



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Επίπεδοι Αισθητήρες Χωρητικότητας

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ



Ευάγγελος Δ. Τσάμης

Αθήνα, Δεκέμβριος 2004

.....
Ευάγγελος Δ. Τσάμης

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

Copyright © Ευάγγελος Δ. Τσάμης 2004.
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

*Αφιερώνεται
στη μνήμη του πατέρα μου*

Περιεχόμενα

I.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	16
I.1	Γενικά.....	16
I.1.1	Ιστορική διαδρομή.....	16
I.1.2	Φυσιολογία.....	18
I.2	Σύγχρονοι αισθητήρες χωρητικότητας.....	19
I.2.1	Ορισμός.....	19
I.2.2	Ιδιότητες.....	20
I.3	Εφαρμογές.....	21
II.	ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΗ.....	26
II.1	Ελεκτροστατικό Πεδίο.....	26
II.1.1	Γενικά.....	26
II.1.2	Ηλεκτρικά φορτία και πεδία.....	26
II.1.3	Εξισώσεις ηλεκτροστατικού πεδίου.....	27
II.1.4	Εξισώσεις Laplace και Poisson.....	27
II.1.5	Διηλεκτρικά.....	28
II.1.6	Αγωγοί.....	29
II.1.7	Χωρητικότητα και Μήτρες Χωρητικότητας.....	29
II.1.8	Ισοδύναμες συγκεντρωμένες ηλεκτρικές χωρητικότητες.....	30
II.1.9	Ολοκλήρωμα Poisson και προβλήματα Dirichlet.....	31
II.2	Αποκλίσεις από το θεωρητικό μοντέλλο.....	33
II.2.1	Αποκλίσεις.....	33
II.2.2	Επίδραση της υγρασίας στην διηλεκτρική σταθερά του αέρα.....	33
II.2.3	Η επίδραση της ηλεκτρικής θωράκισης και των διάκενων.....	35
II.2.4	Πεπερασμένα ηλεκτρόδια θωράκισης.....	35
II.2.5	Παρασιτικές χωρητικότητες.....	37

II.3	Η χωρητικότητα σε υψηλές συχνότητες	38
II.3.1	Ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα μεγαλύτερης τάξης	38
II.3.2	Ημιστατικές εξισώσεις ηλεκτρομαγνητικού πεδίου	39
II.4	Χωρητικότητα και κυκλώματα μέτρησης	39
II.4.1	Μέτρηση χωρητικότητας	39
II.4.2	Μοντέλλο αισθητήρα χωρητικότητας	40
II.4.3	Κυκλώματα μέτρησης	41
II.5	Ηλεκτρική Χωρητική Τομογραφία (ECT)	46
II.5.1	Γενικά	46
II.5.2	Περιγραφή	46
III.	Αισθητήρας Μέτρησης «περιεχομένου ύδατος»	51
III.1	Παρουσίαση	51
III.1.1	Το πρόβλημα	51
III.1.2	Αρχή λειτουργίας	52
III.2	Σχεδίαση	53
III.2.1	Δομή του συστήματος	53
III.2.2	Μαθηματική περιγραφή της λειτουργίας του αισθητήρα	54
III.2.3	Σχεδίαση του αισθητήρα	56
III.3	Υλοποίηση - Εγκατάσταση	59
III.3.1	Ηλεκτρονικό κύκλωμα μέτρησης	59
III.3.2	Διαδικασία ρύθμισης-αντιστάθμισης	63
III.3.3	Εγκατάσταση σε βιομηχανικό περιβάλλον	65
III.3.4	Πειραματικά αποτελέσματα	75
III.4	Θεωρητική μελέτη	79
III.4.1	Ημι-Εμπειρικές σχέσεις	79
III.4.2	Αναλυτικές μέθοδοι	81
III.4.3	Προσέγγιση με την χρήση της Μεθόδου Χωριζομένων μεταβλητών	81
III.4.4	Υπολογισμός χωρητικότητας μέσω επιφανειακού φορτίου	92

III.4.5	Υπολογισμός χωρητικότητας μέσω ηλεκτροστατικής ενέργειας.....	93
III.4.6	Η αμοιβαία χωρητικότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων	96
III.4.7	Υπολογισμός της χωρητικότητας προς γή των ηλεκτροδίων	97
III.4.8	Θεωρητικά αποτελέσματα.....	99
III.4.9	Χρήση πεπερασμένων στοιχείων	106
III.5	Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων	114
III.5.1	Σύγκριση αναλυτικών σχέσεων-πεπερασμένων στοιχείων	114
III.5.2	Συγκριση θεωρητικών - πειραματικών δεδομένων.....	115
III.5.3	Εξαγωγή κανόνων σχεδίασης (Design Rules).....	115
IV.	Κάμερα Χωρητικότητας	118
IV.1	Παρουσίαση	118
IV.1.1	Το πρόβλημα.....	118
IV.1.2	Επίπεδες γεωμετρίες και ολοκλήρωση.....	119
IV.2	Βασικές Αρχές - 'Διαφορική' Χωρητικότητα.....	120
IV.2.1	Αρχή λειτουργίας	120
IV.2.2	Μαθηματική περιγραφή.....	122
IV.2.3	Πλεονεκτήματα	123
IV.3	Υλοποίηση.....	126
IV.3.1	Κατασκευή αισθητήρα	126
IV.3.2	Κατασκευή κυκλώματος	128
IV.3.3	Πειραματικά αποτελέσματα.....	129
IV.4	Θεωρητική μελέτη.....	131
IV.4.1	Αναλυτικές σχέσεις	131
IV.4.2	Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων.....	136
IV.5	Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων.....	143
IV.5.1	Μελέτη θεωρητικών - πειραματικών δεδομένων	143
IV.6	Ολοκλήρωση σε Πυρίτιο.....	143
V.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	145

V.1	Ανακεφαλαίωση.....	145
V.1.1	Εφαρμογές.....	145
V.1.2	Αισθητήρας μέτρησης «περιεχομένου ύδατος» σε γραμμή παραγωγής.....	146
V.1.3	Κάμερα χωρητικότητας	148

Βιβλιογραφία

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Λίστα από σχήματα

Σχ. 1	Κατανομή δημοσιεύσεων πάνω σε αισθητήρες χωρητικότητας τις τελευταίες δεκαετίες.	18
Σχ. 2	Αριθμητική προσομοίωση της αίσθησης μέσω ηλεκτρικού πεδίου.....	19
Σχ. 3	Ορισμός ισοδύναμων συγκεντρωμένων χωρητικότητων ηλεκτρικού κυκλώματος ...	30
Σχ. 4	Απλός πυκνωτής παραλλήλων πλακών με ηλεκτρόδια Kelvin.....	35
Σχ. 5	Διάταξη ηλεκτροδίων για την μελέτη της επίδραση της θωράκισης	36
Σχ. 6	Ισοδύναμο μοντέλο υψηλής συχνότητας ενός πυκνωτή δύο ηλεκτροδίων πάνω από επίπεδο γης.....	38
Σχ. 7	Μοντέλλο αισθητήρα με βάση αρχής χωρητικότητα	40
Σχ. 8	Το κύκλωμα φόρτισης/εκφόρτισης	41
Σχ. 9	Το κύκλωμα μέτρησης χωρητικότητας AC	43
Σχ. 10	Απλοποιημένο μπλόκ διάγραμμα των κυκλωμάτων μέτρησης.....	44
Σχ. 11	Τυπικό σύστημα ECT.....	47
Σχ. 12	Η διασύνδεση κεφαλής αισθητήρα με τα ηλεκτρονικά σε μπλόκ διάγραμμα.....	53
Σχ. 13	Ο αισθητήρας χωρητικότητας σε εγκάρσια τομή με την διάταξη ηλεκτροδίων και τα απαιτούμενα ηλεκτρικά σήματα.	54
Σχ. 14	Μπλόκ διάγραμμα του ηλεκτρονικού συστήματος του αισθητήρα.....	55
Σχ. 15	Επιμέρους χωρητικότητες που αναπτύσσονται μεταξύ των ηλεκτροδίων πάνω από το προς μέτρηση υλικό.....	58
Σχ. 16	Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος μέτρησης χωρητικότητας.....	60
Σχ. 17	Φωτογραφία της πλακέτας (PCB) του κυκλώματος μέτρησης (Component Side).....	61
Σχ. 18	Φωτογραφία της πλακέτας (PCB) του κυκλώματος μέτρησης (Solder Side).....	61
Σχ. 19	Η δομή του εγκατεστημένου συστήματος σε μπλόκ διάγραμμα.....	65
Σχ. 20	Μηχανολογικό σχέδιο των αισθητήρων.. Διαστάσεις σε mm.....	66
Σχ. 21	Οι αισθητήρες για τοποθέτηση στην γραμμή παραγωγής	69
Σχ. 22	Τοποθέτηση των αισθητήρων ανάμεσα από ράουλα κοντά στην έξοδο του φούρνου αφύγνωσης.....	69
Σχ. 23	Τοποθέτηση των αισθητήρων πάνω από γυψοσανίδες	70

Σχ. 24 Τοποθέτηση του αισθητήρα πάνω από γραμμή παραγωγής μπισκότων	71
Σχ. 25 Φωτογραφίες της τοποθέτησης των πλακέτων με τα ηλεκτρονικά σε μονάδες μαζί με την τροφοδοσία τους.	72
Σχ. 26 Ο κύριος ηλεκτρικός πίνακας συγκέντρωσης των σημάτων των αισθητήρων που περιέχει και τα συστήματα δειγματοληψίας (Data Logging)	73
Σχ. 27 Φωτογραφία του σταθμού ελέγχου και καταγραφής	74
Σχ. 28 Φωτογραφία από την κυρία οθόνη του προγράμματος καταγραφής.	74
Σχ. 29 Τυπική έξοδος του συστήματος για διάφορα διηλεκτρικά υλικά συναρτήσει της απόστασης από τον αισθητήρα χωρίς παρουσία επιπέδου.	76
Σχ. 30 Η έξοδος του συστήματος για παχύ γιαλί συναρτήσει της απόστασης από τον αισθητήρα παρουσία επιπέδου γείωσης σε απόσταση 10 cm και για διαφορετικές γεωμετρίες ηλεκτροδίων	77
Σχ. 31 Η έξοδος του συστήματος για λεπτό γιαλί συναρτήσει της απόστασης από τον αισθητήρα παρουσία επιπέδου γείωσης σε απόσταση 10 cm και για διαφορετικές γεωμετρίες ηλεκτροδίων	78
Σχ. 32 Γεωμετρίες για τον υπολογισμό της χωρητικότητας βάση ημι-εμπειρικών σχέσεων.	80
Σχ. 33 Διάταξη για την μοντελοποίηση του αισθητήρα με αναλυτικές εξισώσεις.	82
Σχ. 34 Γεωμετρία για το πρόβλημα των δύο ημι-απέραντων λεπτών φορτισμένων πλακών στο επίπεδο $Y=0$	83
Σχ. 35 Γραφική παράσταση της πυκνότητας φορτίου $\sigma(x)$ συναρτήσει της αποστάσεως x για $s=2$ και αυθαίρετη τάση πλακών.	84
Σχ. 36 Γραφική παράσταση της συνάρτησης Bessel πρώτου είδους και μηδενικής τάξης.	90
Σχ. 37 Τυπική υπολογιζόμενη επιφανειακή συγκέντρωση φορτίου για το πρόβλημα χωρίς παρουσία επιπέδου γής από τους πρώτους 50 και 100 όρους αντίστοιχα της σειράς ανάπτυξης στην περιοχή 1.	91
Σχ. 38 Ισοδύναμες χωρητικότητες του αισθητήρα επάλληλων ηλεκτροδίων παρουσία επιπέδου γείωσης.	97
Σχ. 39 Η χωρητικότητας ως προς γή (pF/m) για $s=0.25$, $g=2.0$ συναρτήσει πάχους της διηλεκτρικής πλάκας h και παράμετρο την διηλεκτρική της σταθερά $\epsilon_r=1,3$ και 5 ...	98
Σχ. 40 Η χωρητικότητας ως προς γή (pF/m) για $s=0.75$, $g=2.0$ συναρτήσει πάχους της διηλεκτρικής πλάκας h και παράμετρο την διηλεκτρική της σταθερά $\epsilon_r=1,3$ και 5 ...	99
Σχ. 41 Η μεταβολή της αμοιβαίας χωρητικότητας για $s=0.25$, $h=0.75$, $g=2.0$ συναρτήσει της θέσης της διηλεκτρικής πλάκας και παράμετρο την σχετική διηλεκτρική της σταθερά ϵ_r , 5 (solid), 3 (dot) και 2 (dash)	100

Σχ. 42 Η μεταβολή της αμοιβαίας χωρητικότητας για $s=0.50$, $h=0.75$, $g=2.0$ συναρτήσει της θέσης της διηλεκτρικής πλάκας και παράμετρο την σχετική διηλεκτρική της σταθερά ϵ_r , 5 (solid), 3 (dot) και 2 (dash)	100
Σχ. 43 Η μεταβολή της αμοιβαίας χωρητικότητας για $s=0.75$, $h=0.75$, $g=2.0$ συναρτήσει της θέσης της διηλεκτρικής πλάκας και παράμετρο την σχετική διηλεκτρική της σταθερά ϵ_r , 5 (solid), 3 (dot) και 2 (dash)	101
Σχ. 44 Η μεταβολή της αμοιβαίας χωρητικότητας για $s=0.25$, $h=0.50$, $g=2.0$ συναρτήσει της θέσης της διηλεκτρικής πλάκας και παράμετρο την σχετική διηλεκτρική της σταθερά ϵ_r , 5 (solid), 3 (dot) και 2 (dash)	101
Σχ. 45 Η μεταβολή της αμοιβαίας χωρητικότητας για $s=0.50$, $h=0.50$, $g=2.0$ συναρτήσει της θέσης της διηλεκτρικής πλάκας και παράμετρο την σχετική διηλεκτρική της σταθερά ϵ_r , 5 (solid), 3 (dot) και 2 (dash)	102
Σχ. 46 Η μεταβολή της αμοιβαίας χωρητικότητας για $s=0.75$, $h=0.50$, $g=2.0$ συναρτήσει της θέσης της διηλεκτρικής πλάκας και παράμετρο την σχετική διηλεκτρική της σταθερά ϵ_r , 5 (solid), 3 (dot) και 2 (dash)	102
Σχ. 47 Η μεταβολή της αμοιβαίας χωρητικότητας για $s=0.25$, $h=0.75$, $g=4.0$ συναρτήσει της θέσης της διηλεκτρικής πλάκας και παράμετρο την σχετική διηλεκτρική της σταθερά ϵ_r , 5 (solid), 3 (dot) και 2 (dash)	103
Σχ. 48 Η μεταβολή της αμοιβαίας χωρητικότητας για $s=0.50$, $h=0.75$, $g=4.0$ συναρτήσει της θέσης της διηλεκτρικής πλάκας και παράμετρο την σχετική διηλεκτρική της σταθερά ϵ_r , 5 (solid), 3 (dot) και 2 (dash)	103
Σχ. 49 Η μεταβολή της αμοιβαίας χωρητικότητας για $s=0.75$, $h=0.75$, $g=4.0$ συναρτήσει της θέσης της διηλεκτρικής πλάκας και παράμετρο την σχετική διηλεκτρική της σταθερά ϵ_r , 5 (solid), 3 (dot) και 2 (dash)	104
Σχ. 50 Η μεταβολή της αμοιβαίας χωρητικότητας για $s=0.25$, $h=0.50$, $g=4.0$ συναρτήσει της θέσης της διηλεκτρικής πλάκας και παράμετρο την σχετική διηλεκτρική της σταθερά ϵ_r , 5 (solid), 3 (dot) και 2 (dash)	104
Σχ. 51 Η μεταβολή της αμοιβαίας χωρητικότητας για $s=0.50$, $h=0.50$, $g=4.0$ συναρτήσει της θέσης της διηλεκτρικής πλάκας και παράμετρο την σχετική διηλεκτρική της σταθερά ϵ_r , 5 (solid), 3 (dot) και 2 (dash)	105
Σχ. 52 Η μεταβολή της αμοιβαίας χωρητικότητας για $s=0.75$, $h=0.50$, $g=4.0$ συναρτήσει της θέσης της διηλεκτρικής πλάκας και παράμετρο την σχετική διηλεκτρική της σταθερά ϵ_r , 5 (solid), 3 (dot) και 2 (dash)	105
Σχ. 53 Η γεωμετρία του προβλήματος και ο χώρος προσομείωσης που χρησιμοποιήσαμε (διακεκομμένη περιοχή).....	106
Σχ. 54 Ο χώρος προσομοίωσης που μελετήθηκε με πεπερασμένα στοιχεία.	107
Σχ. 55 Τυπική γραφική παράσταση των αποτελεσμάτων της λύσης με πεπερασμένα στοιχεία για την χωρητικότητα συναρτήσει της θέσης διηλεκτρικής πλάκας και με παράμετρο την σχετική διηλεκτρική της σταθερά.	108

