλκάνια και είναι σχετικά εύφλεκτο και επικίνδυνο για το περιβάλλον. Η μέτρηση γίνεται με τη μέθοδο της διηλεκτρικής φασματοσκοπίας και υπολογίζονται το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της σύνθετης διαπερατότητας των μετρούμενων ελαίων. Τα δείγματα εξετάστηκαν σε εύρος συχνοτήτων από 50 mHz έως 100 kHz και σε εύρος θερμοκρασίας από -50°C έως +90 °C. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι μετρημένες διηλεκτρικές ιδιότητες των εξετασθέντων φυτικών ελαίων είναι πολύ παρόμοιες μεταξύ τους στο εύρος συχνοτήτων που δοκιμάστηκαν, αλλά διαφέρει πολύ από τις αντίστοιχες ιδιότητες των ορυκτέλαιων. Το κοινό ορυκτέλαιο είχε αυτές τις ιδιότητες πολύ μικρότερες και καλύτερες από το ηλιέλαιο και το κραμβέλαιο. Με βάση αυτές τις παρατηρήσεις, οι ερευνητές πρότειναν ότι προσαρμοσμένα μείγματα φυτικών και ορυκτών ελαίων με κατάλληλους αναστολείς μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως εναλλακτικό υγρό μόνωσης σε μετασχηματιστές αντί για ορυκτέλαια.

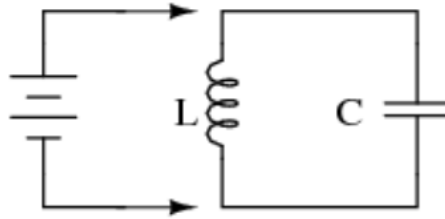
Τέλος, οι Tiwari et al. [28] προτείνουν ένα νέο σχεδιασμό ενός επίπεδου ανιχνευτή μικροκυμάτων (CSRR) με βελτιωμένη ευαισθησία για την ανίχνευση νοθείας υγρών, όπως εδωδιμων ελαίων. Σε σύγκριση με τους συμβατικούς επίπεδους αισθητήρες συντονισμού, η προτεινόμενη δομή

μιας θύρας είναι αρκετά πλεονεκτική για την ανίχνευση επιμόλυνσης ή ακόμη και νοθείας σε βρώσιμα υγρά, καθώς μπορεί να βυθιστεί απευθείας μέσα στο υγρό δείγμα. Η διευρυμένη γραμμή μικρολωρίδας (microstrip) του προτεινόμενου αισθητήρα διευκολύνει τη χάραξη δύο CSRR στην επάνω πλευρά στα μέγιστα του ηλεκτρικού πεδίου με αποτέλεσμα τον συμπαγή σχεδιασμό με βελτιωμένη ευαισθησία. Οι παράμετροι του ανιχνευτή βελτιστοποιούνται χρησιμοποιώντας το CST-MWS και το πρωτότυπο του διαθέτει την ικανότητα να διακρίνει εύκολα δύο υλικά με κοντινές τιμές διηλεκτρικών ιδιοτήτων. Ο προτεινόμενος ανιχνευτής χρησιμοποιήθηκε από τους ερευνητές με επιτυχία για δοκιμές νοθείας διαφόρων βρώσιμων ελαίων όπου μπορεί να ανιχνευθεί ξεκάθαρα η παρουσία συχνών ουσιών επιμόλυνσης ή και νόθευσης, όπως ορυκτέλαιου μέσα σε ελαιόλαδο υψηλής ποιότητας και μουστάρδα.

## Κεφάλαιο 3ο: Ημιτονικός Ταλαντωτής Clapp

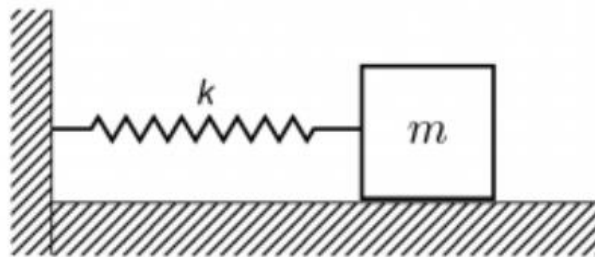
### 3.1 Εισαγωγή στους ταλαντωτές LC

Το πιο απλό μοντέλο ταλαντωτή αποτελεί ένα ζεύγος πυκνωτή και πηνίου όμοιο με αυτό που εμφανίζεται στο παρακάτω σχήμα 33



Σχήμα 33. Απλός ταλαντωτής LC [36]

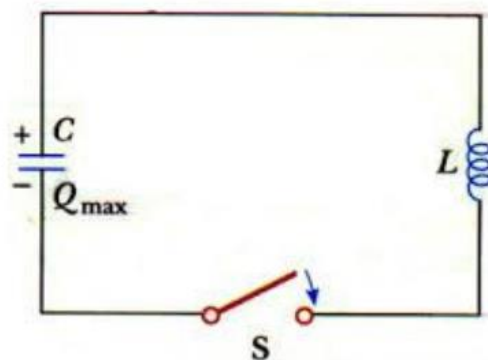
Το παραπάνω σύστημα έχει ανάλογη συμπεριφορά με το μηχανικό του ανάλογο σύστημα μάζας με ελατήριο



Σχήμα 34. Μηχανική ταλάντωση [36]

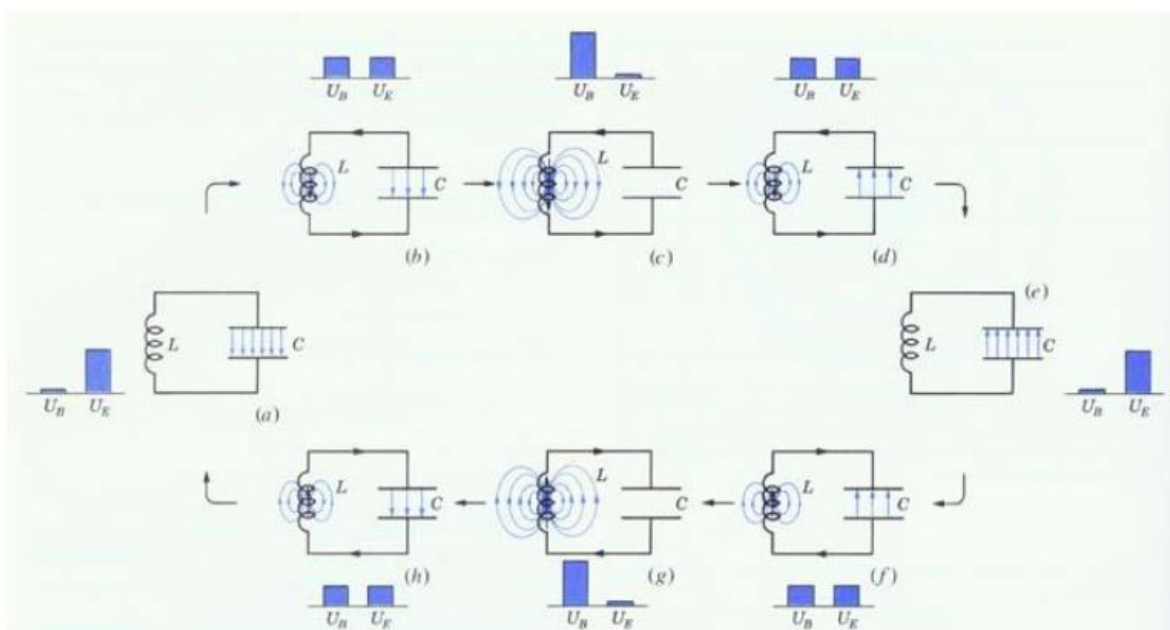
Πιο συγκεκριμένα αν τραβήξουμε τη μάζα προς τα δεξιά και την αφήσουμε ελεύθερη, τότε το σύστημα μας θα εκτελέσει ταλάντωση. Η ομοιότητα με το ηλεκτρικό σύστημα έγκειται στην ημιτονοειδή μεταβολή όλων των μεγεθών που το χαρακτηρίζουν (π.χ. φορτίο, τάση, ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα), όπως ακριβώς και στο μηχανικό σύστημα.

Για να λειτουργήσει το σύστημά μας αρχικά φορτίζουμε τον πυκνωτή με μια πηγή τάσης αφού πρώτα τον έχουμε απομονώσει από το κύκλωμα με την πάνω πλάκα του πυκνωτή να φορτίζεται θετικά και την κάτω αρνητικά και έπειτα τον συνδέουμε ξανά στο κύκλωμα. Η λειτουργία αυτή μάλιστα ισοδυναμεί στο μηχανικό μας σύστημα με τη μετατόπιση της μάζας από τη θέση ισορροπίας του σώματος.



Σχήμα 35. Ταλάντωση πηνίου – πυκνωτή [36]

Κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης στο σύστημα μάζας ελατηρίου, παρατηρείται μια συνεχής μεταβολή της κινητικής ενέργειας της μάζας σε δυναμική ενέργεια του ελατηρίου και το αντίστροφο. Η συνολική ενέργεια του συστήματος παραμένει πάντοτε σταθερή. Η ισοδύναμη διαδικασία στο ηλεκτρικό σύστημα παρατηρείται κατά τη μετατροπή της ενέργειας του ηλεκτρικού πεδίου που από τον φορτισμένο πυκνωτή σε ενέργεια μαγνητικού πεδίου στο πηνίο και το αντίστροφο. Η εν λόγω διαδικασία παριστάνεται στο παρακάτω σχήμα 36, στο οποίο ως  $U_E$  απεικονίζεται η αποθηκευμένη ενέργεια λόγω ηλεκτρικού πεδίου και  $U_B$  αποθηκευμένη ενέργεια λόγω μαγνητικού πεδίου.



Σχήμα 36. Στάδια ταλάντωσης ενός συστήματος πηνίου – πυκνωτή [36]

Κατά την κατάσταση (a) το ρεύμα ξεκινάει να διαρρέει το κύκλωμα και παίρνει τη μέγιστη του τιμή στην κατάσταση (c) στην οποία και η ολική ενέργεια του συστήματος μετατρέπεται σε ενέργεια μαγνητικού πεδίου του πηνίου. Στη συνέχεια η τιμή του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα μειώνεται και μόλις πάρει την τιμή 0 γνωρίζουμε ότι ο πυκνωτής έχει φορτιστεί πλήρως. Ακολουθεί η ίδια διαδικασία με το ρεύμα να ρέει με αντίθετη φορά εξαιτίας της αντίθετης φόρτισης των πλακών του φορτιστή και μέχρι να φτάσουμε ξανά στην κατάσταση (a). Η εν λόγω διαδικασία θα συνεχιστεί επ' άπειρο δεδομένης της απουσίας αντίστασης στο κύκλωμα (ομοίως στο σύστημα ελατηρίου μάζας η

διαδικασία θα συνεχιστεί επ' άπειρο ελλείψει τριβών). Αυτή η περιοδική μεταβολή της τιμής του ρεύματος είναι η οποία μάλιστα είναι και ημιτονοειδής είναι ο λόγος που ονομάζουμε το σύστημα LC, ταλαντωτή.

### 3.2 Συντονισμός

Κάθε ταλαντωτής του παραπάνω τύπου χαρακτηρίζεται από ένα φαινόμενο το οποίο είναι γνωστό και ως συντονισμός. Ο συντονισμός αναφέρεται σε ένα κύκλωμα LC που οδηγείται από μια εξωτερική πηγή σε μια συχνότητα όταν τα μέτρα των χωρητικών και επαγωγικών αντιστάσεων του κυκλώματος γίνουν ίσα. Η συχνότητα με την οποία η ισότητα αυτή ισχύει για το εν λόγω κύκλωμα ονομάζεται συχνότητα συντονισμού και δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} X_L &= -X_C \\ \omega L &= \frac{1}{\omega C} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Και τελικά λύνοντας ως προς τη γωνιακή συχνότητα:

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.2)$$

Η αντίστοιχη σχέση για τη συχνότητα εκφρασμένη σε Hz δίνεται από τη σχέση:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (3.3)$$

Η φυσική σημασία του παραπάνω φαινομένου για ένα ζεύγος LC συνδεδεμένο σε σειρά είναι ότι η επαγωγική και η χωρητική αντίσταση αλληλοεξουδετερώνονται. Στην πραγματικότητα όπου τα στοιχεία του κυκλώματος μας είναι μη ιδανικά το ρεύμα αντιστάσεται των περιελίξεων του πηνίου. Για το λόγο αυτό το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα LC σε κατάσταση συντονισμού είναι το μέγιστο δυνατό. Για τις περιπτώσεις που  $f < f_0$  θα έχουμε  $X_L \ll (-X_C)$  και θα επικρατεί η χωρητική συμπεριφορά του κυκλώματος. Για τις περιπτώσεις που  $f > f_0$  θα έχουμε  $X_L \gg (-X_C)$  και θα επικρατεί η επαγωγική συμπεριφορά του κυκλώματος.

### 3.3 Ο Ταλαντωτής Colpitts

Ο ταλαντωτής Colpitts, εφευρέθηκε το 1818 από τον Αμερικανό μηχανικό Edwin H. Colpitts και είναι ένα από τα πολλά είδη των LC ταλαντωτών, οι οποίοι είναι ταλαντωτές που χρησιμοποιούν συνδυασμό πηνίων (L) και πυκνωτών (C) για την παραγωγή ταλάντωσης σε συγκεκριμένη συχνότητα. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του Colpitts ταλαντωτή είναι ότι η ανατροφοδότηση του ενεργού του στοιχείου γίνεται από έναν διαιρέτη τάσης από δύο πυκνωτές σε σειρά που συνδέονται στις άκρες του πηνίου.

Το κύκλωμα του Colpitts, όπως όλοι οι LC ταλαντωτές, περιλαμβάνει ένα στοιχείο ενίσχυσης (διπολικό τρανζίστορ, FET, τελεστικό ενισχυτή, λυχνία κενού) με την έξοδό του συνδεδεμένη στην είσοδο σε βρόγχο ανάδρασης που περιλαμβάνει ένα LC κύκλωμα (συντονισμένο), που λειτουργεί ως ζωνοπερατό φίλτρο ρυθμίζοντας έτσι την συχνότητα ταλάντωσης. Η συχνότητα ταλάντωσης είναι περίπου η κύρια συχνότητα του LC κυκλώματος δηλαδή του παράλληλου συνδυασμού των δύο εν σειρά πυκνωτών με το πηνίο

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}}} \quad (3.4)$$

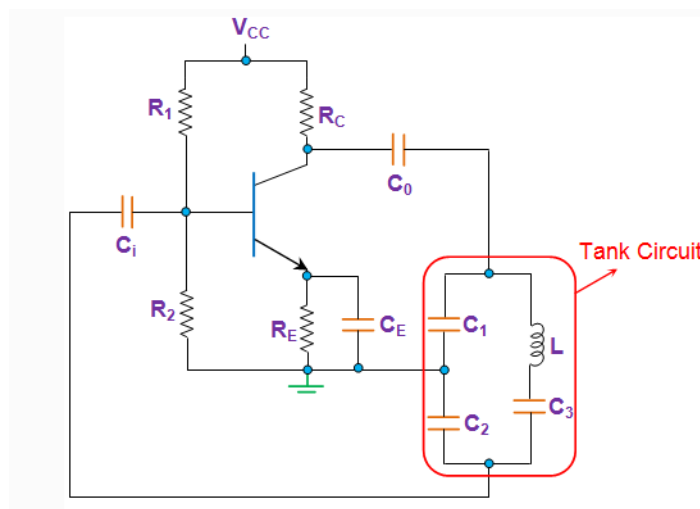
Η πραγματική συχνότητα της ταλάντωσης θα είναι ελαφρώς πιο χαμηλή εξαιτίας των παρασιτικών χωρητικοτήτων και αντίστασης του τρανζίστορ

Όπως σε κάθε ταλαντωτή, η ενίσχυση του ενεργού αντικειμένου θα πρέπει να είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την απόσβεση του χωρητικού διαιρέτη τάσης, για την εξασφάλιση της σταθερής λειτουργίας. Οπότε, ο ταλαντωτής Colpitts λειτουργεί ως ταλαντωτής μεταβλητής συχνότητας και λειτουργεί καλύτερα όταν χρησιμοποιείται μεταβλητό επαγωγικό στοιχείο για τον συντονισμό, αντί για την μεταβολή του πυκνωτή. Εάν η ρύθμιση είναι απαραίτητο να γίνει από πυκνωτή, πρέπει να γίνει από έναν τρίτο πυκνωτή συνδεδεμένο παράλληλα με το πηνίο.

Το κύριο πλεονέκτημα του Colpitts σε σχέση με τους υπόλοιπους ταλαντωτές είναι η καλύτερη απόδοση σε υψηλές συχνότητες. Αυτό οφείλεται στην συνδεσμολογία των πυκνωτών με το πηνίο και έτσι το σήμα εξόδου που παράγεται είναι ημιτονοειδές ακόμα και σε μεγάλες συχνότητες. Το παραπάνω προκύπτει μιας και το πηνίο αναιρεί την αμοιβαία επαγωγική επίδραση των πυκνωτών. Λόγω της εξαιρετικής απόδοσης στην περιοχή υψηλής συχνότητας, ο ταλαντωτής Colpitts μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμη και σε εφαρμογές μικροκυμάτων. [36]

### 3.4 Ταλαντωτής Clapp

Πρόκειται για μία βελτίωση του ταλαντωτή Colpitts στο κύκλωμα του οποίου προστίθεται ένας επιπλέον πυκνωτής σε σειρά με το πηνίο όπως φαίνεται και στο σχήμα 37.



Σχήμα 37. Τυπικό κύκλωμα ταλαντωτή Clapp [https://riverglennapts.com/el/oscillator/638-clapp-oscillator.html]

Εκτός από τον πυκνωτή αυτόν, όλα τα άλλα υλικά του κυκλώματος παραμένουν ίδια όπως και στον Colpitts οπότε και η λειτουργία του κυκλώματος είναι σχεδόν ίδια όπου η αναλογία της ανάδρασης ρυθμίζει τις ταλαντώσεις. Η συχνότητα της ταλάντωσης όμως στον Clapp δίνεται από τον παρακάτω τύπο: [<https://riverglennapts.com/el/oscillator/638-clapp-oscillator.html>]

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}\right)}} \quad (3.5)$$

Ένα πλεονέκτημα που έχει ο ταλαντωτής clapp έναντι του colpitts, είναι ότι εφόσον ο C1 και C2 έχουν μεγαλύτερες τιμές χωρητικότητας από τον C3 ( $C1 > C2 > C3$ ), η συχνότητα του ταλαντωτή επηρεάζεται ελάχιστα από τις παρασιτικές χωρητικότητες του τρανζίστορ ή του ενισχυτή. Επίσης η συχνότητα του ταλαντωτή μένει ανεπηρέαστη από τις τιμές των C1 και C2 λόγω του μεγάλης τους τιμής. Η χωρητικότητα του ισοδύναμου κυκλώματος παραλληλισμού των τριών αυτών πυκνωτών θα είναι πολύ κοντά στην χωρητικότητα του C3. Έτσι προκύπτει ότι η συχνότητα συντονισμού παραμένει λιγότερο επιρρεπής σε παρασιτικές χωρητικότητες άλλων στοιχείων. Κατά συνέπεια μπορούμε να πούμε ότι η συχνότητα συντονισμού του ταλαντωτή μπορεί να απλοποιηθεί όπως παρακάτω:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_3}} \quad (3.6)$$

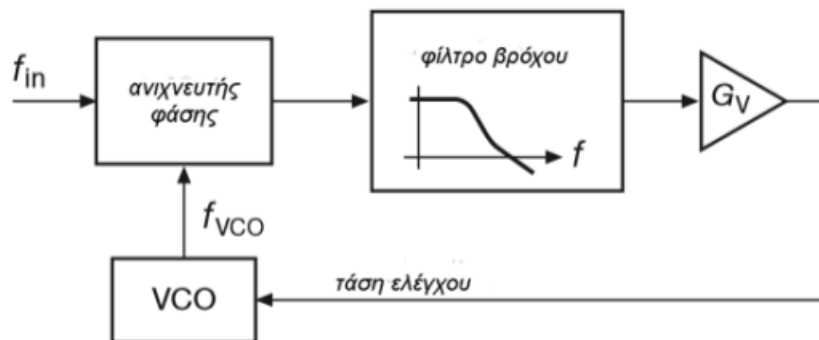
Όπως μπορούμε να καταλάβουμε ο ταλαντωτής Clapp υπερέχει έναντι του Colpitts στην σταθερότητα των ταλαντώσεων και στο ότι επηρεάζεται ελάχιστα από παρασιτικές χωρητικότητες των υλικών οι οποίες είναι άμεσα εξαρτώμενες από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος ειδικά στις περιπτώσεις που χρησιμοποιούμε τρανζίστορ. Σε αυτό που υπερτερεί ο Colpitts έναντι του Clapp είναι στην ικανότητά του να μπορεί να παράγει παλμούς μεγαλύτερου πλάτους. Αυτό συμβαίνει λόγω της ύπαρξης του πυκνωτή C3 στο κύκλωμα παράλληλου συντονισμού. [Σπάσος, Σύγχρονες εφαρμογές ηλεκτρονικών]

Σε αυτήν την εργασία επιλέχτηκε και χρησιμοποιήθηκε ένας ταλαντωτής τύπου Clapp λόγω της μικρής χωρητικότητας του αισθητηρίου που αντικαθιστά τον πυκνωτή C3 αλλά και της σταθερότητας που προσφέρει η παραπάνω συνδεσμολογία.

## Κεφάλαιο 4ο : Phased locked loop (Βρόγχος Κλειδωμένης Φάσης)

### 4.1 Εισαγωγή

Ο Βρόχος Κλειδωμένης Φάσης - PLL (Phase locked loop) είναι ένα ενδιαφέρον και χρήσιμο δομικό στοιχείο που διατίθεται είτε μόνο του σαν ολοκληρωμένο κύκλωμα ( ic) είτε σαν μέρος ενός πιο σύνθετου ic. Ένα PLL αποτελείται από έναν ταλαντωτή ελεγχόμενο από τάση (VCO), ένα ανιχνευτή φάσης και ένα ενισχυτή και αντιπροσωπεύει το κλασικό κύκλωμα επεξεργασίας σήματος μικτής τεχνικής (mixed signal technique) δηλαδή ένα κύκλωμα που χρησιμοποιεί αναλογικές και ψηφιακές τεχνικές. Η τεχνική του μικτού σήματος συνθέτει μία συχνότητα εξόδου  $f_{out}$ , που σχετίζεται με τη συχνότητα αναφοράς του ταλαντωτή  $f_{osc}$  με ένα λόγο όπως π.χ.  $f_{out} = (n/r) \times f_{osc}$ , όπου  $n$  και  $r$  είναι ακέραιοι αριθμοί. Μπορεί να θεωρηθεί και σαν ένας απλός διαιρέτης συχνότητας δια  $n$  (όπου  $f_{out} = f_{osc}/n$ ). Τα PLL χρησιμοποιούνται σε μια ευρεία γκάμα εφαρμογών που εκτείνονται από τις τηλεπικοινωνίες όπως τα κινητά τηλέφωνα, τα ραδιόφωνα, τις τηλεοράσεις, έως τους υπολογιστές και τους ελεγκτές κινητήρων. Μερικές από τις εφαρμογές που χρησιμοποιούνται είναι ο πολλαπλασιασμός συχνότητας, η σύνθεση συχνοτήτων, η παραγωγή και αποκατάσταση παλμών ρολογιού, η τονική αποκωδικοποίηση, η αποδιαμόρφωση AM και FM και η ψηφιακή διαμόρφωση σημάτων. Στο Σχήμα 38 φαίνεται το κλασικό κύκλωμα ενός PLL. Ο ανιχνευτής φάσης είναι μία διάταξη που συγκρίνει δύο συχνότητες εισόδου, παράγοντας μια έξοδο που είναι η μέτρηση της διαφοράς φάσης τους. Π.χ. εάν οι εισόδοι έχουν διαφορετικές συχνότητες θα μας δώσει μια περιοδική έξοδο της διαφοράς των συχνοτήτων εισόδου. Εάν η  $f_{in}$  δεν είναι ίση με την  $f_{VCO}$ , το σήμα σφάλματος φάσης αφού πρώτα φιλτραριστεί και ενισχυθεί, θα προκαλέσει την συχνότητα της VCO να παρεκκλίνει προς την κατεύθυνση της  $f_{in}$ . Εάν οι συνθήκες είναι οι κατάλληλες, η VCO γρήγορα θα κλειδώσει στην  $f_{in}$  διατηρώντας μία σταθερή φασική σχέση με το σήμα εισόδου.



Σχήμα 38. Σχηματικό PLL [40]

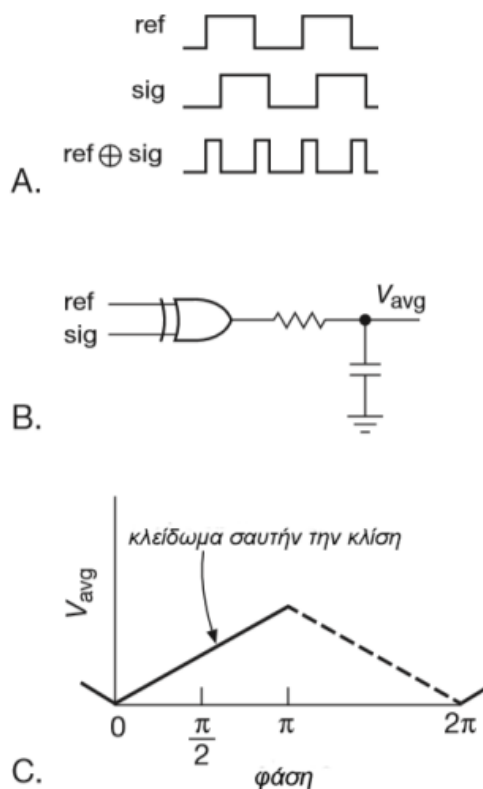
Σαυτό το σημείο η φιλτραρισμένη έξοδος του ανιχνευτή φάσης είναι ένα DC σήμα και η τάση ελέγχου της VCO είναι το μέτρο της απόκλισης της συχνότητας εισόδου, γεγονός που μας δίνει πεδίο εφαρμογής στην τονική αποκωδικοποίηση και στην αποδιαμόρφωση FM. Η έξοδος της VCO είναι μια τοπικά παραγόμενη συχνότητα ίση με την  $f_{in}$ , παρέχοντας έτσι ένα καθαρό είδωλο της  $f_{in}$  η οποία αφεαυτού της μπορεί να περιέχει και θόρυβο. Καθώς η έξοδος της VCO μπορεί να είναι τριγωνική, τετραγωνική ή ημιτονοειδής κυματομορφή, μπορεί για παράδειγμα να παραχθεί μια ημιτονοειδής κυματομορφή κλειδωμένη σε μια παλμοσειρά εισόδου. Μια από τις πιο διαδεδομένες εφαρμογές των PLL είναι ένας μετρητής modulo- $n$  να παρεμβάλλεται μεταξύ της εξόδου της VCO και του ανιχνευτή φάσης παράγοντας με αυτό τον τρόπο ένα σήμα με συχνότητα πολλαπλάσια της συχνότητας αναφοράς εισόδου  $f_{in}$ . Αυτή είναι μια ιδανική μέθοδος παραγωγής παλμών χρονισμού σε πολλαπλάσια συχνότητα από την συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας του δικτύου (50Hz), για να χρησιμοποιηθεί στους ADC ολοκλήρωσης με σκοπό την απόρριψη της επίδρασης της συχνότητας των

50Hz της γραμμής του δικτύου και των αρμονικών της. Επίσης αυτή την τεχνική χρησιμοποιούν και τα ηλεκτρονικά όργανα (αρμόνια συνθεσάιζερς κ.λ.π) για σύνθεση σημάτων διαφόρων συχνοτήτων.

## 4.2 Βαθμίδες που αποτελούν το PLL

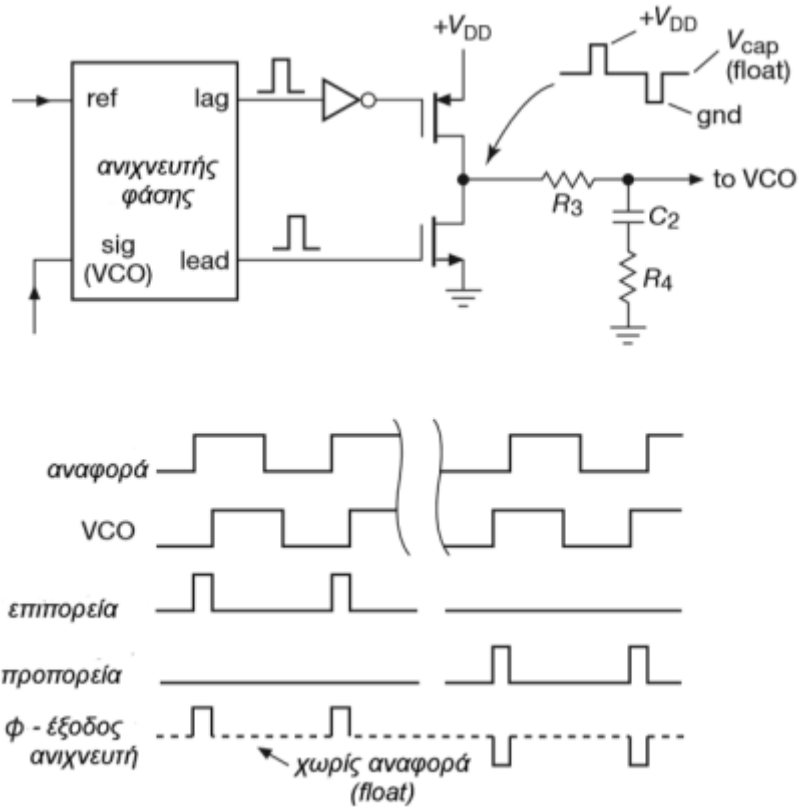
### 4.2.1 Ο ανιχνευτής φάσης (Phase detector)

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι ανιχνευτή φάσης, ο τύπος I και ο τύπος II. Ο ανιχνευτής φάσης τύπου I μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ανιχνεύσει διαφορές φάσης είτε σε αναλογικά είτε σε ψηφιακά σήματα και εκτελεί ένα απλό πολλαπλασιασμό των εισόδων. Για ψηφιακά σήματα είναι απλά μια πύλη X-OR, της οποίας η έξοδος αφού περάσει από ένα βαθυπερατό φίλτρο, είναι συνάρτηση της τάσης εξόδου ως προς τη διαφορά φάσης και έχει την μορφή ράμπας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 39 για τετραγωνικούς παλμούς εισόδου με κύκλο εργασίας DC = 50%.



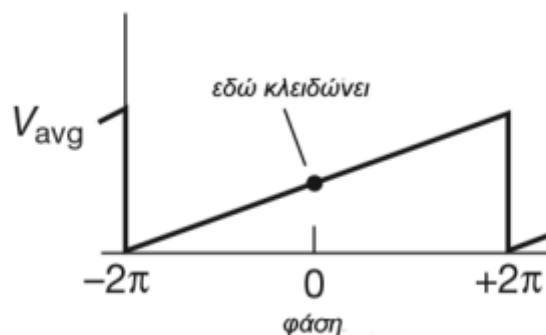
Σχήμα 39. Λειτουργία ανιχνευτή φάσης [40]

Για τα αναλογικά σήματα εισόδου αποτελείται από ένα αληθινό αναλογικό πολλαπλασιαστή τεσσάρων τεταρτημορίων, ή ζυγοσταθμισμένο μίκτη, με παρόμοια συνάρτηση τάσης εξόδου ως προς τη διαφορά φάσης με αυτήν της θύλης XOR. Ανιχνευτές φάσης υψηλής γραμμικότητας αυτού του τύπου είναι απαραίτητοι για συγχρονισμένη αντίληψη (lock-in detection). Ο τύπου II ανιχνευτής φάσης είναι αμιγώς ψηφιακός και οδηγείται από ψηφιακές μεταβάσεις (αιχμές). Είναι ευαίσθητος μόνο στο σχετικό χρονισμό των μεταβάσεων μεταξύ του σήματος αναφοράς και της εισόδου VCO όπως φαίνεται στο Σχήμα 40.



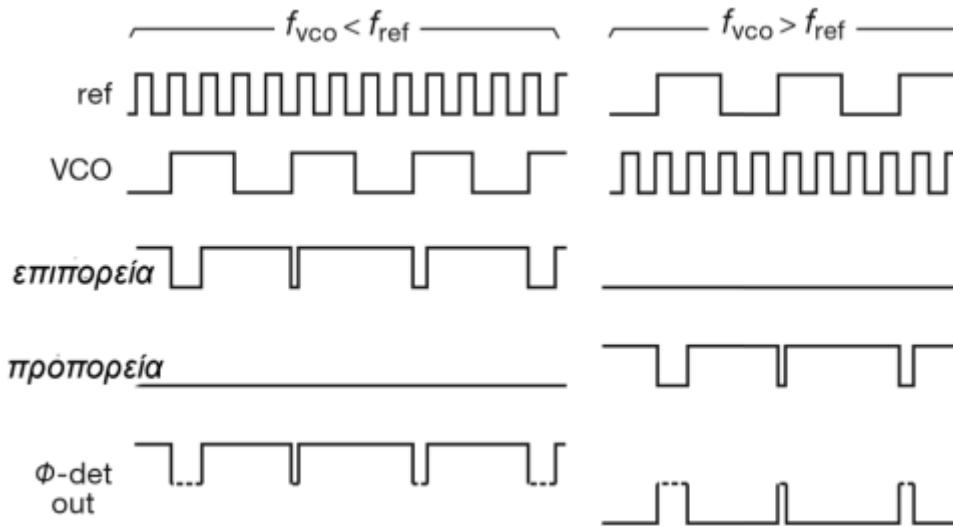
Σχήμα 40. Έξοδος ανιχνευτή φάσης [40]

Το κύκλωμα του συγκριτή φάσης παράγει παλμούς εξόδου προπορείας ή επιπορείας, εξαρτώμενους από το αν οι μεταβάσεις των παλμών εξόδου της VCO λαμβάνουν χώρα πριν ή μετά των μεταβάσεων των παλμών αναφοράς αντίστοιχα, με το πλάτος τους να εξαρτάται από την αντίστοιχη διαφορά μεταξύ των παλμών όπως φαίνεται στο Σχήμα 40. Το κύκλωμα εξόδου τότε, είτε λειτουργεί ως εκροή (sink) τραβώντας ρεύμα από την τροφοδοσία, είτε ως πηγή (source) δίνοντας ρεύμα στο φορτίο αντίστοιχα κατά την διάρκεια αυτών των παλμών, αλλιώς είναι ανοικτό κύκλωμα, παράγοντας μια μέση τιμή τάσης εξόδου ως προς την διαφορά φάσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 41.



Σχήμα 41. Κλείδωμα φάσης [40]

Αυτό είναι τελείως ανεξάρτητο από τον κύκλο εργασίας (Duty Cycle) των σημάτων εισόδου, αντίθετα με ότι συνέβαινε στον αναλογικό ανιχνευτή φάσης τύπου I. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό του τύπου II ανιχνευτή φάσης, είναι το γεγονός ότι οι παλμοί εξόδου εξαφανίζονται τελείως όταν τα δύο σήματα είναι κλειδωμένα. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει κυμάτωση (ripple) στην έξοδο για να παραχθεί περιοδική διαμόρφωση φάσης στο βρόχο, όπως συμβαίνει στον τύπου I ανιχνευτή. Επίσης ο ανιχνευτής φάσης τύπου II παράγει μία μέση DC τάση εξόδου που είναι ενδεικτική του πρόσημου του σφάλματος συχνότητας όπως φαίνεται στο Σχήμα 42.



Σχήμα 42. Ανιχνευτής φάσης τύπου II [40]

Υπάρχει ακόμη μια διαφορά μεταξύ των δύο τύπων ανιχνευτών φάσης. Ο τύπος I παράγει πάντα ένα σήμα εξόδου που θα πρέπει μετά να φιλτραριστεί από το φίλτρο του βρόχου. Έτσι σε ένα PLL με ανιχνευτή φάσης τύπου I, το φίλτρο του βρόχου λειτουργεί σαν ένα βαθυπερατό φίλτρο μετατρέποντας τη ψηφιακή έξοδο του ανιχνευτή σε ένα DC σήμα. Σαυτό το DC σήμα θα υπάρχει πάντα μια εναπομείνασα κυμάτωση που θα προξενεί αναπόφευκτες περιοδικές μεταβολές φάσης. Σε κυκλώματα όπου τα PLLs χρησιμοποιούνται για πολλαπλασιασμό συχνότητας ή σύνθεση συχνοτήτων, αυτό το ελάττωμα προσθέτει πλευρικές ζώνες διαμόρφωσης φάσης στο σήμα εξόδου. Σε αντίθεση, ο τύπος II ανιχνευτή παράγει παλμούς εξόδου μόνο όταν υπάρχει διαφορά φάσης μεταξύ των σημάτων αναφοράς και VCO. Καθώς ο ανιχνευτής συμπεριφέρεται σαν ανοικτό κύκλωμα όταν δεν υπάρχει διαφορά φάσης, ο πυκνωτής του φίλτρου του βρόχου, δρα σαν διάταξη αποθήκευσης τάσης κρατώντας σταθερή την τάση που δίνει την σωστή συχνότητα του VCO. Εάν το σήμα αναφοράς μετακινηθεί από αυτή την συχνότητα, ο ανιχνευτής φάσης παράγει μία παλμοσειρά από στενούς παλμούς φορτίζοντας ή εκφορτίζοντας τον πυκνωτή μετακινώντας την τάση του πυκνωτή στην σωστή τιμή για να επιτευχθεί το κλειδωμα.

#### 4.2.2 Ταλαντωτής ελεγχόμενος από τάση (VCO)

Μία βασική διάταξη για ένα PLL είναι ένας ταλαντωτής του οποίου η συχνότητα μπορεί να ελεγχθεί από την DC τάση εξόδου του ανιχνευτή τάσης (VCO). Σε ένα PLL συχνά θέλουμε να περιορίσουμε την περιοχή συχνοτήτων του ταλαντωτή σε ένα περιορισμένο εύρος γύρω από μια κεντρική συχνότητα. Για παράδειγμα σε ένα δέκτη ραδιοφώνου FM χρειάζεται ένα εύρος ζώνης περίπου  $\pm 100\text{KHz}$  γύρω από μια συχνότητα περίπου  $100\text{MHz}$ . Στο κλασικό ο.κ. PLL το 4046 αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση δύο εξωτερικών αντιστάσεων και ενός πυκνωτή. Σε άλλα πιο μοντέρνα ο.κ. PLL τα οποία δουλεύουν σε συχνότητες εκατοντάδων ή χιλιάδων MHz δεν χρησιμοποιείται χρονοισμός με κύκλωμα RC όπως στον κλασικό VCO, αλλά χρησιμοποιώντας:

- LC δικτυώματα όπου ο συντονισμός επιτυγχάνεται με τη χρήση μεταβλητών πυκνωτών (Varactors ή Varicaps),
- “ring oscillator” (μια σειρά από αναστροφείς) που συντονίζονται στην επιθυμητή συχνότητα ρυθμίζοντας το ρεύμα λειτουργίας τους.
- ταλαντωτές καθυστέρησης διάδοσης που χρησιμοποιούν τεχνικές επιφανειακών ακουστικών κυμάτων (SAW)
- συντονιστές που χρησιμοποιούν μικρο-ηλεκτρο-μηχανικά-συστήματα από πυρίτιο (MEMS)

Ένας ταλαντωτής VCO που χρησιμοποιείται σε βρόχο PLL, δεν απαιτείται να είναι ιδιαίτερα γραμμικός κατά τη μετατροπή της τάσης εισόδου σε συχνότητα, αλλά από την άλλη, εάν είναι πολύ μη γραμμικός, το κέρδος βρόχου θα μεταβάλλεται σύμφωνα με τη συχνότητα του σήματος και θα προκαλέσει αστάθεια στο κύκλωμα.