Σχ. 56	Μεταβολή της χωρητικότητας για παχύ υλικό και μικρό διάκενο ηλεκτροδίων	110
Σχ. 57	Μεταβολή της χωρητικότητας για παχύ υλικό και μέτριο διάκενο ηλεκτροδίων.....	110
Σχ. 58	Μεταβολή της χωρητικότητας για παχύ υλικό και μεγάλο διάκενο ηλεκτροδίων.....	111
Σχ. 59	Μεταβολή της χωρητικότητας για λεπτό υλικό και μικρό διάκενο ηλεκτροδίων.....	112
Σχ. 60	Μεταβολή της χωρητικότητας για λεπτό υλικό και μέτριο διάκενο ηλεκτροδίων	112
Σχ. 61	Μεταβολή της χωρητικότητας για λεπτό υλικό και μεγάλο διάκενο ηλεκτροδίων ...	113
Σχ. 62	Τυπικός λόγος της C_{odd} για 25(solid) και 50(dot) ορους προς αυτή για 100 όρους συναρτήσει της θέσης της πλάκας	114
Σχ. 63	Προτεινόμενη διάταξη ηλεκτροδίων του αισθητήρα.	121
Σχ. 64	Μπλοκ διάγραμμα του προτεινόμενου κυκλώματος μέτρησης χωρητικότητας για κάμερα χωρητικότητας.....	122
Σχ. 65	Τυπικές χωρητικότητες μεταξύ διαφορετικών ηλεκτροδίων σε ένα σύστημα ECT με η χωρίς διηλεκτρικό υλικό πλήρωσης του χώρου μεταξύ των ηλεκτροδίων.....	124
Σχ. 66	Βασική διομή του αισθητήρα για υλοποίηση πάνω σε πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (PCB). Αποψη και τομές.....	127
Σχ. 67	Η γεωμετρία του τελικού αισθητήρα σε κλίμακα 1:1.	128
Σχ. 68	Η υλοποίηση του κυκλώματος μέτρησης με διακριτά στοιχεία.....	129
Σχ. 69	Μεταβολή της εξόδου από την τιμή χωρίς διηλεκτρικό συναρτήσει της θέσης της διηλεκτρικής πλάκας για οδήγηση από το #1 ηλεκτρόδιο	130
Σχ. 70	Μεταβολή της εξόδου από την τιμή χωρίς διηλεκτρικό συναρτήσει της θέσης της διηλεκτρικής πλάκας οδήγηση από το #2 ηλεκτρόδιο.	130
Σχ. 71	Μεταβολή της εξόδου από την τιμή χωρίς διηλεκτρικό συναρτήσει της θέσης της διηλεκτρικής πλάκας για οδήγηση από το #3 ηλεκτρόδιο.....	131
Σχ. 72	Γεωμετρία για την μοντελοποίηση του αισθητήρα «κάμερας χωρητικότητας».....	132
Σχ. 73	Τυπική κατανομή επιφανειακού φορτίου όπως προκύπτει από την Εξ. 110.....	133
Σχ. 74	Διαφορική Χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους (pF/m) για $W=1$ συναρτήσει του s και για $w=0.25, 0.50, 0.75$ και 1.00 αντίστοιχα.....	134
Σχ. 75	Διαφορική Χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους (pF/m) για $W=1$ συναρτήσει του s σε πιο μεγάλη απόσταση και για $w=0.25, 0.50, 0.75$ και 1.00 αντίστοιχα.....	135
Σχ. 76	Διαφορική Χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους (pF/m) για $s+2w+W=1$ συναρτήσει του s και για $s/w=0.2, 4/3, 2, 3$ αντίστοιχα.	136
Σχ. 77	Ο χώρος προσομοίωσης μετά από διαμέριση σε πεπερασμένα στοιχεία.....	137

Σχ. 78 Η μεταβολή της χωρητικότητας για $W=100, s=50, w=25, h=100$ συναρτήσει του d και με παράμετρο το ϵ_r	139
Σχ. 79 Η μεταβολή της χωρητικότητας για $W=100, s=100, w=25, h=100$ συναρτήσει του d και με παράμετρο το ϵ_r	139
Σχ. 80 Η μεταβολή της χωρητικότητας για $W=100, s=150, w=25, h=100$ συναρτήσει του d και με παράμετρο το ϵ_r	140
Σχ. 81 Η μεταβολή της χωρητικότητας για $W=100, s=200, w=25, h=100$ συναρτήσει του d και με παράμετρο το ϵ_r	140
Σχ. 82 Η μεταβολή της χωρητικότητας για $W=100, s=500, w=50, h=100$ συναρτήσει του d και με παράμετρο το ϵ_r	141
Σχ. 83 Η μεταβολή της χωρητικότητας για $W=100, s=100, w=50, h=100$ συναρτήσει του d και με παράμετρο το ϵ_r	141
Σχ. 84 Η μεταβολή της χωρητικότητας για $W=100, s=150, w=50, h=100$ συναρτήσει του d και με παράμετρο το ϵ_r	142
Σχ. 85 Η μεταβολή της χωρητικότητας για $W=100, s=200, w=50, h=100$ συναρτήσει του d και με παράμετρο το ϵ_r	142
Σχ. 86 Διάταξη ηλεκτροδίων για τον υπολογισμό σχετικών διηλεκτρικών σταθερών.....	156
Σχ. 87 Κύκλωμα για την μέτρηση της χωρητικότητας της διάταξης των ηλεκτροδίων.....	157

Λίστα από πίνακες

Πίνακας 1. Ευαισθησία της διηλεκτρικής σταθεράς του αέρα στην θερμοκρασία, μερικές πιέσεις, αέρα, νερού, CO ₂ και υγρασία από πολλές πηγές για πρότυπο αέρα (T=293.15K, P _d =100kPa, P _w =117.5kPa, P _c =30Pa).	34
Πίνακας 2. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των κυκλωμάτων μέτρησης χωρητικότητας	45
Πίνακας 3. Ιδιότητες διηλεκτρικών υλικών που χρησιμοποιήσαμε.....	75
Πίνακας 4. Λίστα παραμέτρων των προσομιώσεων για την γεωμετρία στο Σχ. 54	109
Πίνακας 5. Συγκεντρωτικός πίνακας γεωμετριών που μοντελοποιήθηκαν	138

Ευχαριστίες

Η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Μικροηλεκτρονικής του Εθνικού Μετσόβειου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη του καθηγητή Ι. Ν. Αβαριτσιώτη.

Η εκπόνηση μιας διατριβής αποτελεί μια ιδιαίτερα απαιτητική διαδικασία κατά την οποία η ουσιαστική βοήθεια και η ψυχολογική συμπαράσταση πολλών ανθρώπων είναι ανεκτίμητη. Σε όλους αυτούς είμαι βαθύτατα υποχρεωμένος, τουλάχιστον να να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες.

Θέλω να ευχαριστήσω θερμά των επιβλέπων καθ. Ι. Ν. Αβαριτσιώτη. Με την αποδοχή μου ως υποψήφιου διδάκτορα είχα πρόσβαση στον απαιτούμενο επιστημονικό εξοπλισμό για την άρτια εκπόνηση της παρούσας διατριβής και η συμμετοχή μου στις δραστηριότητες του εργαστηρίου διεύρυνε τους ορίζοντες μου στην επιστημονική γνώση. Σε κάθε φάση κατά την εκπόνηση της διατριβής η καθοδήγηση και οι συμβουλές του ήταν ανεκτίμητες.

Οι συνάδελφοι μου διδάκτορες Δημήτριος Βλάχος, Κωνσταντίνος Παπαδόπουλος, Νεστορας Ευμορφόπουλος, Δημήτριος Φραγκούλης, Παναγιώτης Δημητρόπουλος και Αθανάσιος Κόλλιας υπήρξαν εκτός από φίλοι και καλοί συνάδελφοι..

Τέλος θα πρέπει να τονίσω ιδιαίτερα την αμέριστη συμπαράσταση και υπομονή της μέλλουσας συζύγου μου Μαρίας..

Αθήνα,
Δεκέμβριος 2004

Οργάνωση της διατριβής

Η παρούσα διατριβή απαρτίζεται από τέσσερα κύρια μέρη.

Στο πρώτο μέρος θα γίνει μία εισαγωγή και παρουσίαση των αισθητήρων τύπου χωρητικότητας. Αναφορές γίνονται σε ήδη υλοποιημένους αισθητήρες με ποικίλες τεχνολογικές εφαρμογές. Στόχος είναι ο αναγνώστης να εισαχθεί στις δυνατότητες τους και στα πεδία επιστημονικής έρευνας για αισθητήρες αυτού του τύπου.

Στο επόμενο μέρος γίνεται μία σύντομη παρουσίαση της Ηλεκτροστατικής. Περιγράφονται βασικές αρχές, μέθοδοι, και προβλήματα. Γίνεται εκτενής αναφορά στα απαιτούμενα ηλεκτρονικά κυκλώματα για την οδήγηση και την εξαγωγή της πληροφορίας από αυτούς. Εδώ αξίζει να σημειώσουμε ότι μόνο χάρη στην εξέλιξη των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων κατέστη δυνατή σήμερα η ευρεία χρήση αισθητήρων αυτού του τύπου σε διαρκώς αυξανόμενο αριθμό τεχνολογικών εφαρμογών

Κατόπιν θα γίνει εκτενής περιγραφή της έρευνας που πραγματοποιήσαμε πάνω σε αισθητήρες χωρητικότητας για την μέτρηση σε πραγματικό χρόνο του «περιεχόμενου ύδατος» προϊόντος σε γραμμή παραγωγής. Γίνεται παρουσίαση με λεπτομέρεια της αρχής λειτουργίας, των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και της εγκατάστασης σε πραγματικό βιομηχανικό περιβάλλον. Ακολουθεί εκτενής θεωρητική μελέτη. Η σύγκριση των πειραματικών με θεωρητικά αποτελέσματα καθώς και τα αποτελεσμάτων της προσομοίωσης μας επέτρεψε να αναδείξουμε την αναμενόμενη συμπεριφορά των αισθητήρων αυτού του τύπου. Καταληγοντας δώσαμε κανόνες σχεδίασης για την αισθητήρια κεφαλή και την τοποθέτησή της στην εκάστοτε γραμμή παραγωγής.

Από την εμπειρία που αποκτήθηκε θέσαμε τις βάσεις για ένα νέο σύστημα με τελικό στόχο την χρήση του ως «κάμερα χωρητικότητας». Το σύστημα περιλαμβάνει έναν μεγάλο αριθμό από στοιχεία χωρητικότητας σε διδιάστατη διάταξη στο επίπεδο και θα επιτρέψει την απεικόνιση της κατανομής σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς των υλικών που βρίσκονται πάνω από την διάταξη των αισθητήρων.

I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

I.1 Γενικά

Οι αισθητήρες μπορούν να θεωρηθούν τα «μάτια» και «αυτιά» κάθε συστήματος που απαιτεί πληροφορία για το περιβάλλον που βρίσκεται. Σε πολλά συστήματα η απαιτούμενη πληροφορία παρέχεται κατευθείαν από τον άνθρωπο υπό την μορφή εντολών ή δεδομένων όπως για παράδειγμα η εισαγωγή δεδομένων σε ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή ή η οδήγηση ενός αυτοκινήτου. Σε άλλες περιπτώσεις κατάλληλοι αισθητήρες παρέχουν στον άνθρωπο πληροφορία για φαινόμενα που δεν είναι αντιληπτά άμεσα σε αυτόν μέσω των αισθήσεων που διαθέτει, όπως για παράδειγμα το ηλεκτροστατικό πεδίο.

Στην δεύτερη αυτή κατηγορία αισθητήρων εντάσσονται και οι αισθητήρες χωρητικότητας που μελετά η παρούσα διατριβή. Οι αισθητήρες αυτού του τύπου επιτρέπουν την μέτρηση και τεχνολογική αξιοποίηση των φαινομένων που εντάσσονται στην επιστημονική περιοχή του ηλεκτροστατικού πεδίου. Το ηλεκτροστατικό πεδίο δεν είναι άμεσα αντιληπτό από τις ανθρώπινες αισθήσεις. Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες επιτρέπουν την μετατροπή του σε προσιτή για εμάς πληροφορία.

Το γεγονός ότι το ηλεκτροστατικό πεδίο δεν είναι άμεσα αντιληπτό από τις ανθρώπινες αισθήσεις δεν θα πρέπει να μειώσει την αξία του. Όπως θα φανεί και παρακάτω, αισθητήρες βασισμένοι σε αυτό έχουν ευρύ φάσμα τεχνολογικών εφαρμογών.

I.1.1 Ιστορική διαδρομή

Όπως σχεδόν με όλα τα επιστημονικά αντικείμενα μελέτης, η μελέτη των αισθητήρων χωρητικότητας ξεκινά με την ανακάλυψη του αντιστοίχου φυσικού φαινομένου. Μόνο μετά την ανακάλυψη του φαινομένου αρχίζει η προσπάθεια κατανόησης και εξαγωγής των φυσικών νόμων που το διέπουν. Στόχος είναι το αντίστοιχο φαινόμενο τελικά να ελεγχθεί και να χρησιμοποιηθεί προς το όφελος του ανθρώπου.

Στην περίπτωση των αισθητήρων χωρητικότητας η ιστορία τους ξεκινά με την ανακάλυψη του πρώτου πυκνωτή, το δοχείου Leyden (Leyden Jar). Ανακαλύφθηκε γύρω στα 1745 σχεδόν ταυτόχρονα από δύο φυσικούς. Τον Petter van Musschenbroek του Πανεπιστημίου του Leyden και τον Ewald Georg von Kleist [1]. Η αρχική συσκευή αποτελείται από ένα γυάλινο δοχείο με μεταλλικό περίβλημα που περιέχει νερό. Ένα μεταλλικό καρφί ή σύρμα προεξέχει από το πώμα του δοχείου μέσα στο νερό. Το δοχείο φορτίζεται κρατώντας το στο ένα χέρι και φέρνοντας το σε επαφή με μία γεννήτρια στατικών ηλεκτρικών φορτίων. Όταν η ηλεκτρική επαφή με την γεννήτρια διακόπτεται και το άλλο χέρι ακουμπά στο σύρμα η αποφόρτιση που λαμβάνει χώρα γίνεται αντιληπτή ως ένα δυνατό ηλεκτροσόκ.

Πέρασε περισσότερο από ένας αιώνας πριν ο Maxwell παρουσιάσει την διατριβή του [2] πάνω στον ηλεκτρομαγνητισμό και δοθεί ο ακριβής ορισμός της χωρητικότητας.

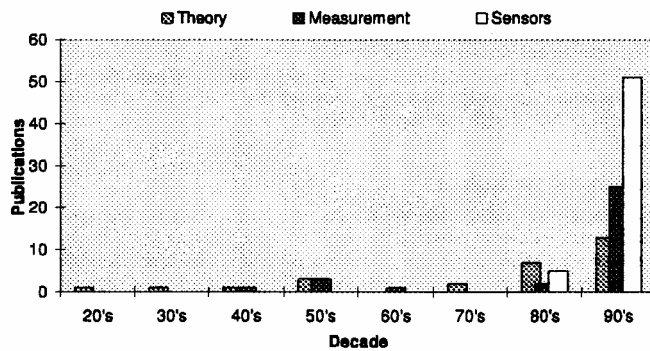
Με την ανακάλυψη της ηλεκτρονικής λυχνίας κενού πυκνωτές χρησιμοποιούνται ήδη για έναν περίπου αιώνα. Ωστόσο η μέτρηση μικρών τιμών της χωρητικότητας με ακρίβεια θεωρείτο αρκετά δύσκολη και η χρήση τους περιοριζόνταν σε εφαρμογές όπου ακριβής τιμή της χωρητικότητας δεν απαιτούνταν.

Εως την δεκαετία του 1950 η κυριότερη έρευνα ήταν για τη σταθερότητα των πυκνωτών που χρησιμοποιούνταν σε ταλαντωτές LC στους εκπομπούς και δέκτες ραδιοκυμάτων. Στην περίοδο αυτή υπάρχουν πολλές αναφορές πάνω στους παράγοντες που επηρεάζουν την σταθερότητα της τιμής της χωρητικότητας όπως για παράδειγμα η επίδραση της υγρασίας στην χωρητικότητα.

Σταθμός στην εξέλιξη τους αποτέλεσε η δυνατότητα μέτρησης με ακρίβεια της τιμής της μέσω της διάταξης γέφυρας χωρητικότητας [3][4], από τον Thompson του National Standards Laboratory of Sidney, Australia. Αυτός μαζί με τον συνεργάτη του Lampard [5][6], ανακάλυψαν και μια επακριβώς υπολογιζόμενη χωρητικότητα θέτοντας τις βάσεις για την μετρολογία των πυκνωτών.

Σύντομα με την κατασκευή πυκνωτών ακριβείας και ηλεκτρονικών οργάνων μέτρησης της χωρητικότητας μια νέα εποχή ξεκίνησε για τους αισθητήρες χωρητικότητας. Η εξέλιξη οδήγησε σε φθηνές και εύχρηστες ηλεκτρονικές συσκευές για την μέτρηση της χωρητικότητας κατά τις δεκαετίες του 1970 και 1980.

Από το 1980 ξεκίνησε η ραγδαία ανάπτυξη αισθητήρων βασισμένων στην χωρητικότητα. Αυτό καταμαρτυρά άλλωστε η εκθετική αύξηση του αριθμού δημοσιεύσεων ανά έτος σχετικών με αυτούς, που παραρηρούμε τις τελευταίες δεκαετίες [7] όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα



Σχ. 1 Κατανομή δημοσιεύσεων πάνω σε αισθητήρες χωρητικότητας τις τελευταίες δεκαετίες.

I.1.2 Φυσιολογία

Ισως τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα εξελιγμένων αισθητήρων απαντούνται στην φύση. Για παράδειγμα το ανθρώπινο μάτι που επιτρέπει την όραση και είναι προϊόν μακράς βιολογικής εξέλιξης και φυσικής επιλογής. Ως αισθητήρας αποτελεί εκθαμβωτικό παράδειγμα των δυνατοτήτων της φύσης και οι επιδόσεις πολλών σύγχρονων οπτικών αισθητήρων υστερούν κατα πολύ σε σύγκριση.

Η αναζήτηση στην φύση για αισθητήρες χωρητικότητας ή αίσθηση μέσω ηλεκτρικού πεδίου παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς θα έδινε μία σαφή ένδειξη των δυνατοτήτων τους και πιθανόν να ήταν πηγή εμπνευσης.