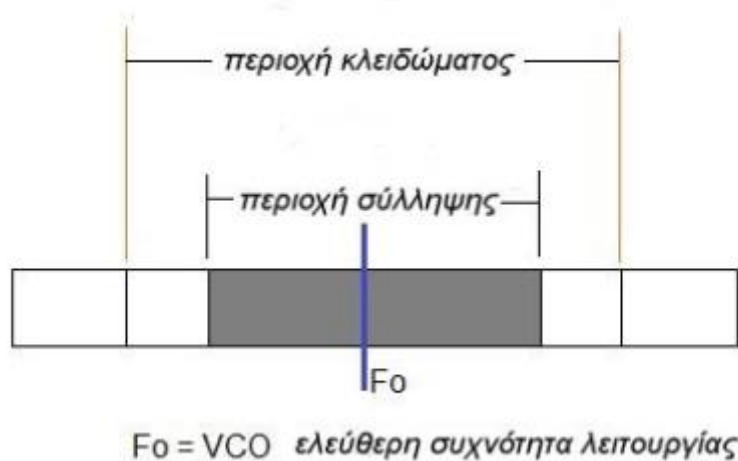
## 4.3 Σχεδιασμός PLL

### 4.3.1 Κλείνοντας το βρόχο

Ο ανιχνευτής φάσης μας δίνει μία DC τάση εξόδου που σχετίζεται με τη διαφορά φάσης μεταξύ του σήματος εισόδου και του σήματος αναφοράς. Ο VCO μας επιτρέπει να ελέγξουμε την συχνότητα εξόδου του ανάλογα με την DC τάση που δέχεται στην είσοδο του. Φαίνεται εύκολο να συμπεράνουμε, ότι μπορούμε να κλείσουμε αυτόν το βρόχο ανάδρασης βάζοντας και κάποιο κέρδος, όπως π.χ. σε ένα κύκλωμα τελεστικού ενισχυτή. Εδώ όμως υπάρχει μια θεμελιώδης διαφορά. Προηγουμένως, η ποσότητα που ρυθμίστηκε με την ανάδραση, ήταν η ίδια ποσότητα που μετρήθηκε για να παράξει το σήμα σφάλματος, ή, τουλάχιστον μια αναλογική ποσότητα αυτού. Π.χ. σε ένα ενισχυτή τάσης μετράμε στην έξοδο τάση και ρυθμίζουμε την τάση εισόδου αντίστοιχα. Αλλά σε ένα PLL υπάρχει μία ολοκλήρωση, μετράμε φάση αλλά ρυθμίζουμε συχνότητα, όπου η φάση είναι ή ολοκλήρωση της συχνότητας. Αυτό εισάγει μία καθυστέρηση  $90^\circ$  ολίσθησης φάσης στο βρόχο. Ο ολοκληρωτής που συμπεριλαμβάνεται στο βρόχο ανάδρασης έχει σοβαρές επιπτώσεις στη λειτουργία του βρόχου καθώς μία επιπρόσθετη καθυστέρηση φάσης  $90^\circ$  στη συχνότητα που το κέρδος βρόχου είναι μονάδα θα μπορούσε να παράξει ταλαντώσεις. Μια απλή λύση είναι να αποφύγουμε να χρησιμοποιήσουμε εξαρτήματα που να παράγουν επιπλέον καθυστέρηση στο βρόχο, τουλάχιστον σε συχνότητες όπου το κέρδος βρόχου είναι μονάδα. Αυτή είναι μία προσέγγιση και παράγει αυτό που είναι γνωστό σαν “βρόχος πρώτης τάξης”. Αν και οι βρόχοι πρώτης τάξης είναι χρήσιμοι σε αρκετές περιπτώσεις, δεν έχουν την επιθυμητή ιδιότητα να ενεργούν σαν διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας (Flywheel) επιτρέποντας τον VCO να εξομαλύνει θορύβους και αυξο- μειώσεις στο σήμα εισόδου. Ακόμη περισσότερο ένας βρόχος πρώτης τάξης δεν διατηρεί μια σταθερή σχέση φάσης μεταξύ του σήματος αναφοράς και της εξόδου του VCO διότι η έξοδος του ανιχνευτή φάσης οδηγεί απευθείας τον VCO. Ένας βρόχος δεύτερης τάξης έχει επιπρόσθετο βαθυπερατό φίλτράρισμα μέσα στο βρόχο ανάδρασης, προσεκτικά σχεδιασμένο, έτσι ώστε να αποφεύγονται αστάθειες. Αυτό του επιτρέπει να λειτουργεί σαν διάταξη αποθήκευσης ενέργειας και επίσης μειώνει την περιοχή σύλληψης (capture range) αυξάνοντας τον χρόνο σύλληψης (capture time). Ακόμη περισσότερο, όταν χρησιμοποιούμε τους ανιχνευτές φάσης τύπου II, ένας βρόχος δεύτερης τάξης εγγυάται κλειδώμα φάσης με μηδενική διαφορά φάσης μεταξύ των σημάτων αναφοράς και VCO. Οι βρόχοι δεύτερης τάξης χρησιμοποιούνται σχεδόν παντού, διότι οι εφαρμογές των PLL συχνά απαιτούν σήματα με συχνότητα εξόδου με χαμηλό θόρυβο φάσης και κάποιας μορφής προσωρινής αποθήκευσης ενέργειας (Flywheel action). Οι βρόχοι δεύτερης τάξης επιτρέπουν υψηλό κέρδος βρόχου σε χαμηλές συχνότητες γεγονός που οδηγεί σε διατάξεις υψηλής σταθερότητας.

### 4.3.2 Περιοχή κλειδώματος (lock range) και περιοχή σύλληψης (capture range) θενός PLL

Η περιοχή συχνοτήτων μέσα στις οποίες το PLL θα ανιχνεύσει την συχνότητα του σήματος εισόδου και θα κλειδώσει, εξαρτάται από την θεμελιώδη συχνότητα του VCO, ονομάζεται περιοχή κλειδώματος (PLL lock range) και περιλαμβάνει ζώνες συχνοτήτων πάνω και κάτω απ' αυτήν. Εάν η συχνότητα του σήματος εισόδου βγει εκτός της περιοχής κλειδώματος του PLL, τότε η συχνότητα του VCO μεταπηδά στη θεμελιώδη του συχνότητα. Η περιοχή σύλληψης (PLL capture range) ενός PLL, είναι η περιοχή συχνοτήτων του σήματος εισόδου, μέσα στην οποία ο ανιχνευτής φάσης και VCO μπορούν να αντιδρούν αρκετά γρήγορα (δηλαδή να βγάλουν αποτέλεσμα κατά τη διάρκεια ενός κύκλου του σήματος εισόδου), έτσι ώστε να επιτυγχάνεται το κλείδωμα φάσης πριν ο συγκριτής φάσης ξεκινήσει νέο κύκλο. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 43 και οι δύο περιοχές είναι συμμετρικές γύρω από την θεμελιώδη συχνότητα του PLL, με την περιοχή σύλληψης να είναι μικρότερη της περιοχής κλειδώματος.



Σχήμα 43. Περιοχές λειτουργίας PLL [40]

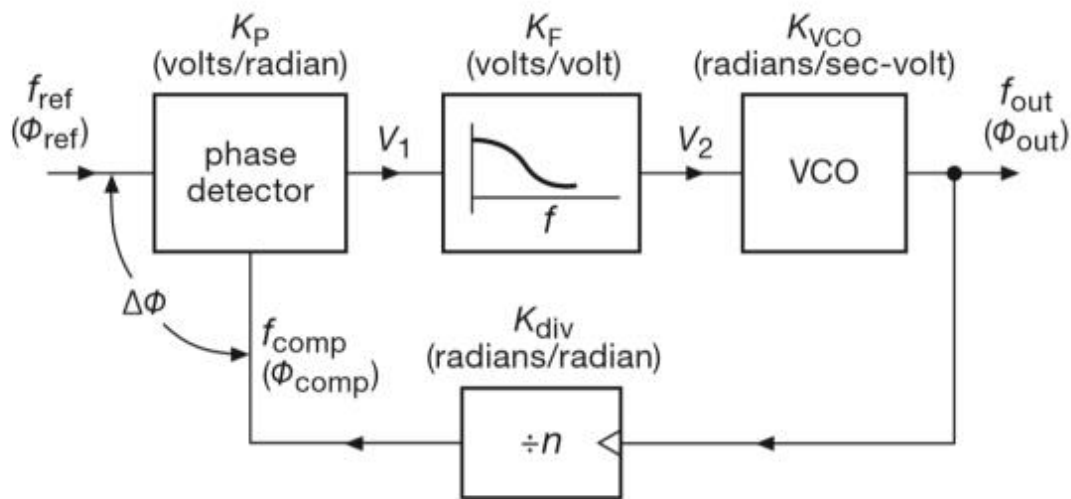
## 4.4 Εφαρμογές PLL

Τα PLLs όπως προαναφέραμε στην εισαγωγή καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Στη συνέχεια θα αναφερθούμε σε μερικές από τις χαρακτηριστικότερες.

### 4.4.1 Πολλαπλασιαστής συχνότητας

Η δημιουργία ενός σταθερού σήματος με συχνότητα πολλαπλάσια του σήματος εισόδου είναι μια από τις πιο κοινές εφαρμογές των PLL. Αυτό συνήθως χρησιμοποιείται σε ηλεκτρονικά πιάνα (αρμόνια) όπου από μια πηγή σήματος χαμηλής συχνότητας μπορούν να παραχθούν σήματα πολλαπλασίων συχνοτήτων για να αναπαραστήσουν όλο το φάσμα των ακουστικών συχνοτήτων. Μια άλλη εφαρμογή του πολλαπλασιαστή συχνότητας, είναι η χρησιμοποίηση του PLL για παραγωγή μιας συχνότητας ρολογιού κλειδωμένης σε μια άλλη συχνότητα αναφοράς που είναι διαθέσιμη στην διάταξη μας. Π.χ. Ας υποθέσουμε ότι θέλουμε να παράγουμε ένα σήμα ρολογιού συχνότητας 51,2 kHz γθια τον χρονισμό ενός 10 bit ADC διπλής ολοκλήρωσης (Dual ramp ή Dual integration). Η επιλογή της συχνότητας επιτρέπει 6,25 μετρήσεις ανά δευτερόλεπτο, χρησιμοποιώντας 4096 παλμούς ρολογιού για την άνοδο της ράμπας και 4096 παλμούς ρολογιού για την κάθοδο της ράμπας (οι ADC διπλής ράμπας έχουν σταθερό χρόνο μετατροπής). Η ιδιαιτερότητα της χρησιμοποίησης PLL για την δημιουργία του σήματος ρολογιού έγκειται στο ότι η συχνότητα των 51,2 kHz μπορεί να

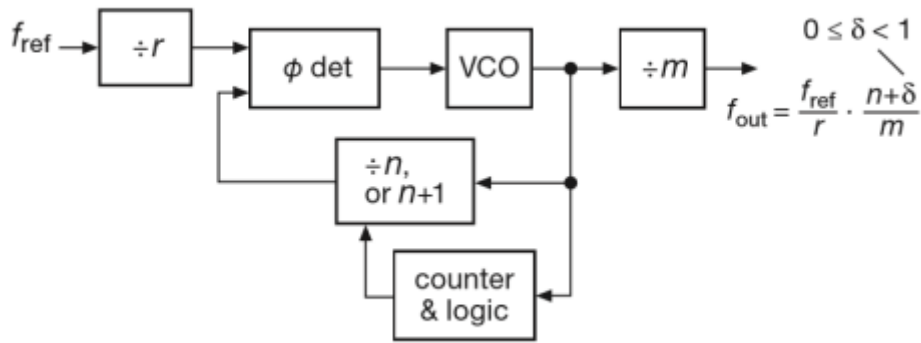
κλειδωθεί στην συχνότητα του δικτύου τροφοδοσίας ( $51200 \times 50 = 1024$ ), επιτυγχάνοντας με αυτό τον τρόπο απόρριψη των θορύβων που προέρχονται από τη συχνότητα 50Hz του δικτύου τροφοδοσίας. Για να υλοποιήσουμε τον πολλαπλασιαστή συχνότητας προσθέτουμε ένα μετρητή που πραγματοποιεί διαίρεση δια  $n$  μεταξύ της εξόδου της VCO και του ανιχνευτή φάσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 44. Σε αυτό το διάγραμμα φαίνονται και οι μονάδες κέρδους κάθε λειτουργίας που συντελείται στο βρόχο και οι οποίες είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στον υπολογισμό σταθερότητας του βρόχου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το βαθυπερατό φίλτρο και ο μετρητής που πραγματοποιεί διαίρεση δια  $n$  έχουν κέρδος μικρότερο της μονάδας.



Σχήμα 44. Πολλαπλασιαστής συχνότητας [40]

#### 4.4.2 Κλασματική σύνθεση συχνοτήτων

Μια πιο ευέλικτη μορφή από τον απλό πολλαπλασιαστή συχνοτήτων που μας επιτρέπει να δημιουργήσουμε σήμα οποιασδήποτε συχνότητας που να ξεκινάει ακόμη και κάτω από 1Hz είναι ο κλασματικός συνθέτης συχνοτήτων. Ας υποθέσουμε ότι με ένα σήμα αναφοράς συχνότητας 10MHz θα θέλαμε ένα σήμα εξόδου με βήμα συχνότητας 1Hz. Αυτή η διάταξη μπορεί να υλοποιηθεί όπως φαίνεται στο Σχήμα 45, χρησιμοποιώντας ένα διαιρέτη συχνότητας στην είσοδο (Prescaler) του PLL, ένα διαιρέτη συχνότητας στην έξοδο του PLL και έναν ακέραιο  $n$ -διαιρέτη εντός του PLL τον οποίο θα πρέπει να τροποποιήσουμε έτσι ώστε να δουλεύει κάποιο χρόνο σαν  $n$  και τον υπόλοιπο χρόνο του σαν  $n+1$ . Αυτή είναι μια κλασματική  $n$ -σύνθεση.



Σχήμα 45. Υλοποίηση κλασματικής σύνθεσης συχνοτήτων [40]

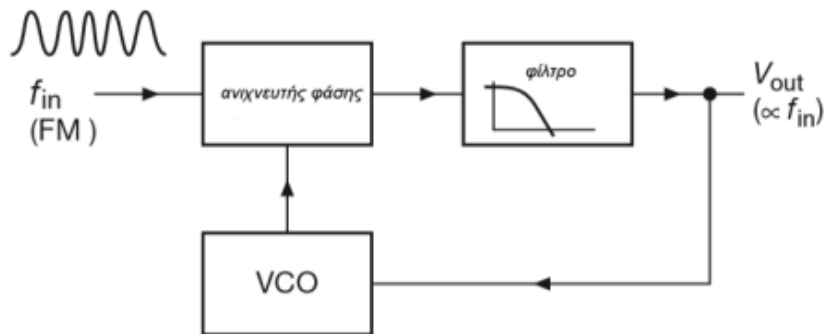
Η συχνότητα του σήματος εξόδου που προκύπτει ισούται με:

$$f_{out} = \frac{f_{ref}}{r} \cdot \frac{n+\delta}{m} \quad (4.1)$$

Όπου  $0 \leq \delta < 1$ , επιτυγχάνοντας με αυτό τον τρόπο το  $n$  να μπορεί να πάρει μια κλασματική τιμή. Με την κλασματική  $n$ -σύνθεση μπορούμε να πετύχουμε σήματα με ευρεία περιοχή συχνοτήτων εξόδου, υψηλή διακριτική ικανότητα (μικρό μέγεθος βήματος), ενώ ταυτόχρονα διατηρούμε σε σχετικά υψηλή τιμή την συχνότητα σύνθεσης εισόδου  $f_{composite}$  και η οποία μας επιτρέπει μεγάλο εύρος ζώνης βρόχου και επομένως γρήγορη αντίκριση και γρήγορο κλείδωμα στην επιθυμητή συχνότητα. Η διάταξη της κλασματικής  $n$ -σύνθεσης απαιτεί μερικά επιπρόσθετα λογικά κυκλώματα (μετρητές και πύλες) για να μπορεί να ελεγχθεί το πόσο συχνά θα γίνεται η εναλλαγή μεταξύ  $n$  και  $n+1$ .

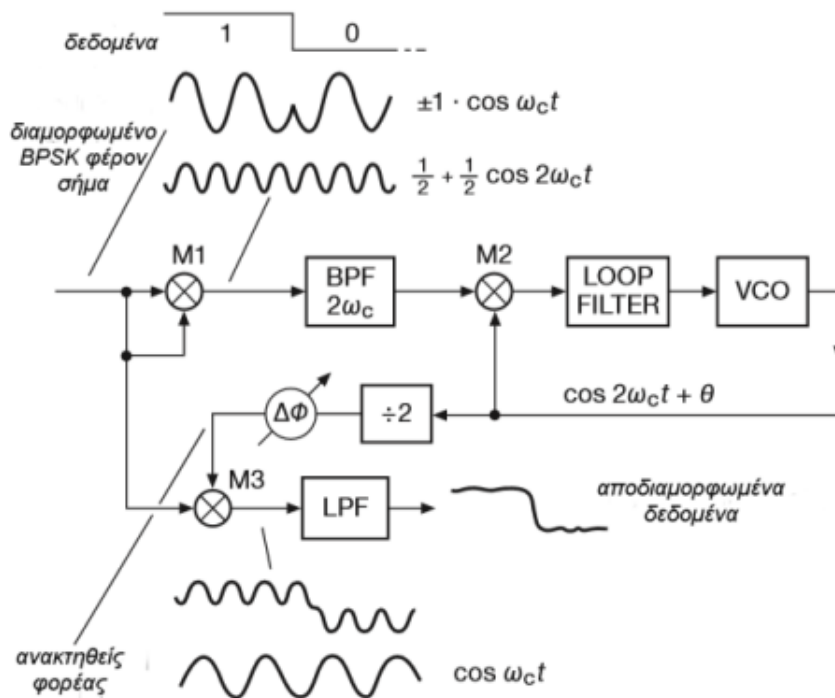
### 4.4.3 Αποδιαμόρφωση FM

Στη διαμόρφωση συχνότητας, η πληροφορία είναι κωδικοποιημένη πάνω σε ένα φέρον σήμα μεταβάλλοντας την συχνότητα του ανάλογα με την κυματομορφή της πληροφορίας. Αποδιαμόρφωση FM μπορεί να γίνει με αρκετούς τρόπους. Στην απλούστερη μορφή του ένα PLL κλειδώνει στην συχνότητα του εισερχόμενου σήματος. Η τάση που ελέγχει την συχνότητα του VCO είναι ανάλογη των μεταβολών της συχνότητας του σήματος εισόδου και αποτελεί το επιθυμητό σήμα διαμόρφωσης (Σχήμα 46). Σε ένα τέτοιο σύστημα θα πρέπει το εύρος ζώνης του φίλτρου να επιλεγεί έτσι, ώστε να είναι αρκετά ευρύ για να μπορεί να περνά το διαμορφωμένο σήμα. Με άλλα λόγια ο χρόνος απόκρισης του PLL πρέπει να είναι μικρός συγκρινόμενος με την χρονοκλίμακα των μεταβολών του ανακτώμενου σήματος. [40]



#### 4.4.4 Ψηφιακή αποδιαμόρφωση

Το PLL είναι βασικό δομικό στοιχείο στην αποδιαμόρφωση δεδομένων από ένα φέρον σήμα που έχει διαμορφωθεί από ένα ψηφιακό σήμα. Στον πιο απλό τύπο ψηφιακής διαμόρφωσης BPSK (Binary phase shift keying), κάθε bit που εκπέμπεται, είτε αναστρέφει, είτε όχι, τη φάση ενός φέροντος σήματος σταθερού πλάτους. Αυτά τα κωδικοποιημένα bits ανακτώνται στον δέκτη πολλαπλασιάζοντας το ληφθέν BPSK διαμορφωμένο φέρον σήμα, με ένα σήμα ίδιας συχνότητας με το φέρον.



Σχήμα 47. Μέθοδος βρόγχου τετραγώνου [40]

Για να αποδιαμορφωθεί το BPSK σήμα με PLL χρησιμοποιούμε την μέθοδο του βρόγχου τετραγώνου (squaring loop) όπως φαίνεται στο Σχήμα 47. Ο πρώτος μίκτης M1 παράγει σήμα διπλάσιας συχνότητας από το φέρον  $2f_c$ , το οποίο καθαρίζεται από ένα ζωνοπερατό φίλτρο και χρησιμεύει να κλειδώσει ένα PLL, με την VCO να λειτουργεί σαν διάταξη αποθήκευσης ενέργειας (Flywheel). Στη συνέχεια ένας διαιρέτης δια 2 δημιουργεί ένα είδωλο του φέροντος σήματος συχνότητας  $f_c$ , με μία διόρθωση φάσης για να το φέρει σε ευθυγράμμιση με το υπό επεξεργασία ληφθέν φέρον σήμα. Τελικά ο μίκτης M3 συγχρονισμένα επανακτά τα διαμορφωμένα bits, με ένα τελικό βαθυπερατό φίλτρο που απομακρύνει την κυμάτωση που οφείλεται στο συχνότητας  $2f_c$  σήμα.

## Κεφάλαιο 5ο : Φίλτρα

### 5.1 Εισαγωγή στα φίλτρα

Τα ηλεκτρονικά φίλτρα χρησιμοποιούνται για την επιλεκτική καταπίεση ή, αντίστοιχα, διέλευση ενός εύρους συχνοτήτων. Ένα φίλτρο παρεμβάλλεται μεταξύ δύο βαθμίδων ενός ηλεκτρονικού συστήματος με σκοπό να ελέγξει την ισχύ που μεταφέρεται από την πρώτη βαθμίδα στην δεύτερη, με ένα τρόπο που εξαρτάται από την συχνότητα. Με το φίλτρο δηλ. μπορθούμε να οδηγούμε μόνον τις επιθυμητές συχνότητες στην επόμενη βαθμίδα με ελάχιστη εξασθένηση, ενώ τις υπόλοιπες με τόσο μμεγάλη εξασθένηση, που να θεωρείται ότι δεν περνούν. Τα φίλτρα διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες:

- Τα βαθυπερατά φίλτρα επιτρέπουν την διέλευση ενός εύρους συχνοτήτων με αρχή την DC συνιστώσα του σήματος, και καταπιέζουν τις υψηλότερες συχνότητες.
- Τα υψιπερατά φίλτρα επιτρέπουν την διέλευση συχνοτήτων από μια συχνότητα και πάνω, ενώ καταπιέζουν τις χαμηλότερες συχνότητες. Στην πράξη τα υψιπερατά φίλτρα δεν έχουν άπειρο εύρος ζώνης λόγω των περιορισμών που επιβάλλονται από τα ηλεκτρονικά κυκλώματα με τα οποία τα υλοποιούμε.
- Τα ζωνοπερατά φίλτρα επιτρέπουν την διέλευση ενός εύρους μεταξύ δύο συχνοτήτων, ενώ καταπιέζουν όλες τις άλλες συχνότητες, είτε υψηλότερες είτε χαμηλότερες.
- Τα ζωνοφρακτικά φίλτρα καταπιέζουν ένα εύρος μεταξύ δύο συχνοτήτων, ενώ επιτρέπουν την διέλευση όλων των άλλων συχνοτήτων, είτε υψηλότερων είτε χαμηλότερων.
- Τα ολοπερατά φίλτρα επιτρέπουν την διέλευση όλων των συχνοτήτων και χρησιμοποιούνται με στόχο τον καθορισμό των χαρακτηριστικών φάσης ενός σήματος. Όπως και τα υψιπερατά, τα ολοπερατά φίλτρα δεν έχουν άπειρο εύρος ζώνης λόγω των περιορισμών που επιβάλλονται από τα ηλεκτρονικά κυκλώματα με τα οποία τα υλοποιούμε.

Σημειώνεται ότι η συνάρτηση μεταφοράς ενός οποιουδήποτε συστήματος, άρα και των φίλτρων, ορίζεται ως η απόκριση του συστήματος, δηλαδή ο λόγος του σήματος εξόδου προς το σήμα εισόδου στο πεδίο των συχνοτήτων:

$$T(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)}, T(j\omega) = \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)}. \quad (5.1)$$

Η συνάρτηση μεταφοράς είναι μιγαδικός αριθμός, δηλαδή έχει μέτρο και φάση:

$$T(j\omega) = |T(j\omega)| \cdot \exp(j\varphi(\omega)). \quad (5.2)$$

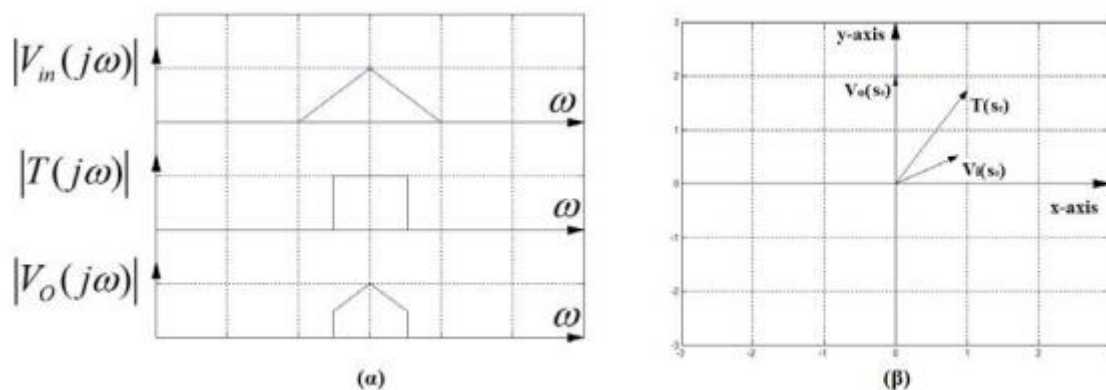
Της, πολύ συχνά, η συνάρτηση μεταφοράς είναι μια πολυωνυμική συνάρτηση της μορφής

$$T(s) = \frac{a_M s^M + a_{M-1} s^{M-1} + \dots + a_0}{s^N + b_{N-1} s^{N-1} + \dots + b_0}. \quad (5.3)$$

Σε μια τέτοια περίπτωση θα πρέπει  $N \geq M$ , αλλιώς θα είναι  $T(j\omega) \rightarrow +\infty$  όταν  $\omega \rightarrow +\infty$ . Το κέρδος και η εξασθένηση τις συστήματος σε dB ορίζονται από τις εξισώσεις:

$$G(j\omega) = 20 \log |T(j\omega)|, A(j\omega) = -20 \log |T(j\omega)|. \quad (5.4)$$

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 48, το σήμα εξόδου ενός συστήματος στο πεδίο των συχνοτήτων δίνεται από το γινόμενο του σήματος εισόδου επί την συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος. Έτσι, στο (α) παρατηρούμε την επίδραση του πλάτους της συνάρτησης μεταφοράς στο πλάτος του σήματος εξόδου συναρτήσει της συχνότητας, ενώ στο (β) παρατηρούμε την επίδραση και του πλάτους και της στροφής της συνάρτησης μεταφοράς στο σήμα εξόδου για μια συχνότητα.



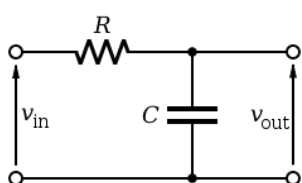
Σχήμα 48. Το σήμα εξόδου ενός συστήματος στο πεδίο των συχνοτήτων δίνεται από το γινόμενο του σήματος εισόδου επί την συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος: (α) απεικόνιση πλάτων συναρτήσει της συχνότητας, (β) απεικόνιση μιγαδικών σε μία συχνότητα μόνο. [38]

Συνεπώς, το μέτρο του σήματος εξόδου θα είναι το γινόμενο του μέτρου του σήματος εισόδου επί το μέτρο της συνάρτησης μεταφοράς, ενώ η φάση του σήματος εξόδου θα είναι το άθροισμα της φάσης του σήματος εισόδου επί την στροφή φάσης του συστήματος (ή, ισοδύναμα, επί την φάση της συνάρτησης μεταφοράς):

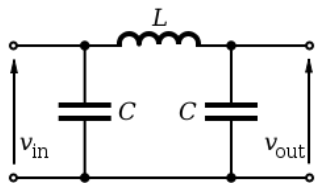
$$|V_o(j\omega)| = |T(j\omega)| \cdot |V_{in}(j\omega)|, \quad \varphi_o(\omega) = \varphi_T(\omega) + \varphi_{in}(\omega). \quad [38] \quad (5.5)$$

## 5.2 Παθητικά Φίλτρα

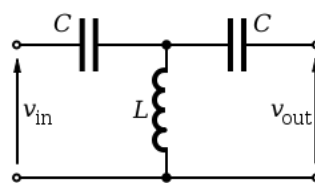
Τα παθητικά φίλτρα βασίζονται στον συνδυασμό αντιστάσεων (R), πηνίων (L) και πυκνωτών (C). Αυτά τα φίλτρα ονομάζονται παθητικά διότι δεν εξαρτώνται από μία εξωτερική πηγή τροφοδοσίας και δεν περιέχουν ενεργά στοιχεία όπως τρανζίστορ. Τα πηνία εμποδίζουν τις υψηλές συχνότητες σήματος και αφήνουν τις χαμηλές, ενώ οι πυκνωτές κάνουν το ακριβώς αντίθετο.



RC χαμηλοπερατό φίλτρο



RLC χαμηλοπερατό φίλτρο  
(τοπολογία Π)



RLC υψιπερατό φίλτρο  
(τοπολογία Τ)

Σχήμα 49. Τύποι φίλτρων [38]

### 5.3 Ενεργά φίλτρα

Τα ενεργά φίλτρα υλοποιούνται χρησιμοποιώντας τον συνδυασμό ενεργών (ενισχυτικών) και παθητικών στοιχείων και απαιτούν εξωτερική πηγή τροφοδοσίας. Συνήθως χρησιμοποιούνται τελεστικοί ενισχυτές μιας και μπορούν να έχουν μεγάλο παράγοντα  $Q$  ενώ μπορούν να πετύχουν συντονισμό χωρίς την ύπαρξη πηνίων. Παρόλαυτα η άνω οριακή συχνότητα τους περιορίζεται από το εύρος του ενισχυτή. [38]

### 5.4 Τοπολογίες και τεχνολογίες φίλτρων

Τα παθητικά στοιχεία που μπορούν να συμβάλλουν στην επιλεκτικότητα είναι οι επαγωγείς  $L$  και οι πυκνωτές  $C$ , των οποίων οι σχέσεις ρεύματος - τάσεως εξαρτώνται από την συχνότητα. Οι αντιστάτες απλά καταναλώνουν ισχύ και η ιδιότητά τους αυτή είναι ανεξάρτητη από την συχνότητα. Η παρουσία τους λοιπόν στα φίλτρα δεν συμβάλλει στην επιλεκτικότητα, αντίθετα την μειώνει (μειώνοντας τους συντελεστές ποιότητας των συντονισμών) και εισάγει ανεξάρτητη από την συχνότητα εξασθένηση, η οποία είναι ανωφελής και ανεπιθύμητη.

Αυτός είναι ο λόγος που στα παθητικά φίλτρα χρησιμοποιούνται κυρίως κυκλώματα  $LC$  χωρίς αντιστάτες. Τα κυκλώματα  $LC$  εξάλλου:

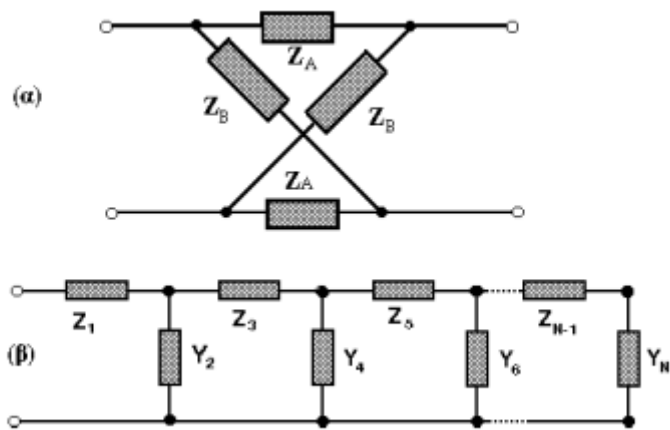
α) Μπορούν και πραγματοποιούν όλες τις προδιαγραφές, όσο αυστηρές και αν είναι.

β) έχουν τις περισσότερες φορές ελάχιστο αριθμό στοιχείων, και

γ) μπορούν να σχεδιάζονται έτσι που σε ορισμένες συχνότητες της ζώνης διέλευσης να προσαρμόζουν την αντίσταση εισόδου τους στην πηγή μεταδίδοντας την μέγιστη ισχύ της πηγής στο φορτίο. Η τρίτη αυτή δυνατότητα είναι κυρίως αυτή που συμβάλλει στην μικρή ευαισθησία των κυκλωμάτων  $LC$  για αποκλίσεις των τιμών των στοιχείων από τις ονομαστικές, πράγμα που είναι ιδιαίτερα επιθυμητό ιδίως σε φίλτρα υψηλής ακρίβειας και μεγάλης επιλεκτικότητας. Στη σχεδίαση παθητικών φίλτρων χρησιμοποιούνται δύο κυρίως τοπολογίες κυκλωμάτων  $LC$  χρησιμοποιούνται για φίλτρα: τα κλιμακωτά ή βαθμωτά (ladder) και τα δικτυωτά (lattice). Το σχήμα 50 δείχνει τις δύο αυτές τοπολογίες. Το δικτυωτό κύκλωμα  $LC$  του σχήματος 50α, με κατάλληλο κάθε φορά υπολογισμό των  $Z_A$  και  $Z_B$ ,

αποδεικνύεται ότι μπορεί και ικανοποιεί οποιοσδήποτε προδιαγραφές και επομένως είναι κατάλληλο για φίλτρο. Η χρησιμότητά του όμως περιορίζεται σημαντικά γιατί παρουσιάζει έναντι των κλιμακωτών κυκλωμάτων μόνον μειονεκτήματα. Το πρώτο του μειονέκτημα είναι ότι χρειάζεται μεγάλο αριθμό στοιχείων (διπλάσιο από τον θεωρητικά αναμενόμενο) για να πραγματοποιήσει δεδομένες προδιαγραφές. Το δεύτερο μειονέκτημά είναι η μεγάλη του ευαισθησία στη ζώνη αποκοπής που οφείλεται στο γεγονός ότι για την ύπαρξη πόλου εξασθένησης ( $G(\omega)=0$  ή  $a(\omega)=4$ ) απαιτείται μια ισορροπία γέφυρας με  $Z_A \cdot Z_B$

Στα δικτυωτά τέλος κυκλώματα πρέπει σε όλες τις συχνότητες οι δύο κλάδοι τύπου  $Z_A$  να είναι απόλυτα ίδιοι πράγμα που απαιτεί μεγάλο αριθμό στοιχείων υψηλής ακρίβειας. Το ίδιο φυσικά ισχύει και για τους κλάδους  $Z_B$ . Το γεγονός αυτό δεν ανεβάζει μόνο το κόστος αλλά ταυτόχρονα δημιουργεί τεράστιες δυσκολίες στην ρύθμιση (tuning). Τα μειονεκτήματα αυτά περιορίζουν την χρησιμότητα των δικτυωτών φίλτρων  $LC$  σε χρήση μεταθέτη φάσεως και στα ηλεκτρομηχανικά φίλτρα γιατί έχουν την εγγενή δυνατότητα αξιοποίησης των ιδιοτήτων των ηλεκτρομηχανικών συντονιστών.



Σχήμα 50. Δικτυωτή και κλιμακωτή διάταξη φίλτρων [38]

Το κλιμακωτό LC κύκλωμα του σχήματος 46β μπορεί και αυτό να πραγματοποιεί οποιοσδήποτε προδιαγραφές με ελάχιστο μάλιστα αριθμόστοιχείων χωρίς τα μειονεκτήματα των δικτυωτών κυκλωμάτων. Αυτός ίσως να είναι ο λόγος που σήμερα τα κλιμακωτά κυκλώματα χρησιμοποιούνται σχεδόν κατ' αποκλειστικότητα στη σχεδίαση παθητικών φίλτρων. Όλοι οι κλάδοι  $Z$  και  $Y$  του κλιμακωτού κυκλώματος αποτελούνται από στοιχεία  $L$  και  $C$  σε διάφορους συνδυασμούς που επιβάλλει η μέθοδος προσέγγισης και σύνθεσης. Τα κλιμακωτά κυκλώματα προσφέρουν εξάλλου την ελάχιστη ευαισθησία στη ζώνη διέλευσης. Στην ζώνη αποκοπής, αν υπάρχει πόλος εξασθένησης, αυτός θα οφείλεται είτε στον απειρισμό της αντίστασης κάποιου κλάδου σειράς  $Z$  ή στον μηδενισμό της αγωγιμότητας κάποιου παράλληλου κλάδου  $Y$ . Αυτό, σε αντίθεση με τα δικτυωτά κυκλώματα, διευκολύνει την διαδικασία της τελικής ρύθμισης (tuning). Αναφερόμενοι τέλος στον αριθμό των στοιχείων  $L$  και  $C$  που απαιτούνται για να σχεδιαστεί ένα κλιμακωτό φίλτρο, είναι στις περισσότερες φορές ίσος ή πολύ κοντά στον θεωρητικά αναμενόμενοελάχιστο αριθμό, πράγμα που δίνει στα κλιμακωτά κυκλώματα ένα ακόμα πλεονέκτημα έναντι των δικτυωτών. Η λειτουργία του φίλτρου, δηλ. η επιλεκτικότητα στο πεδίο των συχνοτήτων που εκφράζει η σχετική συνάρτηση μεταφοράς ή εξασθένησης, μπορεί να υλοποιηθεί με διάφορες τεχνολογίες. Υπάρχουν για παράδειγμα, εκτός από τα παθητικά φίλτρα LC, ηλεκτρομηχανικά, κρυσταλλικά, μικροκυματικά φίλτρα, που είναι και αυτά παθητικά. Επιπλέον υπάρχουν τα ενεργά φίλτρα, RC ή διακοπτόμενοι πυκνωτή, καθώς και τα ψηφιακά φίλτρα, που είναι στην ουσία υλοποιήσεις αλγορίθμων φίλτρου με ειδικευμένο hardware ή/και software.

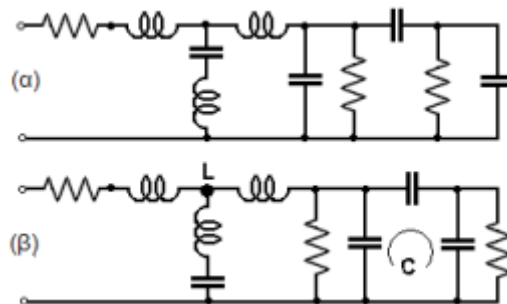
Κάθε κατηγορία αναφέρεται στην τεχνολογία των εξαρτημάτων με τα οποία υλοποιείται η συνάρτηση μεταφοράς ή εξασθένησης. Η επιλογή της τεχνολογίας εξαρτάται κυρίως από τις συχνότητες λειτουργίας του φίλτρου και το περιβάλλον στο οποίο πρόκειται να λειτουργήσει το κύκλωμα. Για παράδειγμα, σε πολύ υψηλές συχνότητες χρησιμοποιούνται κρυσταλλικά φίλτρα ενώ μέχρι τα 100KHz η επιλογή ανάμεσα σε παθητικά και ενεργά κυκλώματα γίνεται κυρίως με κριτήριο το αν το φίλτρο πρόκειται να ολοκληρωθεί, οπότε αποκλείονται τα φίλτρα LC, αφού το πηνίο δεν ολοκληρώνεται. Στην περίπτωση που δεν ενδιαφέρει

η ολοκλήρωση, η επιλογή μεταξύ ενεργού και παθητικού μπορεί να καθοριστεί από την διαθεσιμότητα ή μη τροφοδοσίας DC, η οποία απαιτείται από τα ενεργά κυκλώματα. Καθοριστικός επίσης παράγων στην επιλογή της τεχνολογίας είναι το αν το σήμα που πρόκειται να φιλτραριστεί είναι συνεχούς ή διακριτού χρόνου. Είναι π.χ. αυτονόητο ότι τα ψηφιακά σήματα φιλτράρονται με ψηφιακά φίλτρα. Εκτός όμως από την συχνότητα λειτουργίας και το περιβάλλον, το κόστος παίζει

σημαντικό ρόλο σε περιοχές συχνοτήτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές τεχνολογίες υλοποίησης.

## 5.5 Τάξη κυκλώματος

Η **τάξη** ενός γραμμικού κυκλώματος είναι η τάξη της διαφορικής εξίσωσης που το περιγράφει και ταυτίζεται με τον μεγαλύτερο εκθέτη του  $s$ , που εμφανίζεται στις συναρτήσεις του. Συνήθως αναφερόμαστε στη συνάρτηση μεταφοράς ή την οδηγούσα συνάρτηση αντίστασης εισόδου. Ο ορισμός της τάξης ενός κυκλώματος απαιτεί την κατάστρωση της σχετικής διαφορικής εξίσωσης ή ισοδύναμο τον υπολογισμό κάποιας συνάρτησής του. Η τάξη όμως ενός κυκλώματος LC μπορεί να υπολογιστεί και από την τοπολογία του με επισκόπηση και έχει άμεση σχέση με τον αριθμό των στοιχείων αποθήκευσης ενέργειας, δηλ. τον συνολικό αριθμό των πηνίων και των πυκνωτών. Η τάξη ενός παθητικού κυκλώματος αποτελεί και μέτρο της πολυπλοκότητάς του. Όσο πιά μεγαλύτερης τάξης είναι ένα κύκλωμα, τόσο περισσότερα στοιχεία αποθήκευσης ενέργειας (πηνία και πυκνωτές) θα έχει. Για να υπολογίσουμε την τάξη ενός κυκλώματος LC από την τοπολογία του, πρώτα συνθέτουμε τυχόν πηνία που είναι στη σειρά ή παράλληλα και αποτελούν ένα στοιχείο. Το ίδιο κάνουμε και με τους πυκνωτές. Στη συνέχεια ψάχνουμε να δούμε αν υπάρχουν **κόμβοι-L**, δηλ. κόμβοι στους οποίους συνδέονται μόνον πηνία. Αναζητούμε επίσης τυχόν **βρόχους-C**, δηλ βρόχους που αποτελούνται μόνον από πυκνωτές. Τελικά, η τάξη του κυκλώματος είναι το άθροισμα του αριθμού των πηνίων και του αριθμού των πυκνωτών, μειωμένο κατά τον αριθμό των κόμβων-L και τον αριθμό των βρόχων-C. Στο κύκλωμα του σχήματος 51α, δεν υπάρχει εμφανής κόμβος πηνίων ούτε βρόχος πυκνωτών. Με μερικές όμως αυτονόητες μετατοπίσεις στοιχείων που δεν αλλάζουν το κύκλωμα, παίρνουμε το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 51β.