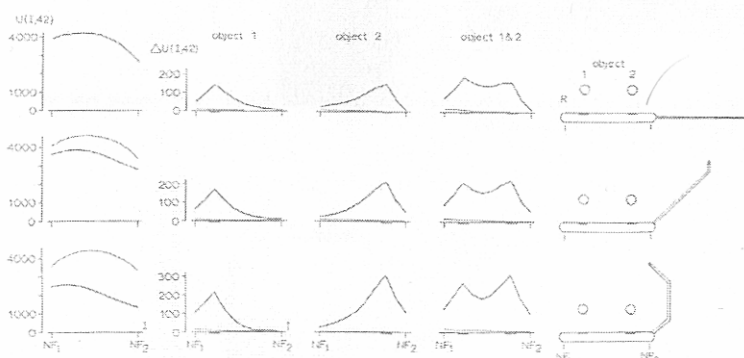
Απο την βιολογία γνωρίζουμε ότι υπάρχουν δύο τουλάχιστον οικογένειες ιχθύων που διαθέτουν δυνατότητες αίσθησης μέσω ηλεκτροστατικού πεδίου Τα είδη αυτά που ανήκουν στις οικογένειες Mormyriiformes και Gymnotoidei απαντούνται στην Νότιο Αμερική και την Αφρική. Επειδή αίσθηση τέτοιου τύπου ότι δεν απαιτεί εξωτερική πηγή φωτος και δεν επηρεάζεται απο την παρουσία οπτικών σκεδαστών όπως λάσπη και ύλη του βυθού αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα για ψάρια που ζούν σε βαθειά και θολά νερά.

Σε όλα αυτά τα είδη με δυνατότητες όρασης μέσω ηλεκτροστατικού πεδίου η ουρά αποτελεί μια ηλεκτρική πηγή που επάγει ηλεκτρικές τάσεις καταμήκος του σώματος που λειτουργεί ως δέκτης. Αν κοντά βρεθεί ένα αντικείμενο με σχετική διηλεκτρική σταθερά διαφορετική από αυτή του νερού η κατανομή του δυναμικού αλλάζει και έτσι γίνεται αντιληπτή η παρουσία του αντικειμένου.

Πειράματα απέδειξαν ότι αυτό που γίνεται αισθητό είναι πράγματι η σχετική διηλεκτρική σταθερά των αντικειμένων γύρω από το ψάρι. Στα πειράματα αυτά παρατηρεί κάποιος ότι το ψάρι προσπαθεί παντα να βρίσκεται σε σταθερή απόσταση από διηλεκτικά αντικείμενα που τοποθετούνται στο νερό. Με κατάλληλη επιλογή

των υπόλοιπων, οπτικών και ακουστικών ιδιοτήτων των αντικειμένων αποκλείστηκε η συμπεριφορά αυτή να οφείλεται σε άλλα φυσικά ερεθίσματα οπτικά ή ακουστικά.

Χαρακτηριστική μάλιστα είναι η τάση τέτοιων ψαριών συχνά να λυγίζουν την ουρά τους γύρω από αντικείμενα που εστιάζεται το ενδιαφέρον τους. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται ένα μοντέλο προσομοίωσης που προσπαθεί να εξηγήσει αυτή την συμπεριφορά. Όπως φαίνεται, με κυρτωμένη ουρά το πεδίο εστιάζεται καλύτερα, αυξάνεται η διακριτική ικανότητα και κατ'ουσίαν το ψάρι μπορεί να «βλέπει καλύτερα».



Σχ. 2 Αριθμητική προσομοίωση της αίσθησης μέσω ηλεκτρικού πεδίου

I.2 Σύγχρονοι αισθητήρες χωρητικότητας

I.2.1 Ορισμός

Οι αισθητήρες χωρητικότητας με χρήση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων μετρούν με ακρίβεια την χωρητικότητα μεταξύ δύο ή περισσότερων αγωγών σε ένα περιβάλλον διηλεκτρικών συνήθως αέρας ή υγρό. Σχετική είναι και η τεχνική μετρησης του ηλεκτροστατικού πεδίου που δημιουργείται σε ένα σύστημα αγωγών, διηλεκτρικών και μετράται με την βοήθεια ενός κατάλληλου ακροδέκτη (probe) μέσω ενισχυτή μεγάλης σύνθετης αντίστασης εισόδου [8].

Μία μεγάλης συχνότητας εναλλασόμενη διέγερση χρησιμοποιείται συνήθως καθώς η σύνθετη αντίσταση ενός απλού πυκνωτή παραλλήλων πλακών με αέρα ως διηλεκτρικό είναι της τάξης εκατοντάδων MOhms στην περιοχή των ακουστικών συχνοτήτων. Χρησιμοποιώντας διέγερση στην περιοχή άνω των 100KHz η σύνθετη αντίσταση του αισθητήρα χωρητικότητας μειώνεται σε εκατοντάδες KOhms και μετράται πιο εύκολα.

Σε πολλά συστήματα το περιβάλλον χρησιμοποιείται ως διαδρομή επιστροφής για τα επαγόμενα από τις χωρητικότητες ρεύματα. Ένα άτομο για παράδειγμα που βρίσκεται σε ένα δωμάτιο και στηρίζεται πάνω σε μία μονωτική διηλεκτρική πλάκα παρουσιάζει χωρητικότητα αρκετών pF ως προς το δάπεδο και τους τοίχους του δωματίου. Συνήθως όμως το κύκλωμα που διαρέεται από τα επαγόμενα ρεύματα καθορίζεται μέσω ηλεκτροδίων και αγωγών διασύνδεσης.

I.2.2 Ιδιότητες

Οι αισθητήρες χωρητικότητας μπορούν να δώσουν απάντηση σε ποικίλα προβλήματα ανίχνευσης και μέτρησης. Μπορούν πολύ εύκολα να κατασκευαστούν σε μία πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος ή να ολοκληρωθούν σε μία ψηφίδα πυριτίου. Παρέχουν σχεδόν άπειρη διακριτική ικανότητα χωρίς την ανάγκη φυσικής επαφής. Χρησιμοποιούνται για την μέτρηση γραμμικής ή γωνιακής μετατόπισης, στάθμης υγρών, κατασκευή διακοπών πληκτρολογίων, ως διακόπτες τερματισμού διαδρομής ή ανίχνευσης εγγύτητας αντικειμένων, και ως touch panels για οθόνες υπολογιστών. Πολλά ευαίσθητα μικρόφωνα είναι χωρητικού τύπου ενώ τα περισσότερα επιταχυνσιόμετρα βασίζονται σε αισθητήρες χωρητικότητας. Κάθε μέρα οι μηχανικοί βρίσκουν και νέες εφαρμογές των αισθητήρων αυτού του τύπου και τους εμπιστεύονται όλο και περισσότερο αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματά τους.

Οι αισθητήρες χωρητικού τύπου μπορούν να μένουν ανεπηρέαστοι από την θερμοκρασία την υγρασία ή τις μηχανικές ανοχές. Η θωράκιση του από τις εξωτερικές διαταραχές του ηλεκτρικού πεδίου είναι απλούστατη σε σχέση με τους αισθητήρες επαγωγικού τύπου. Η ακρίβεια και η ευκολία κατασκευής των αισθητήρων είναι εξαιρετική καθώς σε πολλές περιπτώσεις τα ηλεκτρόδια που καθορίζουν την συμπεριφορά του αισθητήρα μπορούν να κατασκευαστούν με απλές τεχνικές φωτολιθογραφίας και με μηχανικές ανοχές της τάξης του μικρόμετρου. Μπορούν άμεσα να ολοκληρωθούν πάνω σε ψηφίδες πυριτίου και συνεχώς αντικαθιστούν μετατροπείς βασισμένους στο φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού ή της πιεζοαντίστασης καθώς είναι πιο απλοί στην κατασκευή και η σταθερότητα και η ευαισθησία τους έναντι της θερμοκρασίας είναι δέκα φορές καλύτερη. Είναι ιδανικοί για την κατασκευή φορητών οργάνων καθώς για την λειτουργία τους απαιτούν ελάχιστη ηλεκτρική ισχύ αυξάνοντας την διάρκεια ζωής της μπαταρίας σε αρκετά χρόνια.

Παράγοντες που εμπόδιζαν μέχρι πρόσφατα την ευρεία διάδοση τους ήταν τα εξειδικευμένα ηλεκτρονικά κυκλώματα που χρειάζονται και η έλλειψη τεχνογνωσίας πάνω στην τεχνολογία τους. Επίσης πολλοί μηχανικοί τους θεωρούσαν μη γραμμικούς και ότι δεν μπορούν να λειτουργήσουν σε ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας. Με την ραγδαία όμως εξέλιξη των ολοκληρωμένων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων κατέστη δυνατό να αξιοποιηθούν και να βρίσκουν

διαρκώς νέες εφαρμογές. Έτσι μπορούμε σήμερα να θεωρούμε ότι είναι ανθεκτικοί, αξιόπιστοι, ακριβείς και χαμηλού κόστους αισθητήρες.

Στις επόμενες ενότητες θα παρουσιαστούν διάφοροι τύποι χωρητικών αισθητήρων και πεδία εφαρμογής τους. Κατόπιν θα γίνει μια σχετικά μακροσκελής αναφορά στην θεωρία των αισθητήρων αυτού του τύπου καθώς και βασικών αρχών της ηλεκτροστατικής σε επόμενη ενότητα. Αυτό θα αποτελέσει και το θεωρητικό υπόβαθρο για την καλύτερη κατανόηση του κυρίως μέρους της διατριβής.

Θα αναφερθώ επίσης σε αυτό το κομμάτι και στα βασικά κυκλώματα που απαραίτητα συνοδεύουν τους χωρητικούς αισθητήρες παρουσιάζοντας την βασική αρχή, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα καθενός από αυτά.

I.3 Εφαρμογές

Οι αισθητήρων χωρητικότητας έχουν μεγάλο φάσμα εφαρμογών. Στην περιοχή μικρών διαστάσεων έχουμε την αξιοποίηση τους σε ολοκληρωμένα μικρο-συστήματα πάνω σε ψηφίδες πυριτίου. Για παράδειγμα συστήματα επιταγχοσυνομέτρων όπου μετράται με ακρίβεια η χωρητικότητα μεταξύ προβόλων από πυρίτιο σχηματισμένων με τεχνικές ολοκληρωμένων μικρομηχανικών συστημάτων για των υπολογισμό των μετατοπίσεων. Επίσης πληθώρα μικροσυστημάτων μέτρησης πίεσης μέσω μέτρησης αλλαγών της χωρητικότητας μικρομεμβρανών. Στα συστήματα αυτά η μέγιστη διάσταση είναι της τάξης μερικών εκατοντάδων μm και η αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων μερικά μm . Αλλά και στην περιοχή μεγάλων διαστάσεων έχουμε πληθώρα συστημάτων, όπως για τον εντοπισμό παρουσίας ανθρώπων και αντικειμένων με σχετικά με διαστάσεις ηλεκτροδίων της που φθάνουν και το ένα μέτρο.

Ακολουθεί μία λίστα από εφαρμογές που καταδुकνύει την ευρεία περιοχή προβλημάτων και εφαρμογών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν με επιτυχία αισθητήρες χωρητικότητας.

Αισθητήρες εγγύτητας (Proximity sensors)

**Εντοπισμός
ανθρώπινης
παρουσίας**

Ενεργοποίηση συστήματος ασφαλείας όταν υπάρχει ανθρώπινη παρουσία πολύ κοντά σε μηχανήματα.

Ανίχνευση γειτονικών αντικειμένων σε βραχίονες ρομπότ για αποφυγή τους.

Χωρητικού τύπου αισθητήρες εγγύτητας με εύρος ανίχνευσης πάνω από 1m μπορούν να ενσωματωθούν στις θέσης

φωτισμού σε οικιακή ή βιομηχανική χρήση για εξοικονόμηση ενέργειας

Σε συστήματα ασφάλειας οχημάτων για την ενεργοποίηση του αερόσακου ανάλογα με την κατάλληλη ή όχι θέση από επιβάτη.

Τερματοδιακόπτες

Μετρώντας την χωρητικότητα μεταξύ δύο ηλεκτροδίων μπορούμε να εντοπίσουμε πότε ένα αντικείμενο έρχεται σε γεινίαση με αυτά και να ενεργοποιήσουμε κατάλληλο διακόπτη on/off.

Ανίχνευση Οχημάτων

Σε διασταυρώσεις ή θέσεις στάθμευσης οχημάτων εναλλακτικά των βρόγχων πηνίων αυτεπαγωγής. Μπορούν να δώσουν σήμα ακόμη και για ακινητοποιημένα οχήματα.

Αισθητήρες μέτρησης

Ροή

Ανάλογα της είδος επιθυμούμενης μέτρησης ροής όγκου ή μάζας τα διαφορα ροόμετρα την μετατρέπουν σε μέτρηση διαφοράς πίεσης ή μετατόπισης ή και δύναμης. Αισθητήρες χωρητικότητας χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της αυτών με ακρίβεια.

Πίεση

Για αέρια ή συμπιεστά ρευστά η πίεση τους μπορεί να μετρηθεί ευθέως ως αλλαγή της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς ή της εφαπτωμένης γωνίας ωμικών απωλειών.

Εναλλακτικά με χρήση ελαστικής μεμβράνης και μέτρηση με ακρίβεια της μετατόπισής της.

Σταθμη δεξαμενων

Χωρητικοί αισθητήρες μέτρησης σταθμης υγρών χρησιμοποιούν παράλληλα ηλεκτρόδια εμβαπτισμένα στο υγρό ή τοποθετημένα στην εξωτερική πλευρά δεξαμενών

κατασκευασμένων από διηλεκτρικό υλικό και μετατρέπουν την μετρούμενη χωρητικότητα που είναι ανάλογη της πλήρωσης της δεξαμενής σε ένδειξη στάθμης.

Απόσταση

Εάν ένα μεταλλικό ηλεκτρόδιο βρίσκεται σε κοντινή απόσταση από ένα δεύτερο ηλεκτρόδιο η μεταξύ τους χωρητικότητα που προσεγγίζει αυτή του πυκνωτή παραλλήλων πλακών επιτρέπει την μέτρηση με ακρίβεια της μεταξύ τους απόστασης από την γνωστή σχέση για παράλληλο πυκνωτή.

Πάχος

Εάν ένα γνωστής διηλεκτρικής σταθεράς υλικό τοποθετηθεί μεταξύ των ηλεκτροδίων ενός πυκνωτή παράλληλων πλακών η μετρούμενη χωρητικότητα εξαρτάται μόνο από το πάχος του υλικού.

Ανίχνευση πάγου

Ανίχνευση σχηματισμού πάγου στα φτερά των αεροπλάνων μπορεί να πραγματοποιηθεί παρακολουθώντας την χωρητικότητα μεταξύ μονωμένων ηλεκτροδίων τοποθετημένων σε αυτά.

Γωνιακή ή γραμμική μετατόπιση

Με κατάλληλες περιοδικές διατάξεις κινούμενων και ακίνητων ηλεκτροδίων μπορούμε να μετατρέψουμε με ακρίβεια την σχετική τους απόσταση σε αλλαγές χωρητικότητας. Λόγω της μή επαφής μεταξύ των ηλεκτροδίων η διάρκεια ζωής τέτοιων συστημάτων είναι πρακτικά απεριόριστη

Αλληλεπίδραση Ανθρώπου μηχανής

Touch screen Μέσω κατάλληλα διαμορφωμένων διαφάνων ωμικών γυαλινων φύλλων μπροστά από μία οθόνη υπολογιστή δημιουργείται ένα ομοιόμορφο ηλεκτρικό πεδίο στους άξονες X,Y. Μετρώντας τα ρευματα διαρροής μέσω ανθρώπινου δακτύλου ως προς την γη μπορούμε να υπολογίσουμε τις συντεταγμένες της θέσης του στην οθόνη.

Πληκτρολόγια αφής Τοποθετώντας μικρά ηλεκτρόδια πίσω από ένα διηλεκτρικό υλικό συνήθως γυαλί μπορούμε να εντοπίζουμε την παρουσία δακτύλου ή όχι μπροστά από το διηλεκτρικό λόγω της παρασιτικής χωρητικότητας που παρουσιάζει το ανθρώπινο σώμα με τον περιβάλλοντα χώρο και να ενεργοποιούμε το αντίστοιχο σύμβολο όπως στα συμβατικά πληκτρολόγια.

Αισθητήρες απεικόνισης

Ηλεκτρική χωρητική τομογραφία (ECT) Περιβάλλοντας έναν βιομηχανικό αντιδραστήρα ή αναμικτήρα με ηλεκτρόδια μπορούμε σε πραγματικό χρόνο να παρατηρούμε μέσω αναγωγής των αμοιβαίων χωρητικοτήτων μεταξύ των υλεκτροδίων σε κατανομή σχετικών διηλεκτρικών σταθερών και την κατανομή των υλικών στον αντιδραστήρα ή τον αναμικτήρα.

Βιοχημικές διεργασίες Τοποθετούμε πάνω από ένα πυκνωτή επάλληλων ηλεκτροδίων (interdigitated) την ουσία που θέλουμε να παρατηρήσουμε. Καταγράφοντας της χρονική εξέλιξη της μετρούμενης χωρητικότητας μπορούμε να εξαaguμε συμπεράσματα για την πορεία της διαδικασίας και τα φαινόμενα που συμβαίνουν όπως για παράδειγμα με την πήξη κόλλας ή την ανάπτυξη βακτηριδίων.

Απεικόνιση τάσεων Μια διδιάστατη διάταξη μικροαισθητήρων πίεσης

εμφυτευμένων σε ελαστική μεμβράνη απεικονίζουν τις τάσεις στην διεπιφάνεια δύο μέσων

Βιομετρία

Ολοκληρωμένοι αισθητήρες αναγνώρισης δακτυλικών αποτυπωμάτων (fingerprint sensors)

II. ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΗ

II.1 Ηλεκτροστατικό Πεδίο

II.1.1 Γενικά

Η επιστήμη της Ηλεκτροστατικής μελετά την φυσική των στατικών ηλεκτρικών φορτίων, ηλεκτρικών αγωγών και διηλεκτρικών παρουσία DC ηλεκτρικών πηγών τάσης. Πολλά προβλήματα χωρητικών αισθητήρων περιγράφονται από το μοντέλο του απλού πυκνωτή παράλληλων πλακών και δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερη δυσκολία στην μελέτη τους. Ωστόσο σε αρκετές περιπτώσεις η λειτουργία τους βασίζεται σε πιο πολύπλοκες διατάξεις ηλεκτροδίων απαιτώντας επιπλέον ανάλυση. Στις μεθόδους της Ηλεκτροστατικής περιλαμβάνονται κλειστές αναλυτικές λύσεις προβλημάτων, γραφική σχεδίαση του ηλεκτρικού πεδίου, το χαρτί Teledeltos, και μοντελοποίηση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε Y/H. Η τελευταία αποκτά καθημερινά μεγαλύτερη βαρύτητα δεδομένης της εξέλιξης των Y/H και της αδυναμίας υπολογισμού αναλυτικών σχέσεων πέρα από μερικές βασικές γεωμετρίες ηλεκτροδίων.

II.1.2 Ηλεκτρικά φορτία και πεδία

Η δύναμη μεταξύ δύο σημειακών ηλεκτρικών φορτίων Q_1 και Q_2 μέσα σε υλικό σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_r που απέχουν απόσταση r περιγράφεται από τον νόμο του Coulomb,

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \quad (1)$$

όπου ϵ_0 η διηλεκτρική σταθερά του κενού, και ϵ_r η σχετική διηλεκτρική σταθερά του χώρου.

$$\epsilon_0 = 8.8541878 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m} \quad (2)$$

Κάθε υλικό έχει σχετική διηλεκτρική σταθερά ϵ_r μεγαλύτερη από αυτή του κενού δηλαδή της μονάδος, κυμαίνεται μεταξύ 2-10 για τα περισσότερα στερεά υλικά και είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερη για τα περισσότερα υγρά. Αναλυτικός πίνακας τιμών δίνεται στο Παράρτημα.

Μονάδα μέτρησης του ηλεκτρικού φορτίου είναι το 1 **Coulomb** που είναι μεγάλη ποσότητα σε σχέση με τις τιμές που συναντάμε στην πράξη

II.1.3 Εξισώσεις ηλεκτροστατικού πεδίου

Το ηλεκτροστατικό πεδίο αποτελεί ειδική περίπτωση των εξισώσεων Maxwell, με τις οποίες περιγράφονται οι φυσικοί νόμοι που διέπουν το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Οι εξισώσεις περιγραφής του προκύπτουν από τις εξισώσεις Maxwell με μηδενισμό των χρονικών παραγώγων του πεδίου εφόσον αναφερόμαστε σε στατικό πεδίο και είναι

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad \{\text{Νόμος του Faraday}\} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_c \quad \{\text{Νόμος του Gauss}\} \quad (4)$$

όπου \vec{E} το διάνυσμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, \vec{D} το διάνυσμα της διηλεκτρικής μετατόπισης, και ρ_c η πυκνότητα ελευθερών φορτίων.

Τα διανύσματα \vec{E} , \vec{D} συνδέονται μεταξύ τους με της συντακτικές σχέσεις του μέσου που βρίσκεται σε κάθε σημείο του πεδίου,

$$\vec{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E} \quad (5)$$

Επιπλέον στο σύνορο μεταξύ δύο διαφορετικών υλικών 1 και 2 προκύπτουν από τις εξισώσεις Maxwell οι παρακάτω συνοριακές συνθήκες μετάβασης του πεδίου

$$(\vec{E}_2 - \vec{E}_1) \times \vec{n} = 0 \quad (6)$$

$$(\vec{D}_2 - \vec{D}_1) \cdot \vec{n} = \sigma \quad (7)$$

όπου \vec{n} το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα στην διεπιφάνεια μεταξύ των μέσων και σ η επιφανειακή πυκνότητα ελεύθερου φορτίου.

II.1.4 Εξισώσεις Laplace και Poisson

Λόγω της Εξ. 3 η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να γραφεί και ως

$$\vec{E} = -\nabla \cdot V \quad (8)$$

όπου V ορίζεται ως το ηλεκτροστατικό δυναμικό. Με τον τρόπο αυτό ο νόμος του Faraday ικανοποιείται αυτόματα ενώ με αντικατάσταση στο νόμο του Gauss (Εξ. 4) έχουμε την παρακάτω εξίσωση

$$\nabla(\epsilon_r \epsilon_o \nabla \cdot V) = -\rho_c \quad \{\text{Εξίσωση Poisson}\} \quad (9)$$

και ειδικότερα για μηδενικά ελεύθερα φορτία στον χώρο και ομοιογενή υλικά

$$\nabla^2 V = 0 \quad \{\text{Εξίσωση Laplace}\} \quad (10)$$

Καθε λύση των δύο παραπάνω εξισώσεων ικανοποιεί αμφότερες τις εξισώσεις του ηλεκτροστατικού πεδίου και παριστά ένα ηλεκτροστατικό πεδίο. Στόχος της ανάλυσης είναι να βρεθεί η λύση που ικανοποιεί τις συνθήκες στο σύνορο του εκάστοτε προβλήματος.

Ανάλογα τώρα με τις συνοριακές συνθήκες που επιβάλλονται διακρίνουμε δύο τύπους ηλεκτροστατικών προβλημάτων. Προβλήματα Dirichlet όπου είναι γνωστό το ηλεκτροστατικό δυναμικό σε κάθε σημείο του συνόρου και προβλήματα Newman όπου περιγράφεται η κλίση δυναμικού σε κάθε σημείο του συνόρου.

II.1.5 Διηλεκτρικά

Όταν ένα εξωτερικά επιβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο εφαρμοστεί σε ένα μη αγώγιμο υλικό αυτό συνήθως πολώνεται, έχουμε δηλαδή μετακίνηση των ηλεκτρικών φορτίων από την θέση ισορροπίας. Όλα τα υλικά αυτής της κατηγορίας ονομάζονται διηλεκτρικά. Η ηλεκτρική πόλωση είναι διανυσματικό μέγεθος συνήθως ανάλογο του εξωτερικά επιβαλλόμενου πεδίου και μπορεί να περιγραφεί με την παρακάτω εξίσωση

$$\vec{P} = \chi_e \epsilon_o \vec{E} \quad (11)$$

όπου η παράμετρος χ_e ονομάζεται ηλεκτρική επιδεκτικότητα. Ως αποτέλεσμα της πολώσεως το φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας στο πολωμένο διηλεκτρικό είναι ίσο με την κάθετη συνιστώσα το διανύσματος πολώσης στην επιφάνεια.

Στην ανάλυση των ηλεκτροστατικών προβλημάτων αντί του συνολικού φορτιού χρησιμοποιούνται μόνο τα ελεύθερα φορτία (δηλαδή τα φορτία των αγωγών) εφόσον το φαινόμενο της πολώσεως λαμβάνεται υπόψιν μέσω της αντικαταστάσεως του ηλεκτρικού πεδίου από το διάνυσμα της διηλεκτικής μετατόπισης που ορίζεται ως

$$\vec{D} = (1 + \chi_e) \vec{E} \quad (12)$$

Ο νόμος του Gauss γράφεται ως

$$\operatorname{div}(\epsilon_0 \vec{E}) = \rho_{free} \quad (13)$$

στο κενό και

$$\operatorname{div}((1 + \chi_e) \vec{E}) = \rho_{free} \quad (14)$$

στο εσωτερικό των διηλεκτρικών υλικών.

II.1.6 Αγωγοί

Μια άλλη μεγάλη κατηγορία υλικών είναι οι αγωγοί. Σε αυτούς το φαινόμενο της ηλεκτρικής πολώσεως είναι τόσο έντονο ώστε τα φορτία που υπάρχουν στο εσωτερικό τους να μετακινούνται ελεύθερα και τελικά κατανέμονται έτσι ώστε το τελικό ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό των αγωγών να είναι μηδενικό. Συνεπώς όλα τα σημεία της επιφάνειας του αγωγού βρίσκονται στο ίδιο δυναμικό και αποτελούν μία ισοδυναμική επιφάνεια του ηλεκτροστατικού πεδίου.

Από την εφαρμογή του νόμου Gauss αποδεικνύεται ότι το φορτίο στο εσωτερικό των αγωγών είναι μηδενικό και όλα τα ελεύθερα φορτία κατανέμονται στην επιφάνεια του αγωγού.

II.1.7 Χωρητικότητα και Μήτρες Χωρητικότητας

Έστω δύο αγωγοί στον χώρο συνδεδεμένοι με πηγή τάσης V . Ο λόγος του φορτίου ενός εκ των αγωγών προς την διαφορά δυναμικού – τάση μεταξύ τους ορίζεται ως η χωρητικότητα C μεταξύ των αγωγών.

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon_0 \oint_+ \vec{E} d\vec{s}}{\int_+ \vec{E} d\lambda} = \frac{\rho_{free}}{V_2 - V_1} \quad (15)$$

Η χωρητικότητα εξαρτάται μόνο από το σχήμα και την θέση των αγωγών καθώς και το υλικό που παρεμβάλεται μεταξύ τους. Είναι δηλαδή καθαρά γεωμετρικό μέγεθος.

Η έννοια της χωρητικότητας μπορεί να επεκταθεί και στην περίπτωση που έχουμε περισσότερους των δύο αγωγούς. Έτσι στην γενικότερη περίπτωση n αγωγών με δυναμικά V_n και αντίστοιχα φορτία Q_n έχουμε την παρακάτω μητρική σχέση

$$\mathbf{Q} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{V} \quad (16)$$

ή

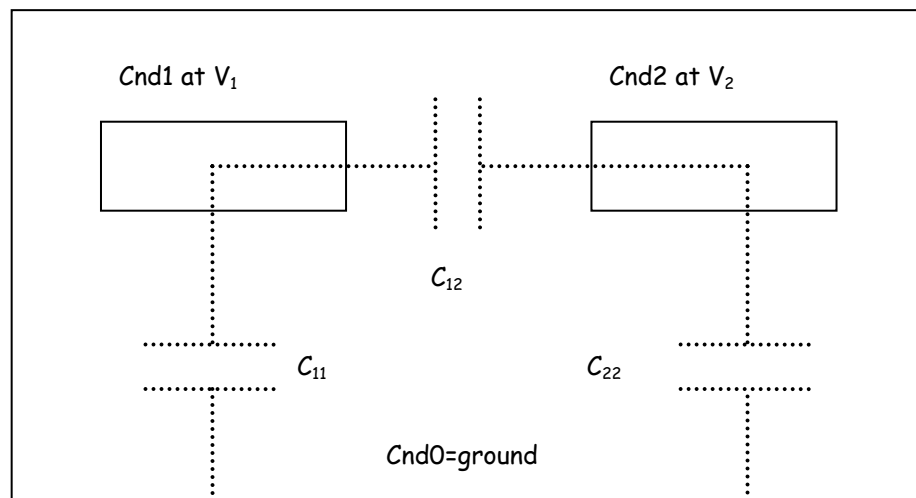
$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ M \\ Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & & \\ & & O & M \\ c_{n1} & & K & c_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ M \\ V_n \end{bmatrix} \quad (17)$$

όπου τα δυναμικά των αγωγών μπορεί να μετρώνται ως προς ένα επιπλέον αγωγό που λαμβάνεται ως αναφορά και έχει μηδενικό δυναμικό ή προς το άπειρο.

Οι συντελεστές c_{nm} στην μήτρα χωρητικότητας παραπάνω εξαρτώνται μόνο απο την γεωμετρία του προβλήματος δηλαδή τις σχετικές θέσης διηλεκτρικών και αγωγών και είναι ανεξάρτητοι της εκάστοτε δέγερσης του προβλήματος καθώς ισχύει πάντα η αρχή της υπερθεσης στο ηλεκτροστατικό πεδίο

II.1.8 Ισοδύναμες συγκεντρωμένες ηλεκτρικές χωρητικότητες

Εδώ πρέπει να αποσαφηνίσουμε την διαφορά μεταξύ των συντελεστων χωρητικότητας που εμφανίζονται στις παραπάνω μήτρες χωρητικότητας και των συγκεντρωμένων ισοδυνάμων χωρητικοτήτων όπως αυτές χρησιμοποιούνται στην ανάλυση ηλεκτρικών κυκλωμάτων.[9] Έστω το σύστημα των αγωγών του παρακάτω σχήματος.



Σχ. 3 Ορισμός ισοδυνάμων συγκεντρωμένων χωρητικοτήτων ηλεκτρικού κυκλώματος

Βάσει όσων έχουμε πει τα φορτία των αγωγών δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις

$$\begin{aligned} Q_1 &= C_{g1}V_1 + C_{gm}V_2 \\ Q_2 &= C_{gm}V_1 + C_{g2}V_2 \end{aligned} \quad (18)$$

Οι συγκεντρωμένες ισοδύναμες ηλεκτρικές χωρητικότητες ηλεκτρικού κυκλώματος που περιγράφουν την χωρητικότητα μεταξύ των αγωγών δίνονται απο τις παρακάτω εξισώσεις.

$$\begin{aligned} Q_1 &= C_{11}V_1 + C_{12}(V_1 - V_2) \\ Q_2 &= C_{22}V_2 + C_{12}(V_2 - V_1) \end{aligned} \quad (19)$$

Εχουμε τις ακόλουθες σχέσεις μεταξύ των παραμέτρων

$$\begin{aligned} C_{12} &= -C_{gm} \\ C_{11} &= C_{g1} + C_{gm} \\ C_{22} &= C_{g2} + C_{gm} \end{aligned} \quad (20)$$

Παρατηρούμε ότι ενώ αριθμητικά οι αμοιβές ή παρασιτικές χωρητικότητες μεταξύ διαφορετικών αγωγών παραμένουν αναλοιώτες ανεξάρτητα της περιγραφής που επιλέγουμε αυτό δεν ισχύει για την περίπτωση που αναφερόμαστε σε ένα αγωγο όπου η αντίστοιχη συγκεντρωμένη ισοδύναμη ηλεκτρική χωρητικότητα προκύπτει ως αθροισμα των επιμέρους χωρητικοτήτων του συγκεκριμένου αγωγού με όλους τους άλλους αγωγούς του συστήματος.

II.1.9 Ολοκλήρωμα Poisson και προβλήματα Dirichlet

Ένα ηλεκτροστατικό πρόβλημα στο οποίο είναι γνωστή η τιμή του δυναμικού σε όλα τα σημεία του συνόρου ονομάζεται πρόβλημα *πρώτου είδους ή Dirichlet*. Αν το σύνορο είναι ο μοναδιαίος κύκλος ή το ανω ημιεπίπεδο με σύνορο τον άξονα των πραγματικών αριθμών τότε η λύση του προβλήματος μπορεί να υπολογιστεί βάσει των σχέσεων που ακολουθούν. Επιπλέον η λύση αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε πληθώρα προβλημάτων των οποίων το σύνορο απεικονίζεται στο μοναδιαίο κύκλο ή τον άξονα των πραγματικών με σύμμορφη απεικόνιση [10].

Συγκεκριμένα η λύση στο εσωτερικό του μοναδιαίου κύκλου στο μιγαδικό επίπεδο δίνεται από το *μιγαδική συνάρτηση δυναμικού Schwarz*

$$\psi(z) + j\phi(z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{e^{j\theta} + z}{e^{j\theta} - z} f(\theta) d\theta \quad (21)$$

όπου $f(\theta)$ η τιμή του δυναμικού στην γωνία θ πάνω στην περιφέρεια του κύκλου και z η θέση στο εσωτερικό του κύκλου που ζητάμε το δυναμικό.

Αν $z = re^{j\theta}$ τότε το πραγματικό μέρος της παραπάνω σχέσης είναι γνωστό ως *ολοκλήρωμα Poisson* και είναι

$$\psi(r, \vartheta) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{1-r^2}{1-2r(\vartheta-\theta)+r^2} f(\theta) d\theta \quad (22)$$

Δυστυχώς το ολοκλήρωμα αυτό σε πολλές περιπτώσεις κατανομών δυναμικού στην περιφέρεια του κύκλου δεν μπορεί να υπολογιστεί ανολυτικά οπότε απαιτείται κάποιας μορφής αριθμητική ολοκλήρωση.

Μια ειδική περίπτωση της παραπάνω έχουμε όταν την περιφέρεια απαρτίζουν ισοδυναμικά τμήματα διαφορετικού δυναμικού. Έστω m τέτεια τμήματα με τιμή δυναμικού ψ_n μεταξύ των γωνιών θ_n, θ_{n+1} τότε το ολοκλήρωμα μετά απο υπολογισμό γίνεται

$$\psi + j\phi = \frac{-1}{2\pi} \sum_{n=1}^m (\theta_{n+1} - \theta_n) \psi_n - \frac{j}{2\pi} \sum_{n=1}^m \psi_n \log \frac{e^{j\theta_{n+1}} - z}{e^{j\theta_n} - z} \quad (23)$$

Στην περίπτωση τώρα του άνω ημιεπιπέδου στο μιγαδικό επίπεδο με σύνορο τον άξονα των πραγματικών ο μετασχηματισμός

$$t = j \left(\frac{1-z}{1+z} \right) \quad (24)$$

δίνει την παρακάτω λύση με συμμορφη απεικόνιση για το μιγαδικό δυναμικό στο άνω ημιεπίπεδο των μιγαδικών

$$\psi + j\phi = \frac{j}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1+ut}{(1+u^2)(t-u)} \psi(u) du \quad (25)$$

όπου $\psi(u)$ η κατανομή δυναμικού κατα μήκος του άξονα των πραγματικών στο μιγαδικό επίπεδο t .