Σχήμα 51. Ισοδύναμα κυκλώματα πυκνωτών – πηνίων [38]

Στο κύκλωμα αυτό έχουμε 3 πηνία, 4 πυκνωτές, 1 κόμβο L και έναν βρόχο C. Επομένως, σύμφωνα με τα παραπάνω, η τάξη του κυκλώματος θα είναι:  $n = 3 + 4 - 1 - 1 = 5$ .

## 5.6 Ευαισθησία

Ένα κύκλωμα, το οποίο κάνει μια συγκεκριμένη λειτουργία περιγραφόμενη π.χ. από την συνάρτηση μεταφοράς του, θα πρέπει να εξακολουθεί να συμπεριφέρεται καλά ακόμα και όταν η τιμή ενός ή περισσότερων εξαρτημάτων αποκλίνει, για διάφορους λόγους, από την ονομαστική. Οι τιμές των εξαρτημάτων μπορεί να αποκλίνουν από τις ονομαστικές για μια σειρά από λόγους, όπως για παράδειγμα λόγω γήρανσης (aging) μεταβολής της θερμοκρασίας κ.λπ. Η απόκλιση όμως μπορεί να οφείλεται και στην μέθοδο κατασκευής του κυκλώματος. Είναι γνωστό ότι η μικροηλεκτρονική πραγματοποίηση αντιστάσεων και πυκνωτών δεν είναι πολύ ακριβής και ακόμη ότι η ακριβής ρύθμισή τους έχει μεγάλο κόστος. Στην κατασκευή ενός κυκλώματος με διακριτά στοιχεία, πολλές φορές βρισκόμαστε στην ανάγκη να χρησιμοποιήσουμε προσεγγιστικές τιμές π.χ. για μια αντίσταση. Αν δηλ. οι υπολογισμοί μας δώσουν αντίσταση  $4750\Omega$ , θα χρησιμοποιήσουμε την τυποποιημένη τιμή

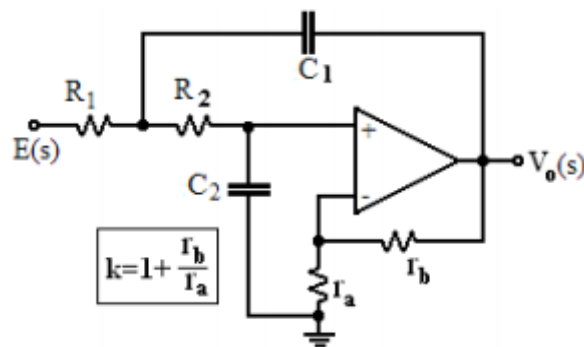
4700Ω, βασιζόμενοι στο γεγονός ότι το κύκλωμα δεν είναι τόσο ευαίσθητο ώστε να αλλάξει τραγικά η συμπεριφορά του από την προσέγγιση αυτή. Θέλουμε επομένως τα σχεδιαζόμενα κυκλώματα να μην είναι ευαίσθητα στις αποκλίσεις από την ονομαστική τιμή. Η ευαισθησία είναι ένα προβλέψιμο, προϋπολογιζόμενο και μετρήσιμο μέγεθος και αποτελεί πολλές φορές βασική παράμετρο σχεδίασης των φίλτρων και κριτήριο αξιολόγησης εναλλακτικών κυκλωμάτων, που πραγματοποιούν την ίδια συνάρτηση κυκλώματος. Όπως γνωρίζουμε, η διαδικασία της σύνθεσης και σχεδίασης, οδηγεί σε πολλαπλές λύσεις και πολλές φορές επιλέγουμε ως "καλύτερη" αυτή που οδηγεί σε χαμηλότερες ευαισθησίες.

## 5.7 Κυκλώματα Sallen-Key

Οι R.P. Sallen και E.L Key του MIT, στην εργασία τους "A practical method of designing RC active filters" (IRE Trans Circuit Theory, vol.CT-2, pp.74-85, March 1955) πρότειναν κάποια κυκλώματα με έναν τελεστικό ενισχυτή σε διάταξη μη αντιστρεπτικού ενισχυτή τάσης, για την υλοποίηση συναρτήσεων 2ης τάξης. Κυκλώματα 2ης τάξης με έναν ΤΕ αναφέρονται συχνά ως SAB (Single Amplifier Biquads).

### 5.7.1 Βαθυπερατό Φίλτρο 2ης τάξης Sallen and Key

Το κύκλωμα του σχήματος 52 με έναν τελεστικό ενισχυτή υλοποιεί ΒΠ συνάρτηση 2<sup>ης</sup> τάξης.



Σχήμα 52. Βαθυπερατό φίλτρο με τελεστικό ενισχυτή [38]

Η συνάρτηση μεταφοράς του ΒΠ αυτού κυκλώματος υπολογίζεται ότι είναι:

$$H(s) = \frac{V_0(s)}{E(s)} = \frac{k}{s^2 \left( \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1+k}{R_2 C_2} \right) + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (5.6)$$

όπου το k είναι πάντοτε μεγαλύτερο από την μονάδα.

Οι αντιστάτες  $r_A$  και  $r_B$  ρυθμίζουν την αρνητική ανατροφοδότηση και παίζουν καθοριστικό ρόλο στο Q του κυκλώματος, ενώ δεν επηρεάζουν καθόλου την συχνότητα του πόλου τις φαίνεται από τις παρακάτω σχέσεις που δίνουν τις ποσότητες αυτές:

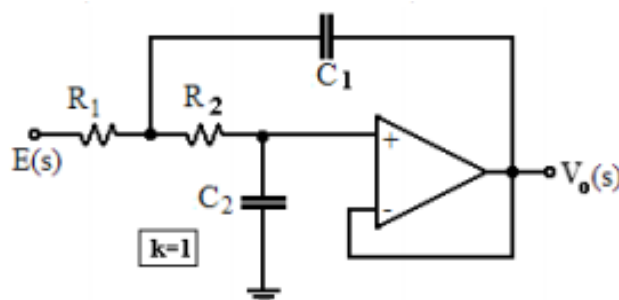
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad Q = \frac{\sqrt{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}}{\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1+k}{R_2 C_2}} \quad (5.7)$$

Όταν πρόκειται το κύκλωμα αυτό να πραγματοποιήσει μια δεδομένη συνάρτηση μεταφοράς, τότε είναι δεδομένα το  $\omega_0$  και το  $Q$ , οπότε θα πρέπει να προσδιορίσουμε τις τιμές των στοιχείων του κυκλώματος ώστε να δίνουν τα μεγέθη αυτά. Τα προς προσδιορισμό στοιχεία είναι 5 (δύο αντιστάσεις, δύο πυκνωτές και το  $k$  της αρνητικής ανατροφοδότησης), ενώ έχουμε μόνον τον περιορισμό του συγκεκριμένου  $\omega_0$  και του  $Q$ . Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι μπορούμε να ορίσουμε αυθαίρετα μερικά στοιχεία και να υπολογίσουμε τα υπόλοιπα. Για το κύκλωμα Sallen and Key υπάρχουν τρεις καθιερωμένοι τρόποι υπολογισμού των στοιχείων για δεδομένο  $\omega_0$  και  $Q$ , που παρουσιάζονται παρακάτω.

**Σχεδίαση I** (Μοναδιαίου κέρδους και ίσων αντιστάσεων) Επιλέγουμε  $k=1$  (δηλ.  $r_B=0$ ) και  $R_1=R_2=R$  οπότε έχουμε:

$$\omega_0 = \frac{1}{R\sqrt{C_1 C_2}} \quad \text{και} \quad Q = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{C_1}{C_2}} \quad (5.8)$$

απ' όπου υπολογίζεται ότι  $C_1 = \frac{2Q\omega_0}{R}$  και  $C_2 = \frac{1}{2\omega_0 RQ}$



Σχήμα 53. Βαθυπερατό φίλτρο μοναδιαίου κέρδους  $R_1=R_2$  [39]

Η συγκεκριμένη υλοποίηση με κέρδος μονάδα, επιλέχτηκε στην εργασία σαν φίλτρο εξομάλυνσης της εξόδου του PLL λόγω της μεγάλης ακρίβειας κέρδους του, η οποία δεν εξαρτάται από τις τιμές των εξαρτημάτων παρουσιάζοντας σχεδόν επίπεδη απόκριση. Επίσης στην έξοδο αυτού του φίλτρου τοποθετήθηκε ένα ακόμα παθητικό χαμηλοπερατό antialiasing φίλτρο αποτελούμενο από μία αντίσταση και έναν πυκνωτή για μεγαλύτερη αποκοπή του θορύβου και σταθεροποίηση της τάσης εξόδου μιας και η παραμικρή παραμόρφωση της τάσης εξόδου μπορούσε να οδηγήσει σε ανακρίβεια αποτελεσμάτων. [39]

## Κεφάλαιο 6ο : Ψηφιακή απεικόνιση και επεξεργασία

### 6.1 Arduino

Το Arduino είναι ένας μικροελεγκτής μονής πλακέτας, δηλαδή μια απλή μητρική πλακέτα ανοικτού κώδικα με ενσωματωμένο μικροελεγκτή και εισόδους/εξόδους, η οποία μπορεί να προγραμματιστεί με τη γλώσσα Wiring (ουσιαστικά πρόκειται για τη γλώσσα προγραμματισμού C++ και ένα σύνολο από βιβλιοθήκες, υλοποιημένες επίσης στην C++ ). Το Arduino μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη ανεξάρτητων διαδραστικών αντικειμένων αλλά και να συνδεθεί με υπολογιστή μέσω προγραμμάτων σε Processing, Max/MSP, Pure Data, SuperCollider. Οι περισσότερες εκδόσεις του Arduino μπορούν να αγοραστούν προσυναρμολογημένες· το διάγραμμα και πληροφορίες για το υλικό είναι ελεύθερα διαθέσιμα για αυτούς που θέλουν να συναρμολογήσουν το Arduino μόνοι τους. Το πρόγραμμα Arduino έλαβε τιμητική μνεία στην κατηγορία Digital Communities στο Prix Ars Electronica το 2006.



Σχήμα 54 Arduino Uno [41]

### 6.2 Ιστορικά

Το 2005 ένα σχέδιο ξεκίνησε η παραγωγή μίας συσκευής για τον έλεγχο προγραμμάτων ή διαδραστικών σχεδίων από μαθητές, η οποία θα ήταν πιο φθηνή από άλλα διαθέσιμα πρωτότυπα συστήματα εκείνη την περίοδο. Οι ιδρυτές Massimo Banzi και David Cueartielles ονόμασαν το σχέδιο από τον Arduino της Ivrea και ξεκίνησαν να παράγουν πλακέτες σε ένα μικρό εργοστάσιο στην Ιβρέα, κομόπολη της επαρχίας Τορίνο στην περιοχή Πεδεμόντιο της βορειοδυτικής Ιταλίας - την ίδια περιοχή στην οποία στεγαζόταν η εταιρία υπολογιστών Olivetti.



Σχήμα 55. Λογότυπο Arduino [41]

Το Arduino είναι μία εξέλιξη της πλατφόρμας Wiring για λογισμικό ανοικτού κώδικα και προγραμματίζεται χρησιμοποιώντας μια γλώσσα βασισμένη στο Wiring (σύνταξη και βιβλιοθήκες), παρόμοια με την C++ με απλοποιήσεις και αλλαγές, καθώς και ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (IDE).

### 6.3 Υλικό (Hardware)

Μία πλακέτα Arduino αποτελείται από ένα μικροελεγκτή Atmel AVR (ATmega328 και ATmega168 στις νεότερες εκδόσεις, ATmega8 στις παλαιότερες) και συμπληρωματικά εξαρτήματα για την διευκόλυνση του χρήστη στον προγραμματισμό και την ενσωμάτωσή του σε άλλα κυκλώματα. Όλες οι πλακέτες περιλαμβάνουν ένα γραμμικό ρυθμιστή τάσης 5V και έναν κρυσταλλικό ταλαντωτή 16MHz. Ο μικροελεγκτής είναι από κατασκευής προγραμματισμένος με ένα bootloader, έτσι ώστε να μην χρειάζεται εξωτερικός προγραμματιστής. Σε εννοιολογικό επίπεδο, στην χρήση του Arduino software stack, όλα τα boards προγραμματίζονται με μία RS-232 σειριακή σύνδεση, αλλά ο τρόπος που επιτυγχάνεται αυτό διαφέρει σε κάθε hardware εκδοχή. Οι σειριακές πλάκες Arduino περιέχουν ένα απλό level shifter κύκλωμα για την μετατροπή του σήματος επιπέδου RS-232 σε TTL. Τα σημερινά Arduino προγραμματίζονται μέσω USB· αυτό καθίσταται δυνατό μέσω της εφαρμογής προσαρμογέων chip USB-to-Serial όπως το FTDI FT232. Κάποιες παραλλαγές, όπως το Arduino mini και το ανεπίσημο Boarduino, χρησιμοποιούν ένα αφαιρούμενο USB-to-Serial καλώδιο ή board, Bluetooth ή άλλες μεθόδους. (Όταν χρησιμοποιείται με παραδοσιακά εργαλεία microcontroller αντί για το Arduino IDE, χρησιμοποιείται πρότυπος προγραμματισμός AVR ISP). Ο πίνακας Arduino εκθέτει τα περισσότερα microcontroller I/O pins για χρήση από άλλα κυκλώματα. Τα Diecimila, Duemilanove και το τρέχον Uno παρέχουν 14 ψηφιακά I/O pins, έξι από τα οποία μπορούν να παράγουν pulse-width διαμορφωμένα σήματα, και έξι αναλογικά δεδομένα. Αυτά τα pins βρίσκονται στην κορυφή του πίνακα μέσω female headers 0.1 ιντσών (2,2mm). Διάφορες εφαρμογές ασπίδων plug-in είναι εμπορικά διαθέσιμες. Το Arduino nano και το ArduinoCompatible Bare Bones Board και Boarduino Board ενδέχεται να παρέχουν male header pins στο κάτω μέρος του board προκειμένου να συνδέονται σε Breadboards. Υπάρχουν πολλά boards συμβατά με και προερχόμενα από Arduino boards. Κάποια είναι λειτουργικά ισάξια με ένα Arduino και μπορεί να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά. Πολλοί είναι το βασικό Arduino με την προσθήκη καινοτόμων output drivers, συχνά για την χρήση σχολικής μόρφωσης για να απλοποιήσουν την κατασκευή buggies και μικρών robot. Άλλες είναι ηλεκτρικά ισάξια αλλά αλλάζουν τον παράγοντα μορφής, επιτρέποντας κάποιες φορές την συνεχόμενη χρήση των Shields ενώ κάποιες όχι. Κάποιες παραλλαγές είναι τελείως διαφορετικοί επεξεργαστές, με ποικίλα επίπεδα συμβατότητας.



Σχήμα 56. Arduino Uno [41]

## 6.4 Λογισμικό (Software)

Το ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (IDE) του Arduino είναι μία εφαρμογή γραμμένη σε Java, που λειτουργεί σε πολλές πλατφόρμες και προέρχεται από το IDE για τη γλώσσα προγραμματισμού Processing και το σχέδιο Wiring. Έχει σχεδιαστεί για να εισαγάγει στον προγραμματισμό τους καλλιτέχνες και τους νέους που δεν είναι εξοικειωμένοι με την ανάπτυξη λογισμικού. Περιλαμβάνει ένα πρόγραμμα επεξεργασίας κώδικα με χαρακτηριστικά όπως είναι η επισήμανση σύνταξης και ο συνδυασμός αγκύλων και είναι επίσης σε θέση να μεταγλωττίζει και να φορτώνει προγράμματα στην πλακέτα με ένα μόνο κλικ. Δεν υπάρχει συνήθως καμία ανάγκη να επεξεργαστείτε αρχεία make ή να τρέξετε προγράμματα σε ένα περιβάλλον γραμμής εντολών. Ένα πρόγραμμα ή κώδικας που γράφτηκε για Arduino ονομάζεται σκίτσο (sketch). Τα Arduino προγράμματα είναι γραμμένα σε C ή C++. Το Arduino IDE έρχεται με μια βιβλιοθήκη λογισμικού που ονομάζεται "Wiring", από το πρωτότυπο σχέδιο Wiring, γεγονός που καθιστά πολλές κοινές λειτουργίες εισόδου/εξόδου πολύ πιο εύκολες. Οι χρήστες πρέπει μόνο να ορίσουν δύο λειτουργίες για να κάνουν ένα πρόγραμμα κυκλικής εκτέλεσης:

-setup():μία συνάρτηση που τρέχει μία φορά στην αρχή του προγράμματος η οποία αρχικοποιεί τις ρυθμίσεις

-loop():μία συνάρτηση που καλείται συνέχεια μέχρι η πλακέτα να απενεργοποιηθεί. [41]

## Κεφάλαιο 7ο: Μεθοδολογία

### 7.1 Εισαγωγή

Ο αισθητήρας που κατασκευάστηκε είναι ένα μέρος ταλαντωτή Colpits ο οποίος θα έχει κεντρική συχνότητα κοντά στα 80 MHz. Ανάλογα με το πόσο υποβαθμισμένη θα είναι η ποιότητα του λαδιού, δηλαδή του διηλεκτρικού μέσου που έρχεται σε επαφή με τον αισθητήρα, η χωρητικότητα του θα αλλάζει αναγκάζοντας τον ταλαντωτή να αλλάξει την συχνότητά του. Οπότε οι αλλαγές στην ποιότητα του λαδιού μετατρέπονται σε αλλαγές στην συχνότητα του ταλαντωτή. Έπειτα με μία διάταξη PLL θα μετατρέπεται η κάθε συχνότητα σε μία συνεχή τάση. Επειδή η μιγαδική διαπερατότητα ενός υλικού εξαρτάται άμεσα από την θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται, θα πραγματοποιηθεί ένα ακόμα κύκλωμα μέτρησης θερμοκρασίας του υπό εξέταση μέσου, το οποίο θα εισάγει στο τελικό αποτέλεσμα μια αντιστάθμιση, ανάλογα με την θερμοκρασία του.

Η μεθοδολογία της ανάπτυξης του αισθητήρα περιλαμβάνει την κατασκευή του κυκλώματος μέτρησης και απεικόνισης (αισθητήρας, PLL, φίλτρο, κύκλωμα επεξεργασίας σήματος, μικροεπεξεργαστής, απεικόνιση αποτελεσμάτων), τη συλλογή των αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις καθώς και τα συμπεράσματα. Επίσης μαζί με τα αποτελέσματα-συμπεράσματα παρουσιάζεται και ο αλγόριθμος μετατροπής των μεταβολών χωρητικότητας του αισθητηρίου σε μεταβολές ηλεκτρικής διαπερατότητας του ελαίου.

### 7.2 Χρονοδιάγραμμα εξέλιξης της πειραματικής εργασίας

Το χρονοδιάγραμμα προόδου που ακολουθήθηκε για την ολοκλήρωση της εργασίας περιλάμβανε τα εξής στάδια:

Στην 1η φάση της εργασίας έγινε συλλογή άρθρων από διεθνή επιστημονικά περιοδικά και μονογραφίες σχετικών με το αντικείμενο της εργασίας αυτής και ακολούθησε λεπτομερής επισκόπηση και μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας σε ότι αφορά την κατασκευή αισθητήρων, παρόμοιας λειτουργικότητας και εφαρμογών.

Στην 2η φάση της εργασίας έγινε συλλογή των απαραίτητων υλικών και εξαρτημάτων για την κατασκευή του κυκλώματος-διάταξης.

Στην 3η φάση της εργασίας έγινε κατασκευή του αισθητήρα

Στην 4η φάση της εργασίας έγινε Βαθμονόμηση και διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων.

Στην 5η φάση της εργασίας έγινε επεξεργασία των αποτελεσμάτων

Στην 6η φάση της εργασίας έγινε επίλυση προβλημάτων κατασκευής και προγραμματισμού

Στην 7η φάση της εργασίας έγιναν οι τελικές δοκιμές εφαρμογής.