Το πραγματικό μέρος του ολοκληρώματος (ολοκλήρωμα Poisson) είναι

$$\psi = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{v}{(u-x)^2 + v^2} \psi(x) dx \quad (26)$$

όπου $t = u + jv$.

Στην περίπτωση που ο αξονας των πραγματικών στο μιγαδικό επίπεδο αποτελείται από πεπερασμένο αριθμό ισοδυναμικών τμημάτων το παραπάνω ολοκλήρωμα μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό καθώς με χρήση της σύμορφης απεικόνισης πολλά ηλεκτροστατικά προβλήματα απεικονίζονται με σύνορο τον άξονα των πραγματικών άρα μπορούν να περιγραφούν με αναλυτικές εξισώσεις.

II.2 Αποκλίσεις από το Θεωρητικό μοντέλλο

II.2.1 Αποκλίσεις

Στις εφαρμογές αισθητήρων χωρητικότητας επιθυμούμε η συνάρτηση μεταφοράς του συνολικού συστήματος να είναι όσο το δυνατόν πιο σταθερή στο χρόνο. Το σύστημα θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από σταθερότητα και επιλεκτικότητα στην μέτρηση. Δεν θα πρέπει η έξοδος του συστήματος να επηρεάζεται από εξωτερικούς παράγοντες όπως θερμοκρασία, αλλαγές στα υλικά, παραμορφώσεις, παρουσία εξωτερικών αντικειμένων κ.α.

Ωστόσο σε ένα σύστημα που λειτουργεί υπό πραγματικές συνθήκες οι εξωτερικές επιδράσεις είναι αναπόφευκτες και πρέπει να αντιμετωπιστούν κατάλληλα. Εάν η εξωτερική επίδραση μπορεί να μετρηθεί και να υπολογιστεί η επίδρασή της τότε μπορεί να αντιμετωπιστεί απλά με διόρθωση της τελικής εξόδου του συστήματος.

Για κάποιες άλλες είναι αδύνατον να αποφευχθεί η επίδρασή τους στην έξοδο του συστήματος και δεν μπορούν να υπολογιστούν ακριβώς. Για αυτές πρέπει να λαμβάνει χώρα κατάλληλη σχεδίαση των ηλεκτροδίων του αισθητήρα ή του ηλεκτρονικού κυκλώματος μέτρησης ώστε να βελτιώνεται η επιλεκτικότητα του αισθητήρα στο μετρούμενο μέγεθος και να περιορίζεται οι ευασθησία του συστήματος στους υπόλοιπους παράγοντες.

Ακόμη και οι πιο απλές γεωμετρικές ηλεκτροδίων παρουσιάζουν σφάλματα από την θεωρητικά προβλεπόμενη τιμή χωρητικότητας όταν υλοποιούνται στην πράξη. Οι πεπερασμένες διαστάσεις των ηλεκτροδίων, σφάλματα στην ακρίβεια των διαστάσεων γεωμετρική παραμόρφωση των ηλεκτροδίων λόγω τάσεων είναι συνήθεις αιτίες. Μέσω κατάλληλων βοηθητικών ηλεκτροδίων είναι δυνατόν να μειωθεί σημαντικά η απόκλιση μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών μετρήσεων.

Πολλά από τα υλικά που θεωρούνται σταθερά κατά την ανάλυση παρουσιάζουν στην πράξη μικρή μεν αλλά υπαρκτή και πολύπλοκη εξάρτηση από την θερμοκρασία, την σύσταση τις ακριβείς διαστάσεις την παραμόρφωση και άλλους παράγοντες.

Κάθε ένας από τους εξωτερικούς παράγοντες πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν και να εκτιμάται η μέγιστη δυνατή επίδραση που μπορεί να έχει στην τελική έξοδο του συστήματος.

II.2.2 Επίδραση της υγρασίας στην διηλεκτρική σταθερά του αέρα

Στα περισσότερα συστήματα αισθητήρων χωρητικότητας το μετρούμενο μέγεθος είναι ο λόγος της μετρούμενης χωρητικότητας προς μία χωρητικότητα αναφοράς. Ο λόγος αυτός σχετίζεται με το πραγματικά μετρούμενο μέγεθος. Εάν και οι δύο πυκνωτές μετρούμενος και αναφοράς είναι της ίδιας κατασκευής τότε πολλά από τα φαινόμενα που προκαλούν

σφάλματα και αποκλίσεις στην μέτρηση αναιρούνται και η ακρίβεια μέτρησης βελτιώνεται. Έτσι εάν αμφότεροι οι πυκνωτές αναφοράς και μέτρησης έχουν ως διηλεκτρικό υλικό τον αέρα τότε ο λόγος τους θα είναι ανεξάρτητος της τιμής της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς του αέρα.

Σε αρκετές όμως περιπτώσεις η διηλεκτρική σταθερά του αέρα επηρεάζει την μέτρηση την μετρούμενη χωρητικότητα οπότε απαιτείται ακριβής γνώση της τιμής της καθώς με του ευρους τιμών που μπορεί να λάβει.

Η επίδραση της υγρασίας του αέρα στην σχετική διηλεκτρική σταθερά του περιγράφεται από την παρακάτω σχέση [21]:

$$\varepsilon_{moist air} = 1 + \frac{\alpha_1}{T} \left(P_d + \frac{\alpha_2 P_w}{T} H \right)$$

$$a_1 = 158 \times 10^{-6} K / Pa \quad (27)$$

$$a_2 = 48K$$

όπου T είναι η απόλυτη θερμοκρασία P_d η πίεση του, P_w η πίεση του κορεσμένου σε υγρασία αέρα στην ίδια θερμοκρασία και H η σχετική υγρασία.

Στον επόμενο πίνακα φαίνονται οι συντελεστές ευασθησίας της διηλεκτρικής σταθεράς του αέρα σύμφωνα με τα αποτελέσματα διαφόρων ερευνητών [21][22][23][24].

Πίνακας 1. Ευαισθησία της διηλεκτρικής σταθεράς του αέρα στην θερμοκρασία, μερικές πιέσεις, αέρα, νερού, CO_2 και υγρασία από πολλές πηγές για πρότυπο αέρα ($T=293.15K$, $P_d=100kPa$, $P_w=117.5kPa$, $P_c=30Pa$).

		Lea	Bell	Froome	Bean
$\varepsilon_r - 1$	[ppm]	645	610	602	603
$\frac{\partial \varepsilon_r}{\partial T}$	[ppm/K]	-2.56	-2.32	-2.29	-2.29
$\frac{\partial \varepsilon_r}{\partial P_d}$	[ppm/kPa]	5.40	5.39	5.30	5.30
$\frac{\partial \varepsilon_r}{\partial P_w}$	[ppm/kPa]	88.42	87.78	91.08	91.08
$\frac{\partial \varepsilon_r}{\partial P_c}$	[ppm/kPa]	-	-	9.09	-
$\frac{\partial \varepsilon_r}{\partial H}$	[ppm/%]	2.-6	-	-	-

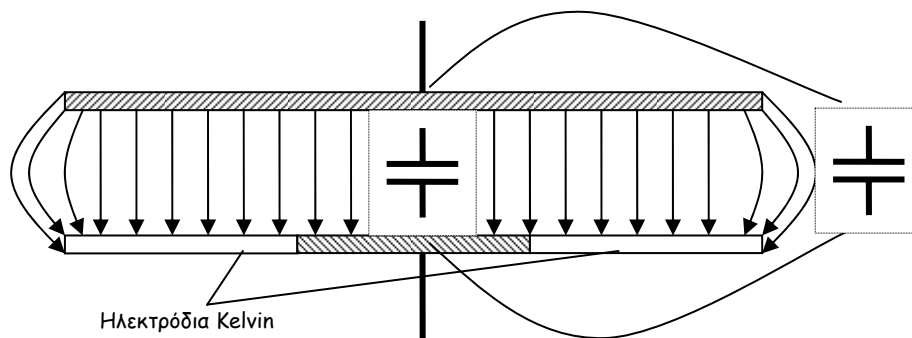
Γενικά η εξάρτηση από το CO_2 μπορεί να αγνοηθεί εφόσον το περιχόμενο σε διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας είναι σχετικά μικρό

II.2.3 Η επίδραση της ηλεκτρικής θωράκισης και των διάκενων

Οι αναλυτικοί υπολογισμοί της χωρητικότητας καθώς και πολλές αριθμητικές μέθοδοι συχνά βασίζονται σε μία τουλάχιστον από τις ακόλουθες παραδοχές:

- Τα ηλεκτρόδια έχουν άπειρη έκταση ή περιβάλλονται από άλλο ηλεκτρόδιο άπειρης έκτασης.
- Το διάκενο μεταξύ γειτονικών ηλεκτροδίων είναι απείρως μικρό.

Στην πράξη πεπερασμένων διαστάσεων ηλεκτρόδια και διάκενα πρέπει να λειφθούν υπόψιν όταν χρειάζονται πυκνωτές μεγάλης ακριβείας. Τέτοιες περιπτώσεις περιλαμβάνουν αισθητήρες χωρητικότητας ή πυκνωτές αναφοράς.



Σχ. 4 Απλός πυκνωτής παραλλήλων πλακών με ηλεκτρόδια Kelvin.

II.2.4 Πεπερασμένα ηλεκτρόδια θωράκισης

Με πεπερασμένα ηλεκτρόδια παρατηρείται μια απόκλιση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου κοντά στα άκρα που είναι και περιοχή διασποράς του πεδίου. Το φαινόμενο αυτό καλείται electric field bending. Στις εν λόγω περιοχές η μορφή του πεδίου είναι δύσκολο να υπολογιστεί αναλυτικά. Ωστόσο όταν ο περιβάλλον χώρος του ηλεκτροδίου είναι επαρκώς γνωστός και αμετάβλητος μπορεί να υπολογιστεί με αριθμητικές μεθόδους. Δυστυχώς σε πολλούς αισθητήρες χωρητικότητας το περιβάλλον λειτουργίας του αισθητήρα αλλάζει ή δεν είναι εκ των προτέρω επαρκώς γνωστό. Πρέπει επομένως μέσω κατάλληλων τεχνικών σχεδίασης το φαινόμενο αυτό να μειωθεί δραστικά. Είναι πιθανόν εφόσον δεν γίνει αυτό, η παρουσία γειτονικών αγωγών ή ανθρώπων στην περιοχή διασποράς του πεδίου να έχει δραστική και μή προβλεψιμη επίδραση στην συμπεριφορά του αισθητήρα.

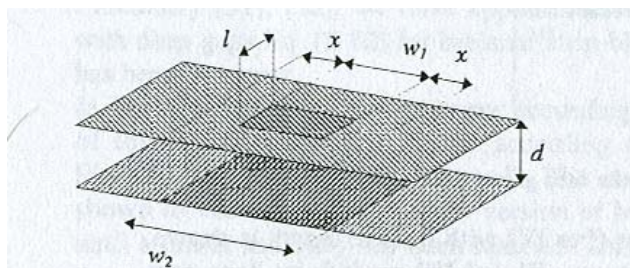
Για τον σκοπό αυτό τα ηλεκτρόδια του αισθητήρα περικλείονται από δεύτερο ηλεκτρόδιο που ονομάζεται δακτύλιος ή ηλεκτρόδιο θωράκισης Kelvin. Σε μία τέτοια διάταξη η επίδραση του περιβάλλοντος χώρου μειώνεται δραστικά ενώ επιπλέον η μορφή του πεδίου απλοποιείται ώστε να επιδέχεται ευκολότερη μοντελοποίηση ή ακόμη και αναλυτική λύση.

Δεν είναι απαραίτητο όλα τα ηλεκτρόδια του αισθητήρα να περιβάλλονται από δακτύλιους προστασίας όπως φαίνεται και στο Σχ. 4 . Σε αυτό μόνο το μικρότερο ηλεκτρόδιο περιβάλλεται από τέτοιο δακτύλιο. Εάν διατηρούμε αμφοτέρω το μικρό ηλεκτρόδιο και τον δακτύλιο θωράκισης του στο ίδιο ηλεκτρικό δυναμικό τότε το πεδίο στον χώρο μεταξύ των ηλεκτροδίων καθίσταται ομογενές στην περιοχή που μας ενδιαφέρει και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ακρίβεια η σχέση απλού πυκνωτή επιπέδων πλακών για τον υπολογισμό της χωρητικότητας.

Ανακεφαλαιώνοντας τα ηλεκτρόδια προστασίας επιτελούν δύο ρόλους. Αποτρέπουν την επίδραση εξωτερικών αντικειμένων και ηλεκτρικών πεδίων να επηρεάσουν το ηλεκτρικό πεδίο του αισθητήρα χωρητικότητας. Μεταφέρουν τις περιοχές που παρουσιάζουν διασπορά του ηλεκτρικού πεδίου εκτός της περιοχής ενδιαφέροντος όπου και λαβάνει χώρα μέτρηση από τον αισθητήρα.

Όπως φαίνεται και από το σχήμα υπάρχουν δύο χωρητικότητες που πρέπει να μελετηθούν. Η πρώτη βρίσκεται στο εσωτερικό μεταξύ των ηλεκτροδίων και με βάση τα προηγούμενα ορίζεται επαρκώς. Ωστόσο υπάρχει και μία δεύτερη εξωτερικά από την διάταξη μεταξύ του πάνω μέρους του ανώτερου οπλισμού με την κατω πλευρά του μικρού ηλεκτροδίου. Αυτή δυστυχώς καθώς του περιβάλλον του αισθητήρα δεν είναι επαρκώς γνωστή πρέπει να μειωθεί περεταίρω. Πρέπει επομένως να τοποθετηθούν επιπλέον ηλεκτόδια προστασίας εξωτερικά της διάταξης και να γειωθούν

Καθώς και τα όποια ηλεκτρόδια προστασίας είναι πεπερασμένων διαστάσεων το φαινόμενο της διασποράς του ηλεκτρικού πεδίου εξακολουθεί να υφίσταται. Λόγω της σπουδαιότητας του το φαινόμενο έχει μελετηθεί από πολλούς ερευνητές [13][14]. Ο Heerens παρουσίασε έναν εμπειρικό κανόνα για την εκτίμηση του μεγίστου σφάλματος που προκαλούν οι πεπερασμένες διαστάσεις ηλεκτοδίων προστασίας και διακένων



Σχ. 5 Διάταξη ηλεκτροδίων για την μελέτη της επίδραση της θωράκισης

Στο Σχ. 5 εάν η επάνω τετραγωνική πλάκα βρίσκεται στο μέσω της κάτω ταινίας έτσι ώστε $w_2 = w_1 + 2x$ η χωρητικότητα υπολογίζεται ως

$$C = \frac{\varepsilon_o \varepsilon_r l}{\pi} \ln \left(\frac{\cosh\left(\frac{\pi(w_1 + x)}{2d}\right) \cosh\left(\frac{-\pi(w_1 + x)}{2d}\right)}{\cosh\left(\frac{\pi x}{2d}\right) \cosh\left(\frac{-\pi x}{2d}\right)} \right) \quad (28)$$

Αν υποθέσουμε ότι $x \gg d$ η παραπάνω σχέση προσεγγίζεται όπως αναμενόταν από την

$$C \approx \frac{\varepsilon_o \varepsilon_r l w_1}{d} \quad (29)$$

Από τις δύο τελευταίες σχέσεις προκύπτει ότι το σφάλμα λόγω των πεπερασμένων ηλεκτροδίων προστασίας είναι

$$\delta_{guard} < -\frac{2d}{\pi w_1} e^{-\frac{\pi x}{d}} \quad (30)$$

Ο Heerens διατύπωσε τον εμπειρικό κανόνα ότι για $d \approx 5x$ το μέγιστο σφάλμα είναι λιγότερο από 1ppm [13].

II.2.5 Παρασιτικές χωρητικότητες

Εαν υποθέσουμε ότι ο αισθητήρας χωρητικότητας αποτελείται για απλότητα από δυο ηλεκτρόδια τότε η χρήση ενός ηλεκτροδίου προστασίας εισάγει δυο επιπλέον παρασιτικές χωρητικότητες. Αυτές μοντελοποιούνται μέσω των C_{p1} και C_{p2} . Με κατάλληλη σχεδίαση του ηλεκτρονικού κυκλώματος του αισθητήρα [15] η επίδρασή τους στην μέτρηση μπορεί ουσιαστικά να εξαλειφθεί όπως αναλύεται σε άλλες παραγράφους.

Ωστόσο στην πράξη υπάρχουν δύο ακόμη παρασιτικές χωρητικότητες. Η πρώτη είναι η εξωτερική χωρητικότητα μεταξύ των εξωτερικών πλευρών των ηλεκτροδίων του αισθητήρα και η δεύτερη είναι αυτή μεταξύ των ηλεκτρικών αγωγών με τους οποίους συνδέεται ο αισθητήρας με το κύκλωμα μέτρησης. Αμφότερες είναι παράλληλα συνδεδεμένες με την κυρίως χωρητικότητα του αισθητήρα C_x που επιθυμούμε να μετρήσουμε και συνεπώς δεν μπορούν να διαχωριστούν από αυτή. Παρόλο που σε πολλές εφαρμογές η μόνη απαίτηση είναι αυτές να παραμένουν σταθερές η τιμή τους εξαρτάται από παράγοντες του περιβάλλοντος που βρίσκεται ο αισθητήρας. Γι' αυτό πρέπει η τιμή τους να είναι όσο το δυνατόν πιο μικρή συγκρινόμενη με την κυρίως χωρητικότητα C_x . Όπως είπαμε και πιο πριν αυτό επιτυγχάνεται με χρήση ηλεκτροδίων προστασίας ώστε πρακτικά η επίδρασή τους να πέσει σε λιγότερο από 1ppm. Ο Toth και ο Meijer [16] έχουν δείξει ότι με την χρήση ομοαξονικών καλωδίων με εξωτερικό ηλεκτρόδιο προστασίας για την σύνδεση με τα ηλεκτρόδια του αισθητήρα η χωρητικότητα μεταξύ των καλωδίων σύνδεσης μπορεί εύκολα να πέσει κάτω από τα 20 aF όση ήταν και η διακριτική ικανότητα του εξοπλισμού τους.

Λόγω της ανάγκης για εκτεταμένη χρήση ηλεκτροδίων προστασίας και ομοαξονικών καλωδίων διασύνδεσης αναμένετε δραματική αύξηση (ακόμη και 1000 φορές η τιμή της C_x) των παρασιτιών χωρητικότητων C_{p1} και C_{p2} . Ωστόσο όπως περιγράφεται και σε άλλες παραγράφους η μεγάλη τιμή παρασιτικών χωρητικότητων δεν αποτελεί πρόβλημα για την μέτρηση με ακρίβεια της C_x .

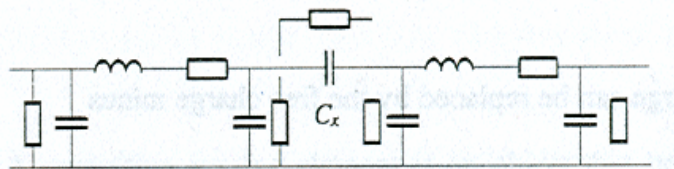
II.3 Η χωρητικότητα σε υψηλές συχνότητες

II.3.1 Ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα μεγαλύτερης τάξης

Στην πράξη η χωρητικότητα είναι δύσκολο να μετρηθεί με σταθερές (DC) τάσεις. Πρέπει να χρησιμοποιηθούν εναλλασσόμενες (AC) τάσεις. Όμως με χρονικά μεταβαλλόμενες τάσεις η παράγωγος του πεδίου ως προς τον χρόνο πάυει να είναι μηδενική και το πεδίο δεν είναι πλέον στατικό. Συνεπώς οι πλήρεις εξισώσεις Maxwell πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την περιγραφή του.

Για τις περιπτώσεις όπου το μήκος κύματος του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από την μέγιστη διάσταση της μελετώμενης διάταξης τότε το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο είναι σχεδόν σταθερό. Για την περιοχή συχνοτήτων όπου ικανοποιείται η συνθήκη για το μήκος κύματος γνωρίζουμε ότι εφαρμόζεται η θεωρία ηλεκτρικών κυκλωμάτων.

Το ισοδύναμο μοντέλο που περιγράφει την μελετώμενη διάταξη θα αποτελείται από ένα ηλεκτρικό κύκλωμα πυκνωτών αντιστάσεων και πηνίων. Οι τιμές των στοιχείων του κυκλώματος προκύπτουν από την λεγόμενη ημιστατική προσέγγιση. Όσο μεγαλύτερης τάξης χρονικές παράγωγοι του πεδίου περιλαμβάνονται στην ανάλυση τόσο αυξάνει και η πολυπλοκότητα και ο αριθμός των στοιχείων του ισοδύναμου κυκλώματος [11]. Επίσης όσο αυξάνει η συχνότητα πρέπει να αυξηθεί και ο αριθμός των λαμβανομένων υπόψιν χρονικών παραγώγων του πεδίου.



Σχ. 6 Ισοδύναμο μοντέλο υψηλής συχνότητας ενός πυκνωτή δύο ηλεκτροδίων πάνω από επίπεδο γης.

Στο Σχ. 3 φαίνεται το ισοδύναμο μοντέλο σε υψηλές συχνότητες για ένα πυκνωτή δύο ηλεκτροδίων πάνω από ένα επίπεδο γης. Στο μοντέλο αυτό τα σύρματα – ακροδέκτες για την σύνδεση με τα ηλεκτρόδια του κυρίως πυκνωτή C_x έχουν σε σειρά αυτεπαγωγή και ωμική αντίσταση. Είναι προφανές λόγω της πολυπλοκότητας του μοντέλου ότι απαιτείται η

επιλογή κατάλληλων κυκλωμάτων μέτρησης που θα αναδεικνύουν την προς μέτρηση χωρητικότητα C_x ενώ παράλληλα θα μειώνουν την επίδραση των υπόλοιπων στοιχείων του κυκλώματος στην μέτρηση.

II.3.2 Ημιστατικές εξισώσεις ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

Εάν το μήκος κύματος οποιουδήποτε ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι κατά πολύ μεγαλύτερο των διαστάσεων του προβλήματος το ρεύμα μετατόπισης στις εξισώσεις του Maxwell συγκρινόμενο με το ρεύμα των ελεύθερων φορτίων μπορεί να παραληφθεί. Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχουν φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και ισχύει ο νόμος του Ampere. Ισχύουν οι παρακάτω εξισώσεις για την περιγραφή του πεδίου που αποτελούν την λεγόμενη ημι-στατική προσέγγιση [11].

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \{\text{Νόμος του Faraday}\} \quad (31)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad \{\text{Νομος του Ampere}\} \quad (32)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_c \quad \{\text{Νόμος του Gauss}\} \quad (33)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (34)$$

II.4 Χωρητικότητα και κυκλώματα μέτρησης

II.4.1 Μέτρηση χωρητικότητας

Η χωρητικότητα είναι καθαρά γεωμετρικό μέγεθος καθώς εξαρτάται μόνο από την θέση των αγωγών και διηλεκτρικών που συνιστούν το πρόβλημα ενώ είναι ανεξάρτητη από την μορφή διέγερσης δηλαδή τα εφαρμοζόμενα δυναμικά στους αγωγούς. Από τον ορισμό της χωρητικότητας προκύπτει ότι μπορούμε να μετρήσουμε την χωρητικότητα μεταξύ δύο αγωγών εάν κρατήσουμε τα δυναμικά όλων των υπόλοιπων αγωγών σταθερά υπολογίζοντας ή μετρώντας την μεταβολή στο φορτίο του ενός αγωγού που προκαλεί η μεταβολή στο δυναμικό του άλλου.

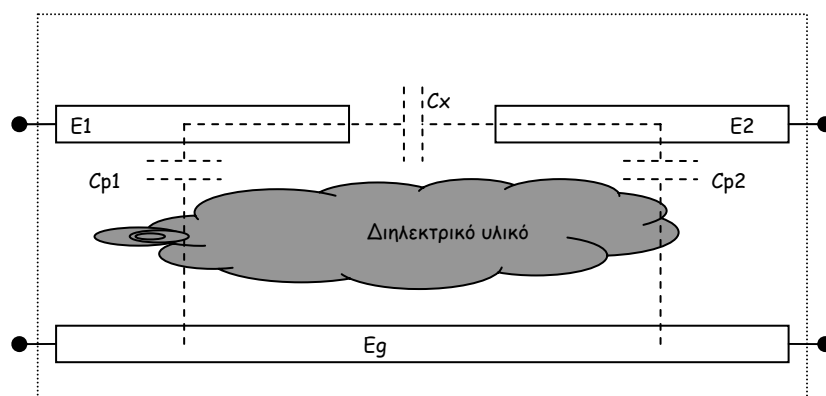
Γενικά σε ένα σύστημα πολλαπλών αγωγών-διηλεκτρικών (όπως συμβαίνει συνήθως σε πραγματικά προβλήματα) μπορούμε να αγνοήσουμε τους υπόλοιπους αγωγούς εφόσον το

δυναμικό τους παραμένει σταθερό και μετράμε την χωρητικότητα μεταβάλλοντας τα δυναμικά των αγωγών που ενδιαφέρουν και υπολογίζοντας τις επαγόμενες μεταβολές στα ηλεκτρικά φορτία τους

Λόγω της γραμμικότητας που παρουσιάζουν τα προβλήματα της ηλεκτροστατικής ισχύει η αρχή της επαλληλίας. Άρα η συνολική απόκριση του συστήματος σε μια πολύπλοκη διέγερση των αγωγών που το απαρτίζουν προκύπτει από την υπέρθεση των αποκρίσεων εάν διεγείρονταν με την σειρά καθένα από τους αγωγούς.

II.4.2 Μοντέλλο αισθητήρα χωρητικότητας

Ένα γενικευμένο ηλεκτρικό μοντέλο αισθητήρα χωρητικότητας φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχ. 7 Μοντέλλο αισθητήρα με βάση αρχής χωρητικότητα

Βλέπουμε ότι δύο ηλεκτρόδια E1 και E2 βρίσκονται κοντά σε ένα ηλεκτρόδιο γείωσης Eg. Στον χώρο μεταξύ των ηλεκτροδίων υπάρχει και ένα διηλεκτρικό υλικό. Η σχετική θέση των ηλεκτροδίων E1 E2 και Eg καθώς και του διηλεκτρικού υλικού μπορεί να μεταβάλλεται χρονικά. Το σύστημα περιγράφεται από τρεις χωρητικότητες. Η κύρια χωρητικότητα αναπτύσσεται μεταξύ των ηλεκτροδίων E1 και E2, παριστάνεται ως C_x και είναι αυτή που επιθυμούμε να μετρήσουμε. Ωστόσο υπάρχουν δύο παρασιτικές χωρητικότητες C_{p1} και C_{p2} στις οποίες περιλαμβάνονται και οι χωρητικότητες των ακροδεκτών για την διασύνδεση με το κύκλωμα μέτρησης.

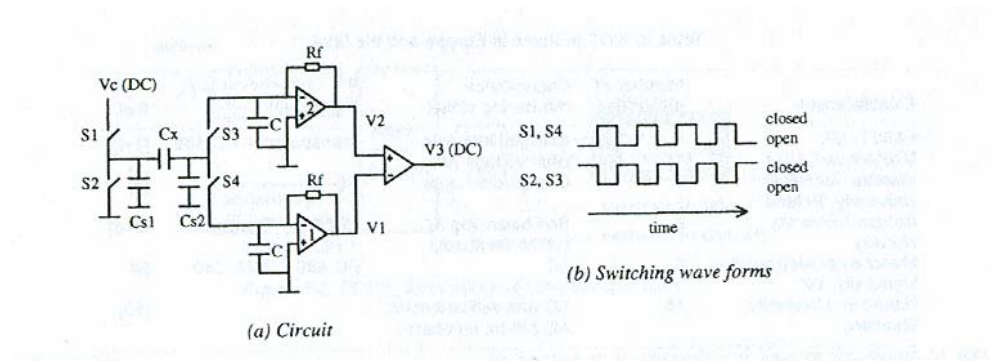
Συνήθως η χωρητικότητα C_x περιγράφεται από μία αναλυτική σχέση ως συνάρτηση, ανάλογα με τον τύπο του αισθητήρα του μετρούμενου από αυτόν φυσικού μέγεθους. Οι άλλες δύο χωρητικότητες θεωρούνται γενικά άγνωστες καθώς στην πράξη είναι πολύ δύσκολο να υπολογιστούν, είναι συγκρίσιμες και πολλές φορές αρκετά μεγαλύτερες από την C_x .

Στόχος των διαφόρων κυκλωμάτων μέτρησης είναι συνήθως η ακριβής μέτρηση της χωρητικότητας C_x χωρίς να γνωρίζουμε τίποτα για τις Cp_1 και Cp_2 .

II.4.3 Κυκλώματα μέτρησης

Ανάμεσα στα διάφορα κυκλώματα μέτρησης δύο, ξεχωρίζουν για την ακρίβεια μέτρησης και την αναισθησία σε παρεμβολές και παρασιτικές χωρητικότητες [17].

- Το κύκλωμα φόρτισης/εκφόρτισης
- Το AC κύκλωμα με αποδιαμόρφωση (lock-in amplifier)



Σχ. 8 Το κύκλωμα φόρτισης/εκφόρτισης

Κύκλωμα φόρτισης/εκφόρτισης

Το κύκλωμα φόρτισης/εκφόρτισης σε διαφορικού σήματος συνδεσμολογία, φαίνεται στο Σχ. 8. Οι παρασιτικές χωρητικότητες μοντελοποιούνται από τους πυκνωτές Cs_1 και Cs_2 . Ένας πλήρης κύκλος λειτουργίας του κυκλώματος αποτελείται από δύο φάσεις την φάση φόρτισης και την φάση εκφόρτισης. Κατά την πρώτη φάση οι διακόπτες $S1$ και $S4$ κλείνουν ενώ οι υπόλοιποι παραμένουν ανοικτοί. Το ρεύμα φόρτισης διαρρέει από την πηγή τάσης V_c μέσω της άγνωστης χωρητικότητας C_x στην είσοδο του τελεστικού ενισχυτή 1 με αντίσταση ανάδρασης R_f . Το φορτίο που μεταφέρεται μέσω του ενισχυτή είναι

$$Q_1 = V_c C_x \quad (35)$$

ενώ το μέσο ρεύμα που ρέει μέσω του ενισχυτή 1 είναι για συχνότητα φόρτισης f

$$I_1 = fQ_1 = fV_c C_x \quad (36)$$

το οποίο μετατρέπεται σε σημά τάσης στην έξοδό του

$$V_1 = -I_1 R_f = -fV_c C_x R_f \quad (37)$$

Αν υπάρχει και τάση απόκλισης του τελεστικού ενισχυτή η πραγματική έξοδος γίνεται τελικά

$$V_1 = -fV_c C_x R_f + e_1 \quad (38)$$

Παρόμοια κατά την φάση εκφόρτισης με κλείσιμο των διακοπών S2 και S3 και άνοιγμα των υπολοίπων το αποθηκευμένο φορτίο στην αριστερή πλευρά του πυκνωτή C_x διαρέει στην γή και η αριστερή πλευρά αποροφά ρεύμα από τον τελεστικό ενισχυτή 2. Κατά αναλογία τη τάση στην έξοδο αυτού θα είναι

$$V_2 = fV_c C_x R_f + e_2 \quad (39)$$

όπου e_2 η τάση απόκλισης του.

Στην είσοδο αμφοτέρων των τελεστικών ενισχυτών συνδέεται παράλληλα πυκνωτής C που αποτρέπει τον κορεσμό τους από τις αιχμές του ρεύματος κατά την μεταγωγή των διακοπών.

Η τελική έξοδος του κυκλώματος προκύπτει από τον διαφορικό στάδιο ενίσχυσης κέρδους K και δίνεται από τη παρακάτω σχέση

$$V_3 = K(V_2 - V_1) = 2KfV_c C_x R_f + K(e_2 - e_1) \quad (40)$$

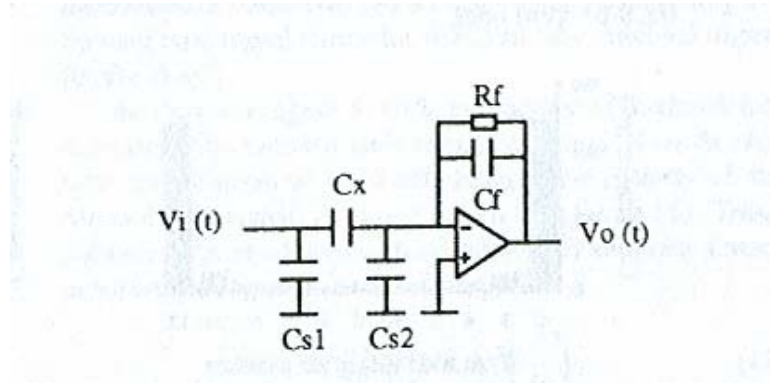
αξίζει να παρατηρήσει κανείς ότι οι τάσεις απόκλισης των τελεστικών αλληλοαναιρούνται σε κάποιο ποσοστό μειώνοντας την επίδρασή τους.

Η παρασιτική χωρητικότητα C_{s1} συνδέεται διαδοχικά με την τάση τροφοδοσίας ή την γή και δέν επηρεάζει το ρεύμα μέσω του πυκνωτή C_x εφόσον βέβαια η εσωτερική αντίσταση την πηγής και των διακοπών S1 και S2 είναι αρκετά μικρή. Η άλλη παρασιτική χωρητικότητα C_{s2} συνδέεται παράλληλα στην έξοδο των τελεστικών συνεπώς η τάση στα άκρα της λόγω της ιδανικής γής που παρουσιάζουν αυτοί παραμένει στο μηδέν και δεν επηρεάζει την λειτουργία του κυκλώματος. Επομένως είναι ξεκάθαρη η αναισθησία του κυκλώματος σε παρασιτικές χωρητικότητες.

Από την εξίσωση της τάσης εξόδου του κυκλώματος προκύπτει ότι αυτή είναι ανάλογη της συχνότητας μεταλλαγής των διακοπών συνεπώς η ευαισθησία του κυκλώματος βελτιώνεται καθώς αυτή αυξάνει. Πρακτικά μπορεί να φτάσει τα 2.5MHz που είναι και το όριο λειτουργίας των διακοπών CMOS.

Κύριο μειονέκτημα του κυκλώματος παραμένει η έγχυση φορτίου κατά την λειτουργία των διακοπών που υλοποιούνται αποκλειστικά από τρι νζίστορ CMOS. Συνήθως οι μεταβολές χωρητικότητας που πρέπει να μετρήσουμε είναι της μικρότερης του 0.1pF. Η παρασιτική

χωρητικότητα ενός CMOS τρανζίστορ διακόπτη είναι της τάξης των 0.5pF [18]. Παρόλο που η διαφορική συνδεσμολογία βοηθάει καθώς η έγχυση φορτίου κατά την φόρτιση και την εκφόρτιση αφαιρούνται ωστόσο η διαφορά τους είναι συνήθως της τάξης των 0.2pF συγκρίσιμη με την μετρούμενη χωρητικότητα.