Στην 8η φάση της εργασίας έγινε η συγγραφή του κειμένου διπλωματικής εργασίας

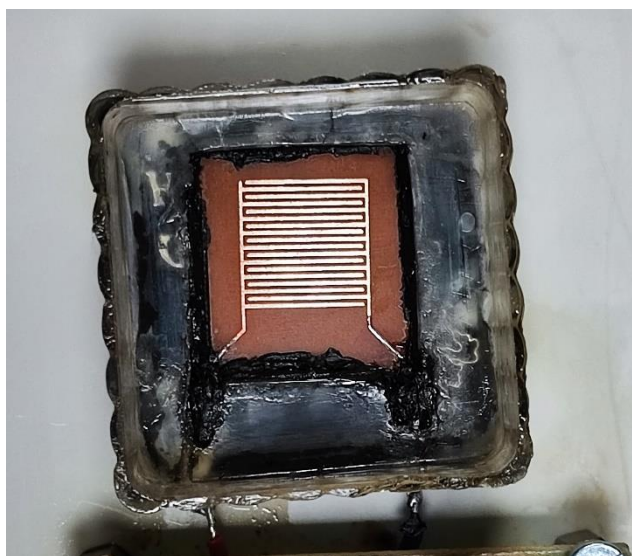
## Κεφάλαιο 8ο: Ανάπτυξη του αισθητήρα

### 8.1 Κατασκευή του επίπεδου πεπλεγμένου αισθητήρα χωρητικότητας

Η υλοποίηση του πεπλεγμένου αισθητήρα χωρητικότητάς πραγματοποιήθηκε από τον κ. Δελιμαρά Βασίλη στα πλαίσια της εκπόνησης της διπλωματικής του εργασίας. Ο αισθητήρας αυτός έχει εύρος χωρητικότητας από 8μF έως και 12μF περίπου.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 57, ο αισθητήρας είναι υλοποιημένος πάνω σε πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (PCB). Αποτελείται από νησίδες χαλκού που χρησιμεύουν ως ηλεκτρόδια οδήγησης. Εκατέρωθεν αυτών βρίσκονται τα ηλεκτρόδια μέτρησης. Μέσω οπών καθένα από τα ηλεκτρόδια οδήγησης συνδέεται με το κύκλωμα οδήγησης. Η σύνδεση των ζευγών ηλεκτροδίων μέτρησης γίνεται στην περίμετρο του αισθητήρα. Πάνω στον αισθητήρα έχει τοποθετηθεί κατάλληλα πλαστικό τοίχωμα ώστε να είναι δυνατή η τοποθέτηση του δείγματος κατάλληλης ποσότητας επάνω στον αισθητήρα

Η κατασκευή του αισθητήρα (Σχήμα 57) που προτείνεται είναι πλήρως συμβατή με την τεχνολογία τυπωμένων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί πάνω σε πολυστρωματικές πλακέτες για χαμηλό κόστος. Επίσης ο αισθητήρας μπορεί εύκολα να κατασκευαστεί σε ποικίλα υποστρώματα ή ακόμη και σε ψηφίδα πυριτίου με χρήση υπάρχουσας τεχνολογίας. Ο αισθητήρας αποτελείται από τρία βασικά επίπεδα επιμετάλλωσης. Το πρώτο ορίζει τη γεωμετρία των ηλεκτροδίων οδήγησης. Το δεύτερο απομονώνει την εμπρός πλευρά το αισθητήρα από την πίσω πλευρά. Τέλος το τρίτο χρησιμεύει για την διασύνδεση μέσω οπών επιμετάλλωσης (vias) με τα ηλεκτρόδια οδήγησης.



Σχήμα 57. Χωρητικός αισθητήρας

## 8.2 Κατασκευή του κυκλώματος

Το κύκλωμα της εργασίας αποτελείται από έναν ταλαντωτή Colpitts, όπου ο πυκνωτής που είναι υπεύθυνος για τον καθορισμό της συχνότητας ταλάντωσης είναι το τυπωμένο αισθητήριο ποιότητας ελαίων, και ένα κύκλωμα με το ολοκληρωμένο TLC2933A. Το παρακάτω κύκλωμα του ταλαντωτή είναι ένα τροποποιημένο κύκλωμα ερασιτεχνικού πομπού FM και συγκεκριμένα το SMART KIT No 1009 της SMART KIT Electronics. Στο αρχικό κύκλωμα αντικαταστάθηκε ο μεταβλητός πυκνωτής CS με το αισθητήριο της εργασίας και απενεργοποιήθηκε η εισαγωγή ακουστικού σήματος (μικρόφωνο) στην είσοδο του ταλαντωτή.

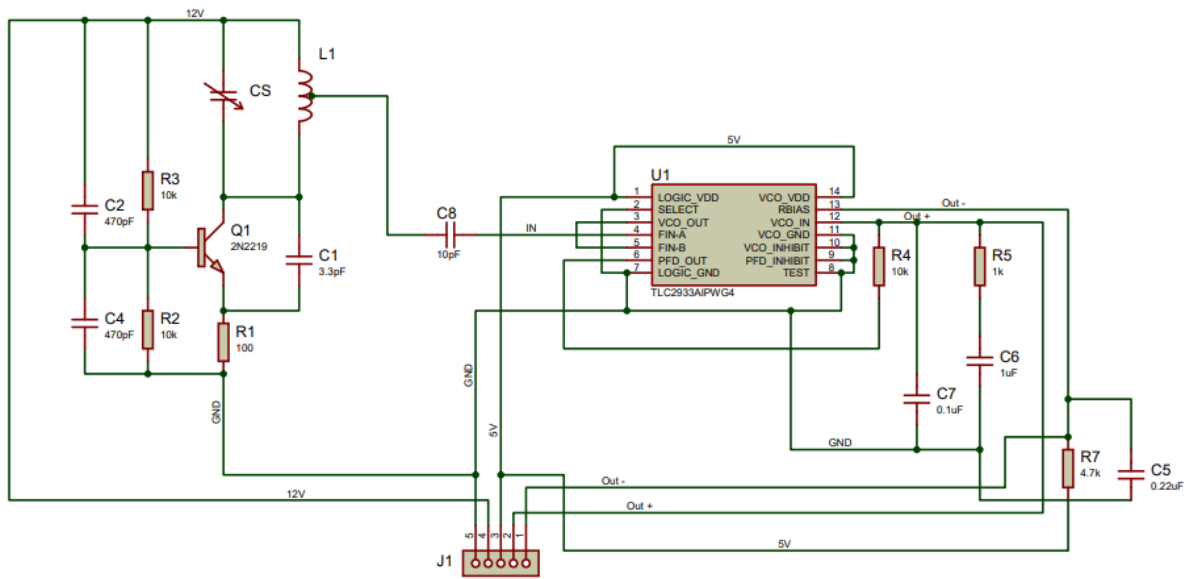
Το κύκλωμα του ταλαντωτή αποτελείται από έναν τροποποιημένο τύπο ταλαντωτή Colpitts, που είναι ιδανικός στην περίπτωση μας αφού έχει αρκετά καλή σταθερότητα συχνότητας χωρίς να χρειάζεται ειδικά εξαρτήματα και κρύσταλλο που θα έκαναν το κύκλωμα πιο σύνθετο αλλά και θα ανέβαζαν το κόστος. Το κύκλωμα συντονισμού περιέχει εκτός του πηνίου L1 που είναι τυπωμένο επάνω στην πλακέτα και τον μεταβλητό πυκνωτή CS (το αισθητήριό μας) και δύο ακόμα εικονικούς πυκνωτές που υλοποιούνται από τις παρασιτικές χωρητικότητες συλλέκτη-βάσης και συλλέκτη - εκπομπού του transistor. Η συχνότητα εκπομπής καθορίζεται από ένα συντονιζόμενο L-C κύκλωμα που το αποτελούν το πηνίο L1 και το αισθητήριο C6 που είναι πρακτικά ένας μεταβαλλόμενος πυκνωτής. Ο πυκνωτής αυτός με χωρητικότητα 8-12 pF καθορίζει την συχνότητα της εκπομπής του κυκλώματος και μπορεί να κυμαίνεται στα όρια 90-98 MHz περίπου. Η θετική ανάδραση για την διατήρηση των ταλαντώσεων επιτυγχάνεται με τον πυκνωτή C1. Οι αντιστάσεις R1, R2 και R3 εξασφαλίζουν τις απαραίτητες πλώσεις και σε συνεργασία με τους πυκνωτές C1, C2 και C4, που αποτελούν τις απαραίτητες αναδράσεις ώστε να εξαναγκαστεί η βαθμίδα να παράγει τις απαραίτητες ταλαντώσεις, συμπληρώνουν την βαθμίδα του ταλαντωτή σε τάξη C.

Το ολοκληρωμένο TLC2933A αποτελείται από έναν ταλαντωτή ελεγχόμενο από τάση (VCO) και έναν edge-triggered ανιχνευτή φάσης (PFD). Το εύρος της συχνότητας της ταλάντωσης του VCO το καθορίζει μια εξωτερική αντίσταση Rbias που στην περίπτωση μας είναι η R9. Η VCO έχει έναν προαιρετικό διαιρέτη συχνότητας  $\frac{1}{2}$ . Ο υψηλής ταχύτητας ανιχνευτής φάσης εντοπίζει την διαφορά φάσης ανάμεσα στην συχνότητα αναφοράς και το σήμα εισόδου.

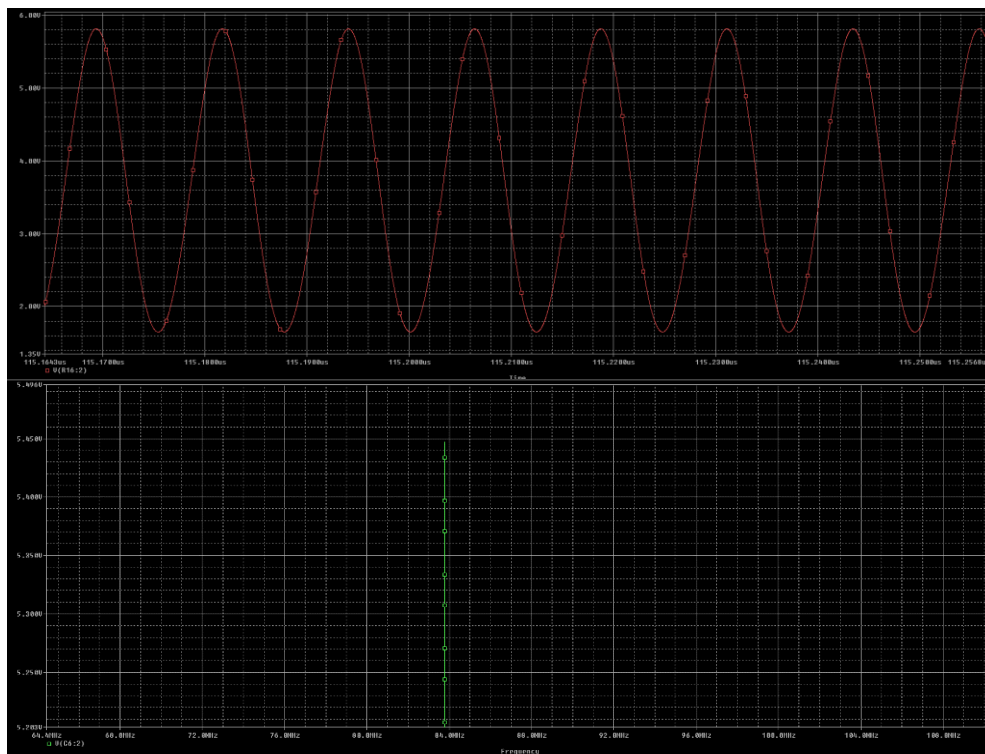
Από την κεραία του ταλαντωτή και μέσω του πυκνωτή C8 10pF για αποκοπή της dc τάσης, η συχνότητα εξόδου του ταλαντωτή εισέρχεται στην είσοδο B' του ανιχνευτή φάσης του TLC2933A. Έπειτα η έξοδος του ανιχνευτή οδηγείται στην είσοδο του VCO, όπου με την σειρά του ο VCO ανατροφοδοτεί την είσοδο A' του ανιχνευτή φάσης. Η έξοδος του ανιχνευτή φιλτράρεται από ένα φίλτρο A' τάξης που αποτελείται από τον πυκνωτή C7 και την αντίσταση R4. Τέλος η έξοδος του κυκλώματος είναι ένα DC σήμα το οποίο διαφοροποιείται ανάλογα με την ποιότητα του ελαίου που θα βρίσκεται στο αισθητήριο CS. Η αντίσταση R7 ρυθμίζει την περιοχή κλειδώματος και συντονισμού του PLL και η τιμή της καθορίζεται από το datasheet του κατασκευαστή ανάλογα με την επιθυμητή συχνότητα λειτουργίας του κυκλώματος.

Στο σχήμα 58 φαίνεται η ψηφιακή υλοποίηση του κυκλώματος στο πρόγραμμα Proteus και στο σχήμα 59 φαίνεται η έξοδος του ταλαντωτή όπως προκύπτει από το πρόγραμμα προσομοίωσης OrCad PSpice. Η έξοδος του κυκλώματος οδηγείται σε πολύμετρο ακριβείας τριών δεκαδικών ψηφίων ενώ παράλληλα επιτηρείται και η συχνότητα του ταλαντωτή με ψηφιακό παλμογράφο.

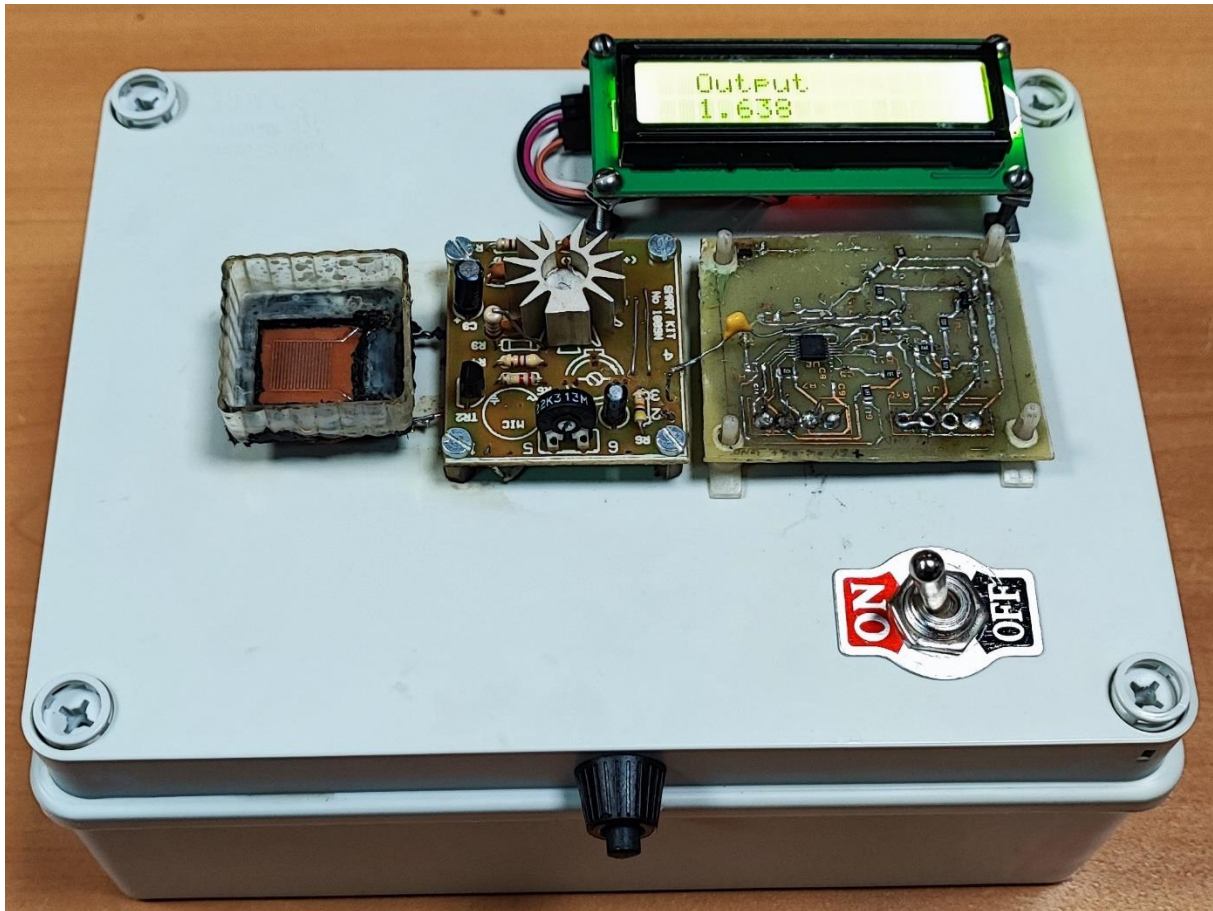
Για την διεπαφή με τον χρήστη έγινε χρήση του ελεγκτή esp32, του οποίου ο προγραμματισμός έγινε στο περιβάλλον Arduino IDE. Η διεπαφή αυτή περιλαμβάνει μία οθόνη υγρών κρυστάλλων LCD 16x2 που απεικονίζει την τελική τάση εξόδου του συστήματος, όπως φαίνεται και στο σχήμα 60. Ο κώδικας με τον οποίο έγινε ο προγραμματισμός του επεξεργαστή βρίσκεται στο παράρτημα 1. Για την ευκολότερη κατανόηση αυτού του συστήματος μέτρησης, παρακάτω παρατίθεται το διάγραμμα ροής (σχήμα 61)



Σχήμα 58. Σχηματικό στο Proteus

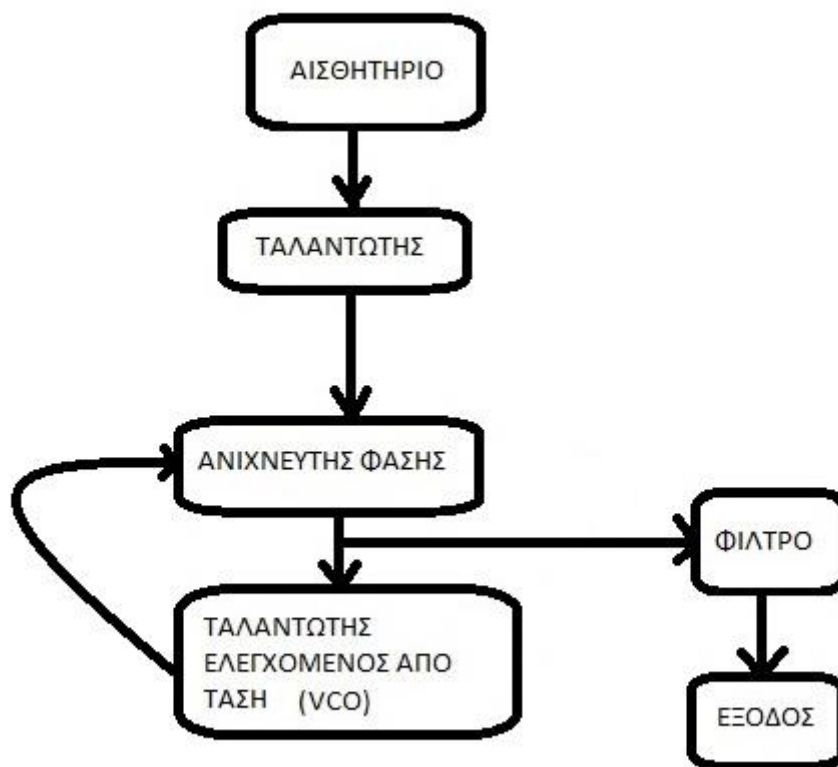


Σχήμα 59. Αποτελέσματα προσομοίωσης ταλαντωτή στο PSpice



Σχήμα 60. Υλοποίηση του κυκλώματος

Η τελική μορφή του συστήματος (σχήμα 60) έχει τοποθετηθεί επάνω σε ένα πλαστικό κουτί για καλύτερη στερέωση και ευκολότερη παρουσίασή του. Εντός του κουτιού υπάρχουν η μπαταρία τροφοδοσίας 12V, το σύστημα μετατροπής από 12V σε 5V, το esp και οι ηλεκτρολογικές συνδέσεις του συστήματος. Επάνω στο κουτί βρίσκεται ο διακόπτης που ελέγχει την τροφοδοσία του συστήματος μέτρησης. Ο γενικός διακόπτης στο πλαϊνό του κουτιού είναι υπεύθυνος για την ενεργοποίηση της τροφοδοσίας των 12V και 5V καθώς και για την ενεργοποίηση του esp και της LCD οθόνης.