Σχ. 9 Το κύκλωμα μέτρησης χωρητικότητας AC

AC κύκλωμα με αποδιαμόρφωση

Το τυπικό κύκλωμα AC φαίνεται στο Σχ. 9 . Μία ημιτονοειδής τάση $V_i(t)$ εισόδου εφαρμόζεται στην μετρούμενη χωρητικότητα C_x προκαλώντας ένα εναλλασσόμενο ρεύμα εισόδου. Ένας τελεστικός ενισχυτής με ανάδραση (C_f, R_f) μετατρέπει το ρεύμα εισόδου στην τάση εξόδου. Η ωμική αντίσταση είναι απαραίτητη στο κυκλωμα ανάδρασης για την αποφυγή της ολισθισής και τελικώς του κορού της εξόδου του τελεστικού ενισχυτή.

Η ανάλυση του κυκλώματος δίνει την παρακάτω σχέση για την τάση εξόδου.

$$V_o = \frac{j\omega C_x R_f}{j\omega C_f R_f + 1} V_i \quad (41)$$

Εάν μια επαρκώς μεγάλη τιμή της αντίστασης R_f επιλεγεί έτσι ώστε $|j\omega C_f R_f| \gg 1$ τότε η προηγούμενη σχέση γράφεται

$$V_o \approx -\frac{C_x}{C_f} V_i \quad (42)$$

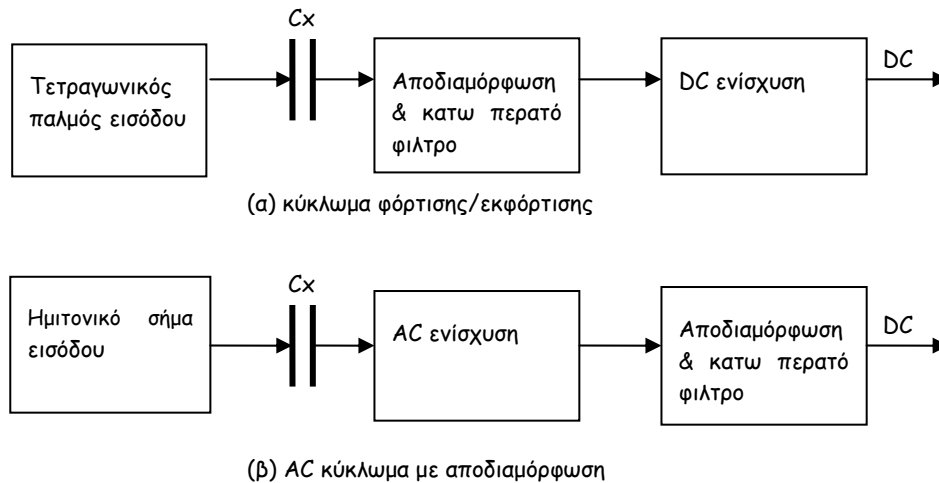
Αρα η έξοδος του κυκλώματος AC είναι ένα εναλλασσόμενο σήμα με πλάτος ανάλογο της μετρούμενης χωρητικότητας.

Όσον αφορά τις παρασιτικές χωρητικότητες C_{s1} , C_{s2} η πρώτη οδηγείται από την πηγή ημιτονικού σήματος και δεν επηρεάζει την μέτρηση εφόσον η πηγή έχει επαρκώς μικρή εσωτερική αντίσταση. Η δευτερη συνδέεται παράλληλα στην είσοδο του τελεστικού άρα λόγω της ουσιαστικής γής στην είσοδο του τελεστικού βρίσκεται πάντα σε μηδενική τάση

και δεν επηρεάζει την έξοδο. Επομένως και αυτό το κύκλωμα δεν επηρεάζεται από παρασιτικές χωρητικότητες [19],[20].

Σύγκριση των δύο κυκλωμάτων

Τα δύο κυκλώματα που παρουσιάσαμε έχουν αρκετά κοινά σημεία όπως φαίνεται και από το μπλόκ διαγράματά τους στο επόμενο σχήμα.



Σχ. 10 Απλοποιημένο μπλόκ διάγραμμα των κυκλωμάτων μέτρησης.

Με βάση το σχήμα στο πρώτο κύκλωμα οι διακόπτες S1, S2 διαμορφώνουν την σταθερή τάση εισόδου σε ένα τετραγωνικό παλμό ενώ οι διακόπτες S3, S4 λειτουργούν ως αποδιαμορφωτές. Υπάρχει επιπλέον και ο πυκνωτής εξομάλυνσης C που λειτουργεί ισοδύναμα με κατωπερατό φίλτρο. Το σήμα εξόδου πρέπει κατόπιν να ενισχυθεί από DC ενισχυτές για να αποκτήσει ικανοποιητικό πλάτος.

Στο ίδιο σχήμα για το δεύτερο κύκλωμα ότι η έξοδος του πρώτου σταδίου εισόδου είναι ένα AC σήμα που περιέχει και θόρυβο. Αυτό πρέπει να ενισχυθεί επιπλέον και τελικά να υποστεί αποδιαμόρφωση με φάραση ή μέσω κλειδώματος φάσης και μετά κατω περατό φίλτράρισμα. Τελικά στην έξοδο προκύπτει ένα DC σήμα ανάλογο της άγνωστης χωρητικότητας.

Η κύρια διαφορά των δύο κυκλωμάτων είναι ή θέση που λαμβάνει χώρα η αποδιαμόρφωση. Στο πρώτο η αποδιαμόρφωση λαμβάνει χώρα πριν την ενίσχυση ενώ το δεύτερο η αποδιαμόρφωση είναι στο τελικό στάδιο. Συγκεντρωτικά στοιχεία για τα δύο κυκλώματα δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των κυκλωμάτων μέτρησης χωρητικότητας

	Χαρακτηριστικά	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Κύκλωμα φόρτισης/εκφόρτισης	<p>(1) Αναίσθητο σε παρασιτικές χωρητικότητες</p> <p>(2) 0.3 fF διακριτική ικανότητα</p> <p>(3) Μέτρηση σύνθετης αντίστασης</p> <p>(4) Συχνότητα λειτουργίας έως και 2,5 MHz</p>	<p>(1) Απλό και φθηνό</p>	<p>(1) Η εγχυση φορτίου από του διακόπτες CMOS δημιουργεί προβλήματα.</p> <p>(2) λόγω DC λειτουργίας των ενυσχυτών πάσχει από προβλήματα ολίσθισης</p> <p>(3) η λειτουργία του επηρεάζεται από αγωγιμότητες απωλειών.</p>
AC κύκλωμα	<p>(1)Αναίσθητο σε παρασιτικές χωρητικότητες.</p> <p>(2) 0.04fF διακριτική ικανότητα</p> <p>(3) Μέτρηση σύνθετης αντίστασης και με χρήση phase sensitive detector (PSD) χωρητικότητα και/ή αγωγιμότητα. .</p> <p>(4) Συχνότητα λειτουργίας έως 1 MHz</p>	<p>(1)Χαμηλή ολίσθιση λόγω της AC λειτουργίας των ενισχυτών.</p> <p>(2) Μεγάλος λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR)</p>	<p>(1) Πολύπλοκο και αρκετά ακριβό ειδικά για λειτουργία σε υψηλές συχνότητες</p>

II.5 Ηλεκτρική Χωρητική Τομογραφία (ECT)

II.5.1 Γενικά

Η ηλεκτρική χωρητική τομογραφία (Electric Capacitance Tomography – ECT) χρησιμοποιείται για την απεικόνιση της εγκάρσιας τομής βιομηχανικών διεργασιών μέσω των διηλεκτρικών ιδιοτήτων των υλικών. Η τεχνική αυτή βρίσκεται σε συνεχή ανάπτυξη περισσότερο απο μία δεκαετία. Στόχος της είναι ο υπολογισμός της κατανομής διηλεκτρικής σταθεράς συνεπώς και της κατανομής των υλικών σε όλη την εγκάρσια διατομή της εκάστοτε διαδικασίας μέσω μετρήσεων χωρητικότητας [25].

Τρία είναι τα κύρια προβλήματα – προκλήσεις για την απεικόνιση μεσω αυτής..

Η σχέση μεταξύ της κατανομής της διηλεκτρικής σταθεράς και μετρούμενης χωρητικότητας είναι μη γραμμική. Το ηλεκτρικό πεδίο παραμορφώνεται από τα υφιστάμενα υλικά (φαινόμενο “soft-field”).

Ο αριθμός των διαθέσιμων μετρήσεων χωρητικότητας είναι περιορισμένος άρα μικάμε για ένα μη επαρκώς προσδιορισμένο πρόβλημα.

Η λύση του αντιστρόφου προβλήματος είναι ασθενής εφόσον δεν περιορίζεται και προσδιορίζεται επαρκώς συνεπώς είναι και ευαίσθητη σε σφάλματα μέτρησης καθώς και ηλεκτρικό θόρυβο.

Επομένως απαιτούνται κατάλληλες μέθοδοι για την αντιμετώπιση του ελλειπού προσδιορισμού του και λύση του αντιστρόφου προβληματος. Ανάμεσα στις μεθόδους που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνονται οι κάτωθι

- Linear back-projection
- Singular value decomposition
- Tichonov regularization
- Newton-Ramphson conjugate gradient
- Steepest descent method
- Landwweber iteration

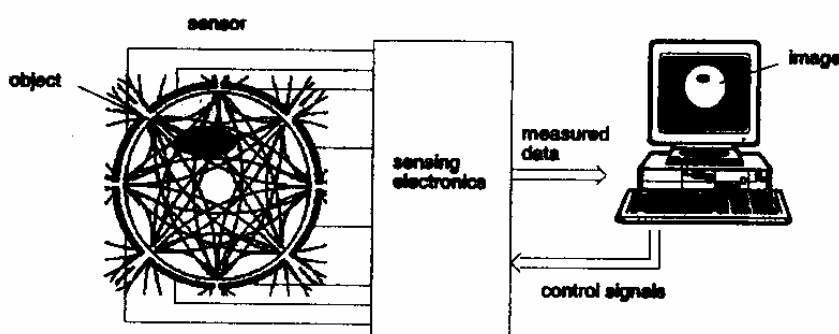
II.5.2 Περιγραφή

Η ECT βασίζεται στις μετρήσεις χωρητικότητας μεταξύ τω ηλεκτροδίων ενός αισθητήρα χωρητικότητας που περιβάλλει το δοχείο ή τον σωλήνα στο οποίο περιέχονται δύο ή περισσότερα υλικά. Οι μετρήσεις αυτές χρησιμοποιούνται για την ανακατασκευή της κατανομής διηλεκτρικών σταθερών άρα και της κατανομής υλικών σε ολόκληρη την διατομή μέσω κατάλληλων αλγορίθμων. Η πρώτη αναφορά ξεκινά πίσω στη δεκαετία του

1970. Σε αυτή αναπτύχθηκε για τις ανάγκες του Υπουργείου Ενέργειας των Η.Π.Α. σύστημα για την απεικόνιση της κατανομής υγρών/στερεών σε fluidized beds [26]. Το πρώτο σύστημα ECT πραγματικού χρόνου αναπτύχθηκε από το UMIST τέλη της δεκαετίας του 1980 [27],[28],[29]. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιήθηκε επιτυχώς για την απεικόνιση ποικίλων χημικών διεργασιών δύο φάσεων μεταξύ των οποίων και

- Κατανομή αερίου στερεών σε πνευματικούς μεταφορείς και fluidized beds.
- Καύση σε κυλίνδρους μηχανών εσωτερικής κάυσεως.
- Φαινόμενο υδραυλικού πλήγματος.

Την τελευταία δεκαετία διεξάγεται εντατική έρευνα πάνω στην ECT σε πολλές χώρες [25].



Σχ. 11 Τυπικό σύστημα ECT.

Ένα τυπικό σύστημα ECT αποτελείται από τρεις κύριες μονάδες όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα.

- Έναν αισθητήρα χωρητικότητας πολλαπλών ηλεκτροδίων
- Μονάδα ηλεκτρονικών
- Ηλεκτρονικό υπολογιστή για τον έλεγχο του Hardware την επεξεργασία των λαμβανομένων σημάτων και την ανακατασκευή της εικόνας.

Ο αισθητήρας αποτελείται συνήθως από οκτώ ή δώδεκα ηλεκτρόδια περιμετρικά από ένα σωλήνα ή δοχείο και μετράται η χωρητικότητα ανάμεσα όλων των ανεξάρτητων δυνατών συνδιασμών ηλεκτροδίων. Η μονάδα ηλεκτρονικών παρέχει οδήγηση και μετατρέπει τις χωρητικότητες σε σήματα τάσης για επεξεργασία και ψηφιοποίηση. Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής ελέγχει το hardware και υλοποιεί μέσω αλγορίθμων την ανακατασκευή της εικόνας απεικόνισης της κατανομής διηλεκτρικών σταθερών.

Δύο είναι τα σχετικά προβλήματα στην ECT, το ευθύ και το ανάστροφο. Στο ευθύ πρέπει να υπολογιστούν οι χωρητικότητες μεταξύ των ηλεκτροδίων που προκύπτουν από γνωστή κατανομή διηλεκτρικών σταθερών δηλαδή λύση των μερικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν το αντίστοιχο ηλεκτροστατικό πρόβλημα. Στο ανάστροφο πρόβλημα πρέπει να βρεθεί η κατανομή διηλεκτρικών σταθερών από τις μετρούμενες χωρητικότητες. Η κατανομή διηλεκτρικών σταθερών απεικονίζεται συνήθως με την μορφή οπτικής εικόνας

γιαυτό και ονομάζεται ανακατασκευή εικόνας. Πολλές από τις σύγχρονες τεχνικές ιδίως οι αναδρομικής φύσεως περιλαμβάνουν και την επίλυση του ευθέως προβλήματος.

Η σχέση μεταξύ χωρητικότητας και διηλεκτρικής κατανομής δίνεται από την ακόλουθη σχέση

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{1}{V} \iint_{\Gamma} \varepsilon(x, y) \nabla \phi(x, y) d\Gamma \quad (43)$$

όπου $\varepsilon(x, y)$ είναι η κατανομή της διηλεκτρικής σταθεράς, V η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων που αποτελούν της υπολογιζόμενη χωρητικότητα, $\phi(x, y)$ η κατανομή ηλεκτροστατικού δυναμικού και Γ κλειστή επιφάνεια που περικλείει το ηλεκτρόδιο. Στην περίπτωση απλών πεδίων η προηγούμενη εξίσωση απλοποιείται αρκετά όπως για παράδειγμα στον ιδανικό πυκνωτή επιπέδων πλακών με ομογενή κατανομή διηλεκτρικού που γράφεται

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad (44)$$

Η απλή αυτή σχέση γραμμικής εξάρτησης μεταξύ της διηλεκτρικής σταθεράς και μετρούμενης χωρητικότητας δεν υσχύει γενικά στα συστήματα ECT καθώς η γεωμετρία του αισθητήρα είναι πολυπλοκότερη και η κατανομή διηλεκτρικού μή ομοιόμορφη στο πεδίο δράσης του αισθητήρα. Επιπλέον η κατανομή ηλεκτροστατικού δυναμικού $\phi(x, y)$ εξαρτάται και από την κατανομή διηλεκτρικού $\varepsilon(x, y)$. Συνεπώς γενικότερα μπορούμε να θεωρήσουμε την χωρητικότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων του αισθητήρα ECT ως functional

$$C = \xi(\varepsilon) \quad (45)$$

της κατανομής διηλεκτρικού. Για μικρές μεταβολές στην διηλεκτρική κατανομή η μεταβολή στην μετρούμενη χωρητικότητα θα δίνεται με γραμμική προσέγγιση από μία σχέση της μορφής

$$\Delta C = \frac{d\xi}{d\varepsilon}(\Delta\varepsilon) + O((\Delta\varepsilon)^2) \quad (46)$$

όπου $\frac{d\xi}{d\varepsilon}$ είναι η ευαισθησία της χωρητικότητας σε αλλαγές του διηλεκτρικού και $O((\Delta\varepsilon)^2)$ περιλαμβάνει την εξάρτηση από όρους μεγαλύτερης τάξης που μπορούν να αμεληθούν.

Σε πολλές εφαρμογές ECT ο όρος $\Delta\varepsilon$ είναι αρκετά μικρός ώστε να αμεληθούν με ασφάλεια όροι μεγαλύτερης τάξης οπότε καταλήγουμε στην κάτωθι γραμμική σχέση

$$\Delta C = s \cdot \Delta\varepsilon \quad (47)$$

όπου $s = \frac{d\xi}{d\varepsilon}$ είναι η ευαισθησία του αισθητήρα σε αλλαγές της διηλεκτρικής σταθεράς.

Η εξίσωση πρέπει να γραφτεί σε μητρική μορφή. Συνήθως η περιοχή που θέλουμε να απεικονίσουμε της κατανομή της διηλεκτρικής σταθεράς διαιρείται Ν θέσεις ή pixels τάξης περίπου 1000. Για παράδειγμα ένα πλέγμα 32 x 32 δημιουργεί 1024 pixels για αισθητήρα τετράγωνης διατομής και περίπου 800 σε κυκλικής διατομής.

Εάν χρησιμοποιήσουμε ως παράδειγμα ένα σύστημα δώδεκα ηλεκτροδίων οι μετρήσεις χωρητικότητας λαμβάνονται ως εξής. Ένα σήμα τάσης εφαρμόζεται στο ηλεκτρόδιο 1 και μετράμε τα επαγόμενα φορτία στα ηλεκτρόδια δύο έως δώδεκα για να προκύψει η χωρητικότητα μεταξύ του πρώτου και των υπολοίπων έντεκα ηλεκτροδίων.κατάοπιν και τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια ενεργοποιούνται με την σειρά δίνοντας συνολικά 66 ανεξάρτητες μετρήσεις. Γενικότερα από έναν αισθητήρα χωρητικότητας n ηλεκτροδίων μπορούν να λειφθούν $M = \frac{n(n-1)}{2}$ ανεξάρτητες μετρήσεις άρα προκύπτουν M εξισώσεις της μορφής. Με βάση αυτά το ευθύ πρόβλημα σε γραμμική μορφή περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$\underset{M \times 1}{\Delta \mathbf{C}} = \underset{M \times N}{\mathbf{J}} \underset{N \times 1}{\Delta \boldsymbol{\varepsilon}} \quad (48)$$

όπου J είναι η μήτρα κατανεμημένης ευαισθησίας του συστήματος δηλαδή η ευαισθησία ως προς την θέση κάθε ζεύγους ηλεκτροδίων. Αρα τελικά καταλήξαμε σε μία γραμμική μητρική σχέση για το γενικότερο ευθύ πρόβλημα υπό την προϋπόθεση ότι ικανοποιείται επαρκώς η γραμμική προσέγγιση. Αυτό πράγματι ισχύει σε εφαρμογές με μικρές μεταβολές της διηλεκτρικής σταθεράς σε όλο το πεδίο.