Σχήμα 61. Διάγραμμα Ροής

### 8.3 Δοκιμές εφαρμογής του αισθητήρα στη μέτρηση δειγμάτων ελαίων

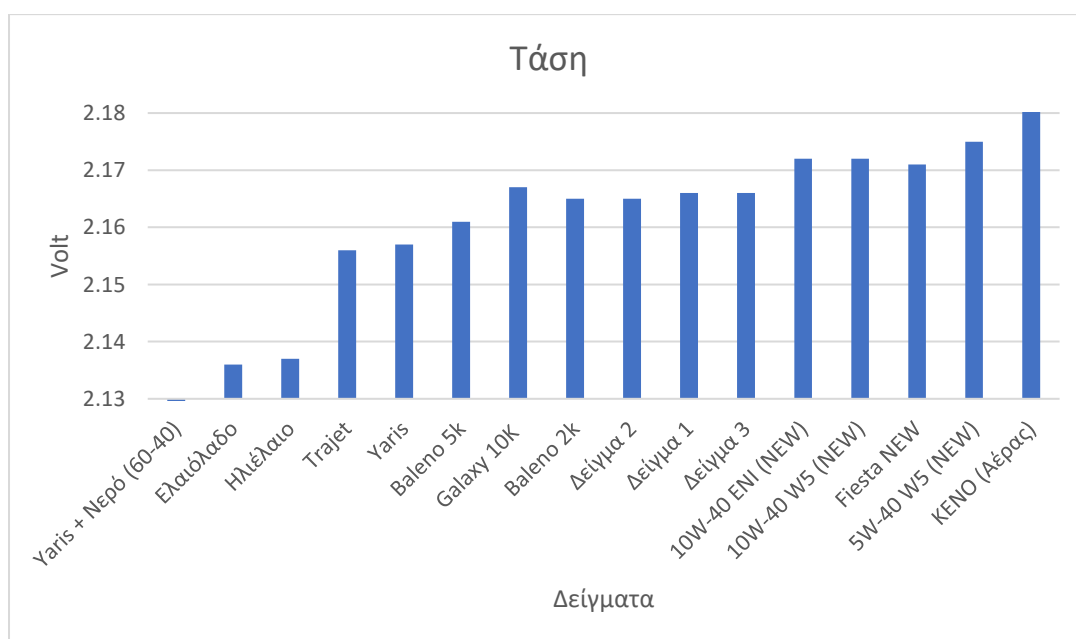
Για την δοκιμή του αισθητήρα δημιουργήθηκαν τρεις ομάδες δειγμάτων, για την εξέταση δύο αιτιών υποβάθμισης των μηχανικών ελαίων και για την αντιστάθμιση της θερμοκρασίας:

- Η πρώτη κατηγορία αποτελείται από λάδια προς αλλαγή, δηλαδή χρησιμοποιημένα λάδια αυτοκινήτου από διάφορους τύπους οχημάτων. Επίσης στην κατηγορία αυτή βρίσκονται και καινούργια λάδια μηχανής διάφορων τύπων με τα οποία θα γίνει προσπάθεια σύγκρισής τους με τα υποβαθμισμένα-μεταχειρισμένα λάδια.
- Η δεύτερη κατηγορία σύγκρισης αποτελείται από ένα δείγμα χρησιμοποιημένου λαδιού στο οποίο έχουν προστεθεί πειραματικά διάφορες ποσότητες αντιψυκτικού αυτοκινήτων. Έτσι γίνεται προσπάθεια να γίνει μια έγκαιρη διάγνωση για διαρροή αντιψυκτικού από την φλάντζα της μηχανής ή για επιμόλυνση του λαδιού από υγρασία.
- Στην τρίτη κατηγορία δειγμάτων υπάρχουν πέντε διαφορετικά δείγματα λαδιών τα οποία εξετάζονται σε τέσσερις διαφορετικές θερμοκρασίες, από 80 έως 20 βαθμοί κελσίου. Έτσι διαπιστώνεται η επίδραση της θερμοκρασίας στην ηλεκτρική διαπερατότητα του δείγματος. Επίσης από τις μετρήσεις αυτές προκύπτει η εξίσωση με την οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί η αντιστάθμιση θερμοκρασίας κατά προσέγγιση.

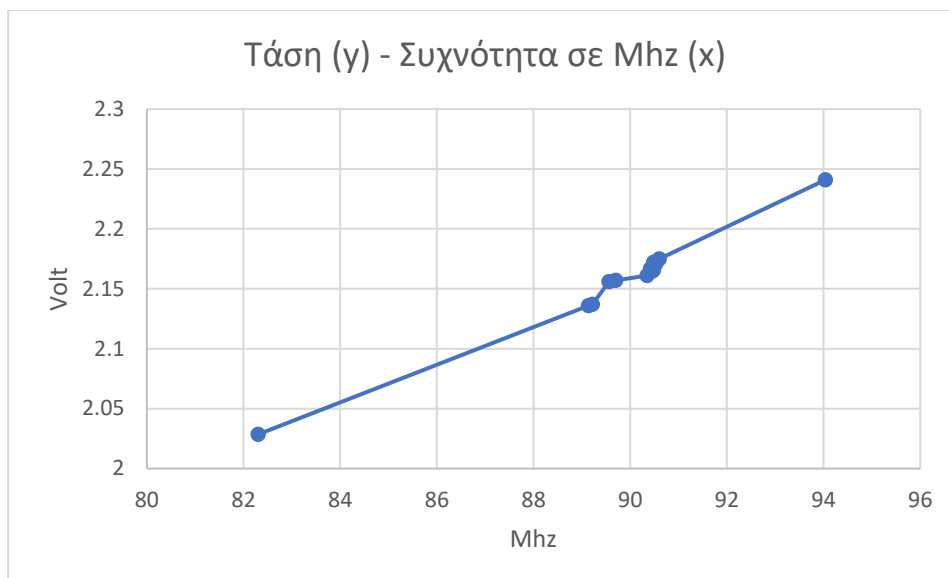
Παρακάτω γίνεται παράθεση των αποτελεσμάτων από την πειραματική διαδικασία. Η ονομασία των δειγμάτων έγινε βάση το μοντέλο του κάθε οχήματος ή και τα χιλιόμετρά του, όπου ήταν αυτό εφικτό, για τα χρησιμοποιημένα λάδια. Για τα καινούργια λάδια, τα ονόματα των δειγμάτων έγιναν βάση το είδος και το εμπορικό όνομα του κάθε λαδιού και έχουν την ένδειξη «new».

Πίνακας 2. Αποτελέσματα ομάδας 1

Δείγματα Λαδιών	Συχνότητα σε MHz	Τάση σε V	Απόκλιση από το κενό (%)
Yaris + Νερό (60-40)	82,3	2,0285	9,48
Ελαιόλαδο	89,14	2,136	4,69
Ηλιέλαιο	89,22	2,137	4,64
Trajjet	89,56	2,156	3,79
Yaris	89,7	2,157	3,75
Baleno 5k	90,35	2,161	3,57
Galaxy 10K	90,42	2,167	3,30
Baleno 2k	90,45	2,165	3,39
Δείγμα 2	90,47	2,165	3,39
Δείγμα 1	90,47	2,166	3,35
Δείγμα 3	90,48	2,166	3,35
10W-40 ENI (NEW)	90,49	2,172	3,08
10W-40 W5 (NEW)	90,49	2,172	3,08
Fiesta NEW	90,53	2,171	3,12
5W-40 W5 (NEW)	90,6	2,175	2,95
KENO (Αέρας)	94,04	2,241	0



Σχήμα 62. Σχηματική αναπαράσταση αποτελεσμάτων πίνακα 1



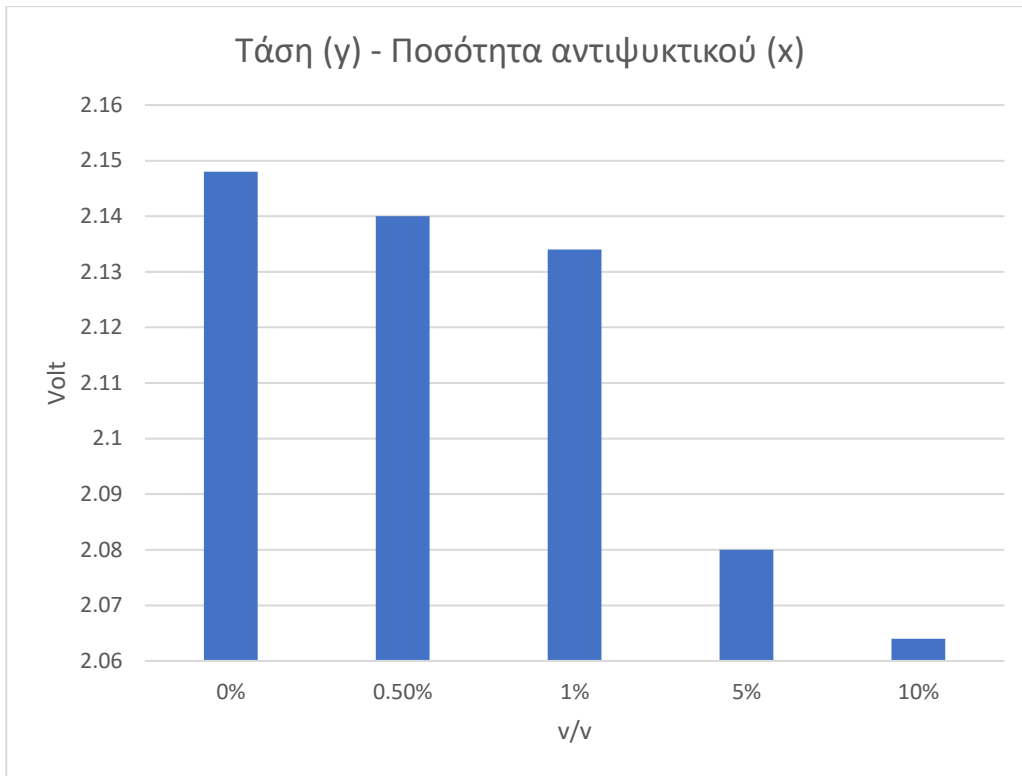
Σχήμα 63. Διαφοροποίηση της τάσης εξόδου ανάλογα με την συχνότητα ταλάντωσης στην ομάδα 1

Στην δεύτερη κατηγορία, τα ονόματα δόθηκαν βάσει της περιεκτικότητάς του επι τοις εκατό v/v (%) σε αντιψυκτικό υγρό.

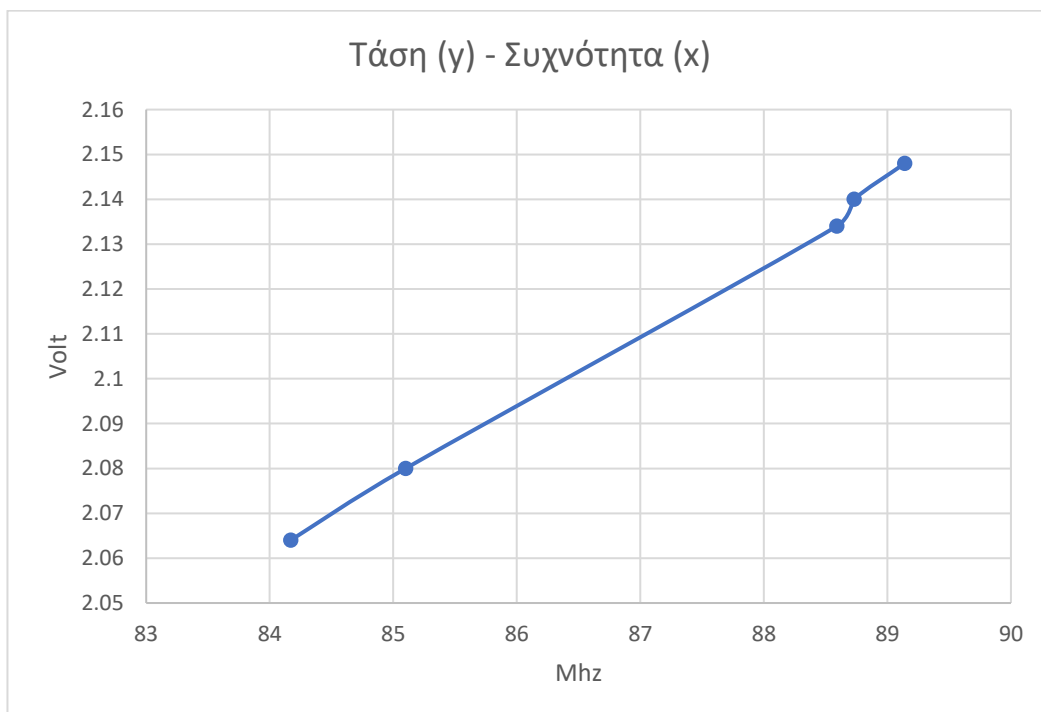
### Αποτελέσματα ομάδας 2

Πίνακας 3. Επίδραση επιμόλυνσης λαδιού με αντιψυκτικό στην τάση εξόδου

Αντιψυκτικό v/v	Συχνότητα σε MHz	Τάση εξόδου σε V	Απόκλιση %
0%	89,14	2,148	0
0,50%	88,73	2,14	0,37
1%	88,59	2,134	0,65
5%	85,1	2,08	3,17
10%	84,17	2,064	3,91



Σχήμα 64. Σχηματική αναπαράσταση αποτελεσμάτων πίνακα 3



Σχήμα 65. Διαφοροποίηση της τάσης εξόδου ανάλογα με την συχνότητα ταλάντωσης στην ομάδα 2

### Αποτελέσματα ομάδας 3

#### Επίδραση θερμοκρασίας στην τάση εξόδου

Πίνακας 4. Επίδραση θερμοκρασίας στο δείγμα 1

Eni 10-40 10k	
Θερμοκρασία σε °C	Τάση σε V
80	1,969
60	1,976
40	1,984
20	1,996

Πίνακας 5. Επίδραση θερμοκρασίας στο δείγμα 2

Trajet	
Θερμοκρασία σε °C	Τάση σε V
80	1,970
60	1,980
40	1,988
20	2,000

Πίνακας 6. Επίδραση θερμοκρασίας δείγμα 3

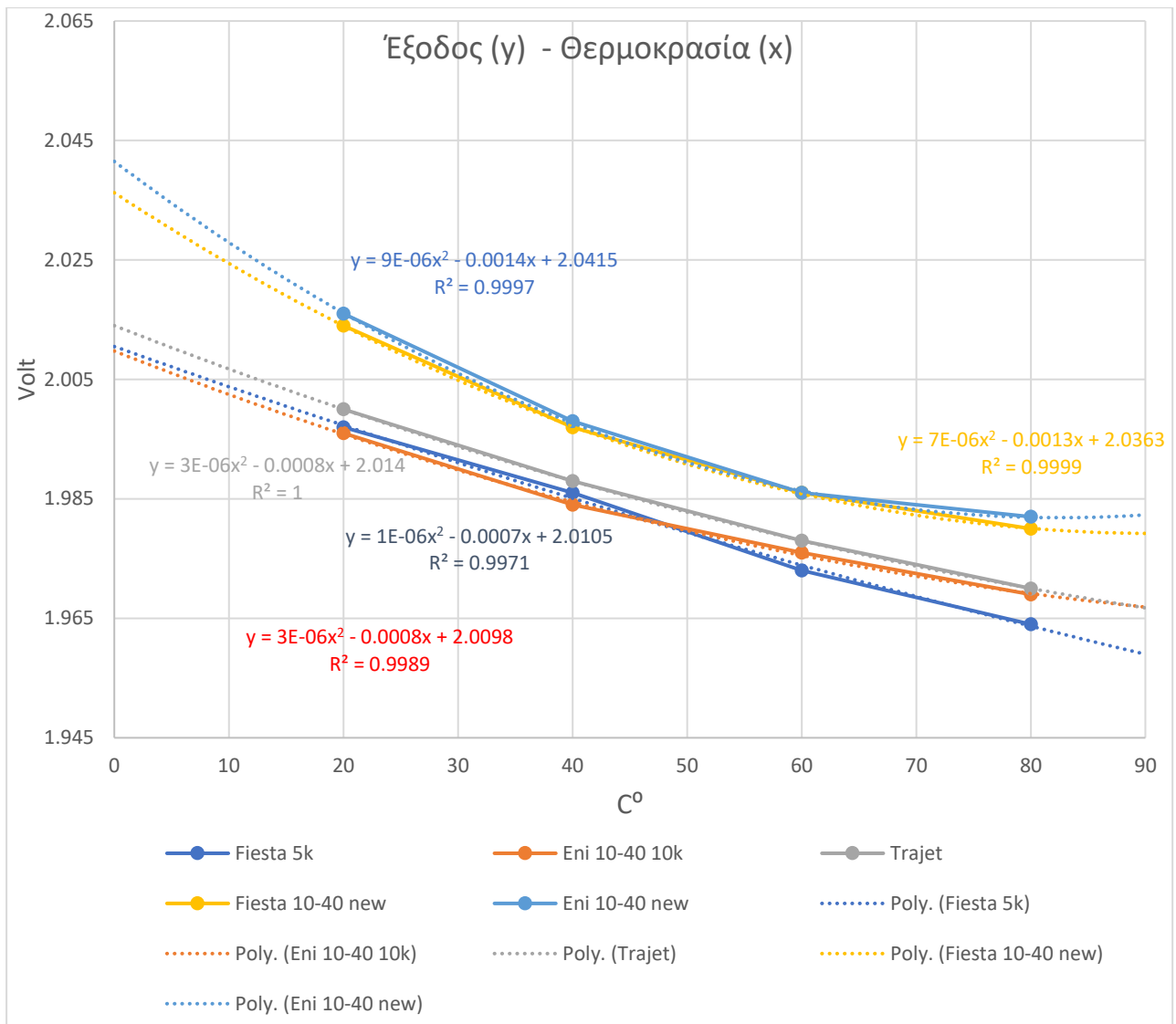
Fiesta 10-40 new	
Θερμοκρασία σε °C	Τάση σε V
80	1,980
60	1,986
40	1,997
20	2,014

Πίνακας 7. Επίδραση θερμοκρασίας στο δείγμα 4

Eni 10-40 new	
Θερμοκρασία σε °C	Τάση σε V
80	1,982
60	1,986
40	1,998
20	2,016

Πίνακας 8. Επίδραση θερμοκρασίας στο δείγμα 1

Fiesta 5k	
Θερμοκρασία σε °C	Τάση σε V
80	1,964
60	1,973
40	1,986
20	1,997



Σχήμα 66. Σχηματικές απεικονίσεις και πολυωνυμικές εξισώσεις των αποτελεσμάτων της ομάδας 3

## 8.4 Επίλογος – Σχολιασμός της απόδοσης του αισθητήρα

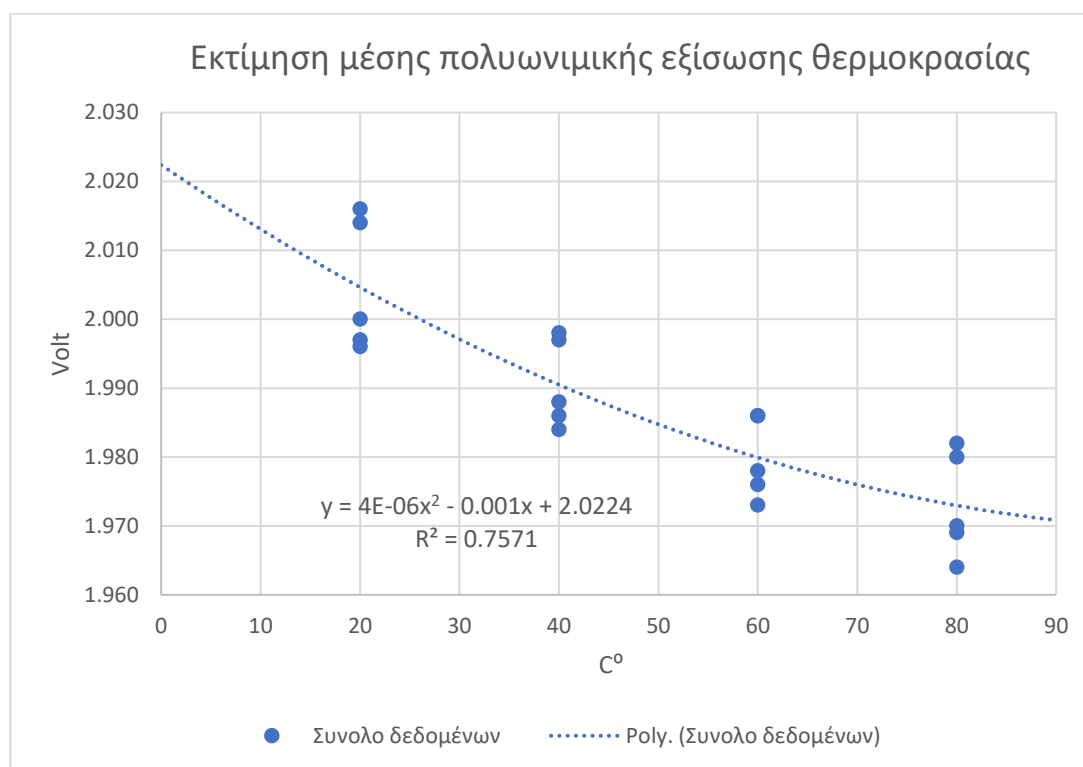
Από τα παραπάνω αποτελέσματα έγινε η σύνθεση των διαγραμμάτων τα οποία και θα αναλύσουμε. Όπως βλέπουμε, παρατηρείται μια ξεκάθαρη σχέση μεταξύ συχνότητας και τάσης εξόδου οπότε μπορούμε να συμπεράνουμε ότι όσο αυξάνεται η συχνότητα αυξάνεται και η τάση (σχήμα 63). Τα λάδια που είχαν εξαχθεί ως δείγματα από μηχανές αυτοκινήτων είχαν εμφανώς σκουρότερο χρώμα σε σχέση με τα καινούργια λάδια. Παρατηρούμε μια γενική διαφοροποίηση στην τάση αλλά και στην συχνότητα των καινούργιων από τα μεταχειρισμένα λάδια (σχήμα 62). Δεν ήταν δυνατό σε πολλές περιπτώσεις να γνωρίζουμε τα χιλιόμετρα που έχει διανύσει το κάθε αυτοκίνητο με το κάθε λάδι, παρά ταύτα βλέπουμε μια σαφή υποβάθμιση της ποιότητας του λαδιού, αν και η διαφοροποίηση είναι μικρή. Αυτό μας οδηγεί στην επιβεβαίωση της αρχικής υπόθεσης ότι οι προσμίξεις άνθρακα που υποβαθμίζουν το λάδι της μηχανής αλλάζουν και τις ηλεκτρικές του ιδιότητες. Η υποβάθμιση αυτή είναι σχετικά μετρήσιμη με την μέθοδο αυτή και μπορεί να εξάγει χρήσιμες πληροφορίες για το εκάστοτε λάδι, έχοντας πάντα ένα σημείο αναφοράς που στην περίπτωση μας είναι η αρχική μέτρηση του λαδιού όντας καινούργιο και πριν μπει στην μηχανή.

Στην δεύτερη ομάδα αποτελεσμάτων που συνθέτουν τα παραπάνω διαγράμματα (σχήματα 64,65), παρατηρούμε μια σχέση ανάμεσα στο ποσοστό πρόσμιξης του λαδιού με ψυκτικό υγρό και στην τάση

εξόδου του αισθητήρα. Η υποβάθμιση του λαδιού είναι πολύ εύκολα παρατηρήσιμη κάνοντάς την μέθοδο αυτή ιδιαίτερα αποτελεσματική. Αυτό συμβαίνει διότι το αντιψυκτικό υγρό είναι περισσότερο αγωγίμο από το λάδι και συνεπώς αλλάζει την ηλεκτρική διαπερατότητα του μείγματος. Παρατηρούμε επίσης, ότι ακόμα και σε μικρές ποσότητες το αντιψυκτικό είναι ανιχνεύσιμο στο δείγμα του λαδιού, κάνοντας αυτή την μέθοδο χρήσιμη στο να ανιχνεύει εσωτερικές διαρροές στο κύκλωμα ψύξης ή και λίπανσης της μηχανής.

Στην τρίτη ομάδα αποτελεσμάτων παρατηρούμε την σχεδόν γραμμική σχέση ανάμεσα στην θερμοκρασία και την τάση εξόδου, δηλαδή την ηλεκτρική διαπερατότητα του λαδιού. Στα διαγράμματα (Σχήμα 66) μπορούμε να ξεχωρίσουμε σαφώς τα χρησιμοποιημένα από τα καινούργια λάδια σε όλο το εύρος των θερμοκρασιών. Ακόμα, για κάθε δείγμα προκύπτει και μία πολυωνυμική εξίσωση που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για να κάνουμε μία εκτίμηση στην τιμή της εξόδου σε μία θερμοκρασία και συνεπώς με αυτή την εξίσωση πραγματοποιείται και η αντιστάθμιση της θερμοκρασίας. Παρατηρούμε ότι αν και κάθε δείγμα έχει διαφορετική εξίσωση (Σχήμα 66), εντούτοις, κάθε συντελεστής των εξισώσεων αυτών προσεγγίζει σε τιμή τους αντίστοιχους συντελεστές των υπόλοιπων εξισώσεων. Για να προκύψει μία γενική εξίσωση αντιστάθμισης η οποία θα χρησιμοποιείται γενικά σε κάθε περίπτωση τοποθετήσαμε σε διάγραμμα όλες τις τιμές από όλα τα δείγματα της ομάδας 3 και έγινε απεικόνιση της γραμμής τάσης των σημείων αυτών (Σχήμα 67). Η εξίσωση που προέκυψε (8.1) είναι μία εκτίμηση για την αντιστάθμιση της εξόδου του συστήματος για όλο το εύρος των θερμοκρασιών που εξετάστηκαν.

$$y = 4 \cdot 10^{-6} x^2 - 0,001x + 2,0224 \quad (8.1)$$



Σχήμα 67. Σχηματική απεικόνιση της εκτιμώμενης μέσης πολυωνυμικής εξίσωσης για την αντιστάθμιση θερμοκρασίας

## Κεφάλαιο 9ο: Συμπεράσματα

Ο υπολογισμός της σύνθετης ηλεκτρικής διαπερατότητας παρέχει υψηλή ακρίβεια και αξιόπιστη απόδοση σε σύντομο χρονικό διάστημα ακόμη και σε πραγματικό χρόνο, και επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές παρακολούθησης ποιότητας υλικών, περιεκτικότητας σε συγκεκριμένη ουσία, ή ακόμη και έλεγχο μειγμάτων ουσιών. Πλήθος εφαρμογών υπάρχουν που είναι σχεδιασμένες για εξέταση δειγμάτων υγρών, στερεών, ακόμη και αερίων. Φυσικά, ανάλογα με την εφαρμογή, αναπτύσσονται προσαρμοσμένοι ηλεκτρικοί αισθητήρες χωρητικότητας, διαφόρων τύπων, επίπεδοι, κυλινδρικοί, κλπ. Στον τομέα αυτό, συνεχίζεται η έρευνα με στόχο τη βελτίωση της επιτυγχανόμενης ευαισθησίας, που προς το παρόν κινούνται εντός του εύρους 0,03% και 0,43% [20] για τους επίπεδους αισθητήρες συντονισμού. Συνήθως στους επίπεδους αισθητήρες συντονισμού, παρόλη την ύπαρξη διάφορων περιορισμών, περιλαμβάνονται διατάξεις ταλαντωτών - συντονιστών που παράγουν συχνότητες μικροκυμάτων για το χαρακτηρισμό ή την εξέταση των υλικών.

Ειδικότερα στην εργασία αυτή προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα που αφορούν την κατασκευή, τη λειτουργικότητα και την αξιοπιστία ενός αισθητήρα μέτρησης ποιότητας λαδιού, με βάση τη μεταβολή της διηλεκτρικής διαπερατότητας του λαδιού όταν βρίσκεται σε συνθήκες πεδίου υψηλής συχνότητας.

Συγκεκριμένα προέκυψε ότι:

1. Υπάρχουν στη βιβλιογραφία συχνές αναφορές για αισθητήρες μέτρησης ποιότητας υγρών που λειτουργούν σε πεδίο χαμηλών συχνοτήτων.
2. Είναι εφικτή η κατασκευή ενός πρωτότυπου, σχετικά απλού αισθητήρα μέτρησης ποιότητας λαδιού με βάση τη μέτρηση των μεταβολών της διηλεκτρικής διαπερατότητας σε πεδίο υψηλής συχνότητας.
3. Η κατασκευή που έγινε στην παρούσα εργασία βασίστηκε σε εξαρτήματα μικρού σχετικά κόστους, διαθέσιμα στο εμπόριο.
4. Ο αισθητήρας που αναπτύχθηκε αποδείχθηκε ότι λειτουργεί ικανοποιητικά για μετρήσεις υπό συνθήκες εργαστηρίου και με περιορισμένα δείγματα.
5. Η εφαρμογή του αισθητήρα σε πραγματικά δείγματα λαδιού, έδειξε ότι είναι χρήσιμος στο να δίνει γρήγορη ένδειξη της ποιότητας του λαδιού, με ικανοποιητική αξιοπιστία.
6. Η εφαρμογή του αισθητήρα σε πραγματικά δείγματα λαδιού με προσμίξεις ψυκτικού υγρού, έδειξε ότι είναι χρήσιμος στο να δίνει γρήγορη ένδειξη της επιμόλυνσης του λαδιού με το υγρό αυτό, με ικανοποιητική αξιοπιστία.
7. Η χρήση αισθητήρων που αποσκοπούν στη συνεχή και με ελάχιστο κόστος παρακολούθηση της ποιότητας των λαδιών, είναι φιλική προς το περιβάλλον, με πράσινο αποτύπωμα επειδή περιορίζει τη σπατάλη λαδιού, και έχει αντίκτυπο στην οικονομία.
8. Ο αισθητήρας αυτός έχει στόχο την προστασία του κινητήρα εσωτερικής καύσης με την συνεχή επιτήρηση της ποιότητας του λιπαντικού μέσου.

## **Κεφάλαιο 10ο: Μελλοντικές προτάσεις ανάπτυξης**

1. Περαιτέρω ανάπτυξη του αισθητήρα ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλων τύπων υγρά, όπως φυτικά έλαια ή άλλα υγρά.
2. Αναβάθμιση των υλικών και κυρίως του ταλαντωτή ώστε η συχνότητα που παράγει να έχει μεγαλύτερη ισχύ αλλά και μεγαλύτερη σταθερότητα χωρίς διακυμάνσεις
3. Περαιτέρω διερεύνηση και η συλλογή επιπλέον δειγμάτων ώστε να παρατηρηθεί βήμα – βήμα όλη η διαδικασία υποβάθμισης του λαδιού σε σχέση με τα χιλιόμετρα που έχει διανύσει το όχημα.
4. Ενσωμάτωση του αισθητήρα στο σύστημα λίπανσης του αυτοκινήτου και η συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.
5. Αύξηση της συχνότητας λειτουργίας του αισθητήρα και η σύγκριση των αποτελεσμάτων.

## BIBΛIOΓΡΑΦΙΑ

- [1] A. Fendri, G. Hamadi, R. Ramalingame, O. Kanoun. «Investigation of Interdigital Sensor Geometry for Oil Quality Measurement». 14th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices - SSD17. **2017**.
- [2] A. Torres Pérez, M. Hadfield. «Low-Cost Oil Quality Sensor Based on Changes in Complex Permittivity». *Sensors*. **2011**, *11*, 10675-10690; doi:10.3390/s111110675
- [3] K. N. Khamil, M.A.U.C.Mood. «Dielectric Sensing (Capacitive) On Cooking Oil's TPC Level». *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*, Vol. 9 No. 3., **2017**.
- [4] S. Malik, I. Tarikul, K. Kaushal, K. Krishan, S.A. Akbar, B.A. Botre, «A Simple Analog Interface for Capacitive Sensor with Offset and Parasitic Capacitance», *IEEE INDICON* 1570187179. **2015**.
- [5] J. Ulrich, M. Svoboda, R. Polansky, J. Pihera, «Dielectric analysis of vegetable and mineral oils», *IEEE International Conference on Liquid Dielectrics*, Bled, Slovenia, June 30 - July 3, **2014**.
- [6] S. Lenzini, L. Rosa, L. Vincetti, «Complex Permittivity Measurements of Hydraulic Oil at UHF and Microwave Frequencies», *IEEE* 978-1-7281-0563-5/19/, **2019**.
- [7] H. Shinde and A. Bewoor, Capacitive Sensor for Engine Oil Deterioration Measurement, *AIP Conference Proceedings* **1943**, 020099 (2018); doi: 10.1063/1.5029675.
- [8] A. Risos, The Physics of interdigitated dielectrometry sensors and Application as In-Situ Oil Oxidation Monitoring, Victoria University of Wellington, Ph.D. Thesis, **2018**.
- [9] M. F. Idros, N.S.B. Ramli1, P.S. M. Saad, S. A. Mutalib, Al Junid, A. H. A. Razak, A.K. Halim, “Degradation Monitoring of Repeated Cooking Oil Using Capacitive Inter-digital Electrode (IDE) Sensor” *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, Volume 8. No. 9, **2020**, <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/205892020>
- [10] A. Ebrahimi, J. Scott, K. Ghorbani, “Ultrahigh-Sensitivity Microwave Sensor for Microfluidic Complex Permittivity Measurement”, *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, Vol. 67, No. 10, **2019**.
- [11] Z. Han, Y. Wang, X. Qing, Characteristics study of capacitive sensor for oil debris monitoring, The 9th International Symposium on NDT in Aerospace, Xiamen, China, 8-10 November, **2017**..
- [12] T. Chen, Capacitive sensors for measuring complex permittivity of planar and cylindrical Structures, Ph.D., Iowa State University, Ames, Iowa, **2012**.
- [13] S.t Guha and C. Wenger, Radio Frequency CMOS Chem-bio Viscosity Sensors based on Dielectric Spectroscopy. DOI: 10.5220/0006151901420148. In *Proceedings of the 10th International Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies*, pages 142-148, *BIOSTEC* **2017**.
- [14] H Liu, X. Tang, H. Lu., W. Xie, Y. Hub, Q. Xue, “An interdigitated impedance microsensor for detection of moisture content in engine oil”, *Nanotechnology and Precision Engineering* 3, p.75–80, (2020) <https://doi.org/10.1016/j.npe.2020.04.001>,
- [15] Sucipto, T. Djatna, Irzaman, I. Tun Tedja, A. M. Fauzi, Application of Electrical Properties to Differentiate Lard from Tallow and Palm Oil *Media Peternakan*, pp. 32-39, April **2013**.
- [16] A. Ivanov, T. Agliullin, D. Laneve, V. Portosi, A. Vorobev, R.R. Nigmatullin, A. Nasybullin, O. Morozov, F. Prudenzano, A. D’Orazio, M. Grande, Design and Characterization of a Microwave

Planar Sensor for Dielectric Assessment of Vegetable Oils, *Electronics* **2019**, 8, 1030; doi:10.3390/electronics8091030.

[17] A. Carey, *The Dielectric Constant of Lubrication Oils*, **1998**.

[18] M. Liu, X. Qin, Z. Chen, L. Tang, B. Borom, N. Cao, D. Barnes, K. Cheng, J. Chen, T. Wang, J. Rao, “Frying Oil Evaluation by a Portable Sensor Based on Dielectric Constant Measurement”, *Sensors* 19, p.5375, **2019**; doi:10.3390/s19245375.

[19] Α. Καναπίτσας, “Μετρήσεις διηλεκτρικών ιδιοτήτων υλικών με τη χρήση διάταξης διηλεκτρικής φασματοσκοπίας”, *Λαμία* **2013**.

[20] R.A. Alahnomi, Z. Zakaria, Z.M. Yussof, A. A. Althuwayb, A. Alhegazi, H. Alsariera, N. Abd Rahman, Review of Recent Microwave Planar Resonator-Based Sensors: Techniques of Complex Permittivity Extraction, Applications, Open Challenges and Future Research Directions, *Sensors* **2021**, 21, 2267. <https://doi.org/10.3390/s21072267>

[21] Ε.Δ. Τσάμης *Επίπεδοι Αισθητήρες Χωρητικότητας, Διδακτορική Διατριβή Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*, **2004**.

[22] Y. Khanna, Y.K. Awasthi, Dual-Band Microwave Sensor for Investigation of Liquid Impurity Concentration Using a Metamaterial Complementary Split-Ring Resonator. *J. Electron. Mater.* **2020**, 49, 385–394.

[23] Gan, H.Y.; Zhao, W.S.; Liu, Q.; Wang, D.W.; Dong, L.; Wang, G.; Yin, W.Y. Differential Microwave Microfluidic Sensor Based on Microstrip Complementary Split-Ring Resonator (MCSRR) Structure. *IEEE Sens. J.* **2020**, 20, 5876–5884.

[24] A. Kapoor, P.K. Varshney, M.J. Akhtar, Interdigital Capacitor Loaded Electric-LC Resonator for Dielectric Characterization. *Microw. Opt. Technol. Lett.* **2020**, 62, 2835–2840.

[25] K. Saeed, M.F. Shafique, M.B. Byrne, I.C. Hunter, Planar Microwave Sensors for Complex Permittivity Characterization of Materials and Their Applications. In *Applied Measurement Systems*, IntechOpen, Rijeka, Croatia, **2012**; ISBN 978-953-51-0103-1.

[26] Varshney, P.K.; Akhtar, M.J. A Compact Planar Cylindrical Resonant RF Sensor for the Characterization of Dielectric Samples. *J. Electromagn. Waves Appl.* **2019**, 33, 1700–1717.

[27] G.M. Rocco, M. Bozzi, D. Schreurs, L. Perregriani, S. Marconi, G. Alaimo, F. Auricchio, 3-D Printed Microfluidic Sensor in SIW Technology for Liquids’ Characterization. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **2020**, 68, 1175–1184.

[28] N.K. Tiwari, S.P. Singh, M.J. Akhtar, Novel Improved Sensitivity Planar Microwave Probe for Adulteration Detection in Edible Oils. *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.* **2019**, 29, 164–166.

[29] Su L., Mata-Contreras J., Velez P., A. Fernandez-Prieto, F. Martin, Analytical Method to Estimate the Complex Permittivity of Oil Samples, *Sensors* **2018**, 18, 984; doi:10.3390/s18040984.

[30] Md. N. Al-Imran, S.W. Glass, L.S. Fifield, M. Ali, Parameter Sensitivity of Interdigital Sensors for their Design for Cable Insulation Aging Detection, *Proceedings of EnvDeg 2019, Boston, MA, August 18-22*, **2019**.

[31] A.S. Zoolfakar, S.B. Hashim, M. Zolkapli, M.F. Idros, Design, Fabrication and Characterization of Conductivity Sensor using Printed Circuit Board, *6th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA)*, **2010**.

- [32] E. Choe, D.B. Min, Mechanisms and Factors for Edible Oil Oxidation, *Comprehensive reviews in food science and food safety*, **2006** <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2006.00009.x>
- [33] D.W. Johnson, Turbine Engine Lubricant and Additive Degradation Mechanisms, **2018**, DOI: 10.5772/intechopen.82398.a
- [34] R. E. Rachmanita, B. Rudiyanto, H. Ahmadi, T. Seetawan, Analyzes the effect of temperature on characteristics of crude oil permittivity sensor based on Interdigital Capacitors (IDCs), **2020**, *J. Phys.: Conf. Ser.* 1511 012083.
- [35] T-T. Ngo, H. Shirzadfar, D. Kourtiche, M. Nadi, Planar Interdigital Sensor for Bio-impedance Measurement: Theoretical analysis, Optimization and Simulation, *J. Nano- Electron. Phys.* 6, 01011, **2014**.
- [36] Γεωργιάδης Κωνσταντίνος, Σκετόπουλος Νικόλαος 2017, Ανάλυση και υλοποίηση ταλαντωτή τύπου Colpitts, Εργασία στο μάθημα «Εργαστήριο Αναλογικών VLSI», Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- [37] Σπάσος Μιχάλης, Κώστας Αμοιρίδης, 2018, Σύγχρονες εφαρμογές αναλογικών ηλεκτρονικών, Κεφάλαιο 12, Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Αϊβάζη,
- [38] Στυλιανός Μυτιληναίος, Σχεδίαση Ηλεκτρονικών Κυκλωμάτων RF, Ενότητα: Φίλτρα και Επαναληπτικές Ασκήσεις, Τμήμα Ηλεκτρονικής, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών Πειραιά
- [39] [https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic\\_filter#Passive\\_filters](https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_filter#Passive_filters)
- [40] [http://www.idc-online.com/technical\\_references/pdfs/electronic\\_engineering/Types\\_of\\_Active\\_Filters.pdf](http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/electronic_engineering/Types_of_Active_Filters.pdf)
- [41] <https://en.wikipedia.org/wiki/Arduino>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Κώδικας λογισμικού στο Arduino IDE

```
#include <stdio.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2);

void setup() {

    lcd.init();
    lcd.clear();
    lcd.backlight();
    Serial.begin(9600);
    pinMode(34, INPUT);
}

float sensorValue=0;
float voltage=0;
float sumvoltage=0;
float avgvoltage=0;
int i=0;

void loop() {

    for(i=0;i<=1000;i++)
    {
        sensorValue = analogRead(34);
        voltage = sensorValue * (3.470 / 4095.0);
        sumvoltage = sumvoltage + voltage;
        delay(1);
    }
    avgvoltage = sumvoltage/1000;
    Serial.println(avgvoltage,3);
```

```
sumvoltage=0;
delay(1000);

lcd.setCursor(2,0); //Set cursor to character 2 on line 0
lcd.print("Output");

lcd.setCursor(2,1); //Move cursor to character 2 on line 1
lcd.print(avgvoltage,3);

}
```