Η προηγούμενη εξίσωση μετά από κανονικοποίηση γράφεται στην ακόλουθη κανονική μορφή

$$\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{S} \mathbf{g} \quad (49)$$

όπου $\boldsymbol{\lambda}, \mathbf{g}$ είναι τα διανύσματα κανονικοποιημένης χωρητικότητας, διηλεκτρικής σταθεράς και \mathbf{S} η μήτρα κανονικοποιημένης ευαισθησίας.

Η μήτρα \mathbf{S} περιέχει M ανεξάρτητους όρους αλλά σε συστήματα με συμμετρικά ηλεκτρόδια οι ανεξάρτητοι όροι ελαττώνονται επιπλέον σε $\frac{n}{2}$ λόγω συμμετρίας όπως αποδεικνύεται [29].

Στόχος της ECT για την ανακατασκευή της διηλεκτρικής κατανομής είναι από την γνώση του διανύσματος χωρητικότητας $\boldsymbol{\lambda}$ να υπολογιστεί μέσω της σχέσης να βρεθεί το άγνωστο διάνυσμα \mathbf{g} . Πρέπει να σημειώσουμε εδώ ότι στην γραμμική μητρική σχέση η μήτρα \mathbf{S} παρόλο που θεωρείται σταθερή για απλότητα στην πραγματικότητα εξαρτάται από την δεδομένη διηλεκτρική κατανομή.

Η επίλυση της μητρικής σχέσης παρουσιάζει δύο κύρια προβλήματα.

- Είναι ασθενώς προσδιορισμένη καθώς οι άγνωστες τιμές είναι N ο αριθμός των pixel της απεικόνισης δηλαδή ενώ οι διαθέσιμες εξισώσεις είναι M ο αριθμός των ανεξάρτητων μετρήσεων χωρητικότητας.
- Αποδεικνύεται ότι η ολοκληρωτική εξίσωση είναι ill posed όπως και η αντίστοιχη μητρική σχέση που καταλήξαμε. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι η λύση είναι ευαίσθητη σε μικρές διαταραχές. Τέλος η μήτρα \mathbf{S} δεν είναι όπως είπαμε σταθερή αλλά εξαρτάται από την εκάστοτε κατανομή διηλεκτρικής σταθεράς.

Οι μέθοδοι λύσης της εξίσωσης χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Τις μη αναδρομικές όπου η λύση προκύπτει σε ένα βήμα και σε αναδρομικές.

Linear back-projection

Εάν υπήρχε η αντίστροφη μήτρα της \mathbf{S} τότε η λύση θα προέκυπτε απευθείας από την παρακάτω σχέση

$$\mathbf{g} = \mathbf{S}^{-1}\boldsymbol{\lambda} \quad (50)$$

ωστόσο δυστυχώς αυτή δεν είναι γνωστή συνεπώς άλλες μέθοδοι πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Εάν θεωρήσουμε την αρχική σχέση ως μία απεικόνιση από τον διανυσματικό χώρο των διηλεκτρικών σταθερών στο χώρο διανυσμάτων χωρητικότητας μπορούμε να θεωρήσουμε και μία αντίστοιχη απεικόνιση από αυτόν στον πρώτο και θα περιγράφεται από την προσεγγιστική εξίσωση

$$\hat{\mathbf{g}} = \mathbf{S}^T\boldsymbol{\lambda} \quad (51)$$

Εάν ο χώρος του πεδίου του αισθητήρα πληρωθεί αρχικά από ένα υλικό χαμηλότερης διηλεκτρικής σταθεράς και κατόπιν από ένα υψηλότερης τότε η κανονικοποιημένη αλλαγή στην χωρητικότητα θα είναι \mathbf{u}_λ και η αντίστοιχη αλλαγή στην διηλεκτρική σταθερά $\mathbf{S}^T\mathbf{u}_\lambda$. Εάν η μετρούμενη κανονικοποιημένη αλλαγή στην χωρητικότητα είναι $\boldsymbol{\lambda}$ τότε η αντίστοιχη αλλαγή στην διηλεκτρική σταθερά δίνεται από την σχέση

$$\hat{\mathbf{g}} = \frac{\mathbf{S}^T\boldsymbol{\lambda}}{\mathbf{S}^T\mathbf{u}_\lambda}, \mathbf{u}_\lambda = [1,1,\dots,1] \quad (52)$$

Η διαίρεση των δύο διανυσμάτων ορίζεται ως η διαίρεση σε ένα στοιχείο το αριθμητή με το αντιστίχο του παρονομαστή.

Η πρώτη απόπειρα ανακατασκευής σε συστήματα ECT έγιναν χρησιμοποιώντας την μέθοδο αυτή [29]. Αν και η μέθοδος είναι περισσότερο εμπειρική και με ελλιπή μαθηματική θεμελίωση λόγω της απλότητας της είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη σε συστήματα πραγματικού χρόνου. Ωστόσο δημιουργεί εικόνες φτωχής ποιότητας και δίνει κυρίως ποιοτική και όχι ποσοτική πληροφορία.

III. Αισθητήρας Μέτρησης «περιεχομένου ύδατος»

III.1 Παρουσίαση

III.1.1 Το πρόβλημα

Στις μέρες μας μεγαλώνει διαρκώς η ζήτηση για καλύτερη και ταχύτερη επεξεργασία των προϊόντων στην βιομηχανία. Επιτακτική συνεπώς είναι και η ανάγκη για αυτοματοποιημένες διαδικασίες παρακολούθησης της ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων. Μια παράμετρος με εξαιρετική σημασία σε πολλές γραμμές παραγωγής είναι και το "περιεχόμενο ύδατος" δηλαδή η υγρασία του παραγόμενου προϊόντος. Η παράμετρος αυτή πρέπει να παραμένει μεταξύ στενών ορίων ώστε να διασφαλίζεται η υψηλή ποιότητα του τελικού προϊόντος και για να ικανοποιούνται η προδιαγραφές του.

Επομένως υπάρχει έντονη ανάγκη για την συνεχή μέτρηση και καταγραφή του "περιεχομένου ύδατος" τόσο για την παρακολούθηση της ποιότητας αλλά και για διόρθωση και ρύθμιση των παραμέτρων που ελέγχουν την γραμμή παραγωγής. Επιπλέον οι αισθητήρες μέτρησης δεν θα πρέπει να έρχονται σε επαφή με τελικό προϊόν ώστε να δημιουργούνται σημάδια την επιφάνεια του. Οι μετρήσεις πρέπει να γίνονται σε πραγματικό χρόνο και σε αρκετά σημεία κατά μήκος της γραμμής παραγωγής. Οι αισθητήρες θα πρέπει να λειτουργούν σε βιομηχανικό περιβάλλον, υπό ακραίες συνθήκες όπως για παράδειγμα μέσα σε ένα φούρνο ξήρανσης που ελέγχει την υγρασία του προϊόντος [31]. Επειδή απαιτείται η εγκατάσταση μεγάλου αριθμού τέτοιων αισθητήρων το κόστος τους θα πρέπει να είναι μικρό χωρίς όμως να μειώνεται η ακρίβεια μέτρησης και η αξιοπιστία τους.

Οι τεχνικές που ήδη χρησιμοποιούνται μπορούν να καταταχθούν σε πολλές κατηγορίες. Σε αυτές περιλαμβάνονται υπέρυθη ή RF ακτινοβολία του υλικού και μέτρηση της απορροφώμενης ακτινοβολίας, μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιώντας κατάλληλα ηλεκτρόδια για την επαφή με το προϊόν καθώς και εργαστηριακά πειράματα μέτρησης της απώλειας βάρους του υλικού μετά από παρατεταμένη θέρμανση.

Με βάση όσα έχουμε αναφέρει σε προηγούμενες ενότητες φαίνεται ότι ένα σύστημα με αισθητήρες χωρητικού τύπου θα μπορούσε να δώσει λύση στο παραπάνω πρόβλημα αντικαθιστώντας πιο ακριβά συστήματα. Ήδη τα τελευταία χρόνια γίνεται σημαντική έρευνα πάνω στην χρήση συστημάτων χωρητικών αισθητήρων για την τομογραφία πολυφασικών ροών και διαδικασιών. Σε πολλά συστήματα κλιματισμού η μέτρηση της υγρασίας γίνεται με χωρητικού αισθητήρες που μετρώνε τις αλλαγές της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς μίας υδρόφιλης μεμβράνης.

III.1.2 Αρχή λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας ενός συστήματος μέτρησης του "περιεχομένου ύδατος" προϊόντος στηρίζεται στην μέτρηση με ακρίβεια των αλλαγών της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς του προϊόντος. Είναι γνωστό ότι το απεσταγμένο νερό έχει μεγάλη σχετική διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_{r(H_2O)} \approx 80$ σε σύγκριση με τις σταθερές των περισσοτέρων στερεών [31] (δες Παράρτημα). Επομένως και μία μικρή ποσότητα νερού μέσα σε ένα υλικό αναμένεται να επηρεάζει σημαντικά την συνολική σχετική διηλεκτρική σταθερά του προϊόντος. Περνώντας το υλικό κοντά ή ανάμεσα από τις πλάκες ενός πυκνωτή με αλλαγές στο περιεχόμενο ύδατος θα έχουμε σημαντικές αλλαγές στην τιμή της μετρούμενης χωρητικότητας μεταξύ των πλακών. Μία ανάλυση μαζί με αντίστοιχο μοντέλο τις επίδρασης του περιεχομένου σε νερό δίνεται στην αναφορά [32],[33]. Με την πρόοδο των ηλεκτρονικών είναι σήμερα δυνατό να μετρήσουμε με ακρίβεια πολύ μικρές αλλαγές στην χωρητικότητα της τάξης του 10^{-3} pF [34],[35]. Οι παραπάνω αλλαγές θα οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στην αλλαγή της υγρασίας του προϊόντος αν θεωρήσουμε ότι η σύσταση και η ομοιογένεια του παραμένουν σχετικά σταθερές.

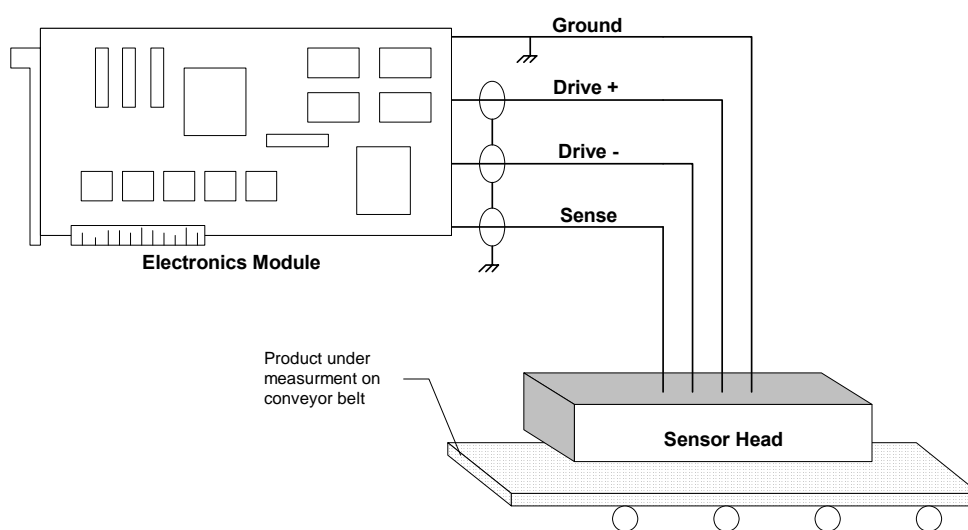
Αν και η αρχή λειτουργίας είναι απλή θα πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη επιπλέον παράμετροι κατά την σχεδίαση του αισθητήρα. Η επιλογή της διάταξης των ηλεκτροδίων και των αποστάσεων θα πρέπει να μεγιστοποιεί την ευαισθησία του αισθητήρα ενώ παράλληλα η μέτρηση δεν θα πρέπει να εξαρτάται από μικρές αλλαγές στις διαστάσεις ή την θέση του προϊόντος, πράγμα πολύ πιθανό σε μία γραμμή παράγωγής. Παράμετροι όπως θερμοκρασία, υγρασία του αέρα ή επίδραση κοντινών μεταλλικών αντικειμένων δεν θα πρέπει να επηρεάζουν τον αισθητήρα ή τουλάχιστον η επίδρασή τους να αντισταθμίζεται. Ο τελικός αισθητήρας πρέπει να είναι αξιόπιστος, ανθεκτικός και να εγκαθίσταται εύκολα σε ήδη υπάρχουσες γραμμές παραγωγής. Τέλος βαθμονόμηση του θα πρέπει να γίνεται με σχετικά απλές διαδικασίες.

Αυτός ακριβώς είναι και ένας από τους στόχους μας. Δηλαδή να μελετηθεί και βελτιστοποιηθεί η σχεδίαση ενός χωρητικού αισθητήρα που θα ικανοποιεί τις παραπάνω απαιτήσεις με κατάλληλο σχεδιασμό των ηλεκτροδίων μέτρησης και επιλογή ηλεκτρονικού συστήματος μέτρησης.

III.2 Σχεδίαση

III.2.1 Δομή του συστήματος

Το συνολικό σύστημα αποτελείται από δύο μέρη τον αισθητήρα με κατάλληλα διατεταγμένα ηλεκτρόδια και την μονάδα των ηλεκτρονικών για την οδήγηση του αισθητήρα και την ενίσχυση – επεξεργασία της εξόδου του αισθητήρα όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



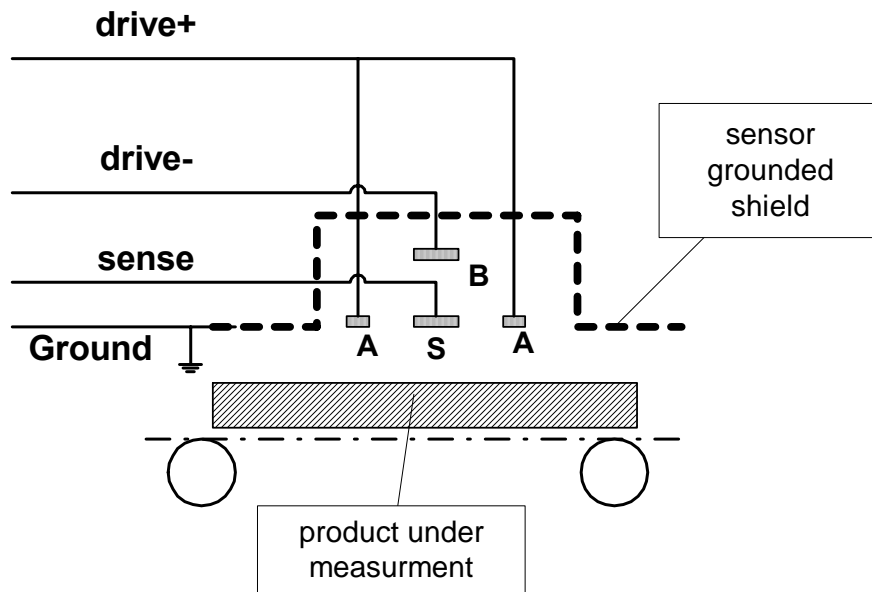
Σχ. 12 Η διασύνδεση κεφαλής αισθητήρα με τα ηλεκτρονικά σε μπλόκ διάγραμμα.

Ο αισθητήρας συνδέεται με την μονάδα ηλεκτρονικών μέσω ενός αριθμού ομοαξονικών καλωδίων για την μεταφορά των ηλεκτρικών σημάτων. Η παραπάνω διάταξη δίδει μέγιστη ευελιξία καθώς επιτρέπει την τοποθέτηση του αισθητήρα ακόμη και μέσα στο φούρνο ξήρανσης εφόσον χρησιμοποιηθούν ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες υλικά για την κατασκευή του αισθητήρα και των καλωδίων διασύνδεσης. Επιπλέον δίνει την δυνατότητα η μονάδα των ηλεκτρονικών να τοποθετείται σε ελεγχόμενο χώρο μακριά από σκόνη, υγρασία και υψηλές θερμοκρασίες.

Στο Σχ. 13 φαίνεται η βασική δομή του αισθητήρα που χρησιμοποιήσαμε. Αποτελείται από τρεις τύπους ηλεκτροδίων. Τα ηλεκτρόδια **A** και **B** είναι ηλεκτρόδια διέγερσης ενώ το **S** είναι το κυρίως ηλεκτρόδιο του αισθητήρα. Οι παραπάνω ρόλοι των ηλεκτροδίων θα φανούν καλύτερα από την ανάλυση που ακολουθεί στην επόμενη ενότητα. Προς το παρόν αναφέρουμε ότι η παραπάνω διάταξη ηλεκτροδίων επαναλαμβάνεται περιοδικά ώστε να πολλαπλασιάζονται οι μετρούμενες

χωρητικότητες και να αυξάνει η ευαισθησία του αισθητήρα. Όλα τα ηλεκτρόδια περικλείονται από μεταλλική ηλεκτρική θωράκιση.

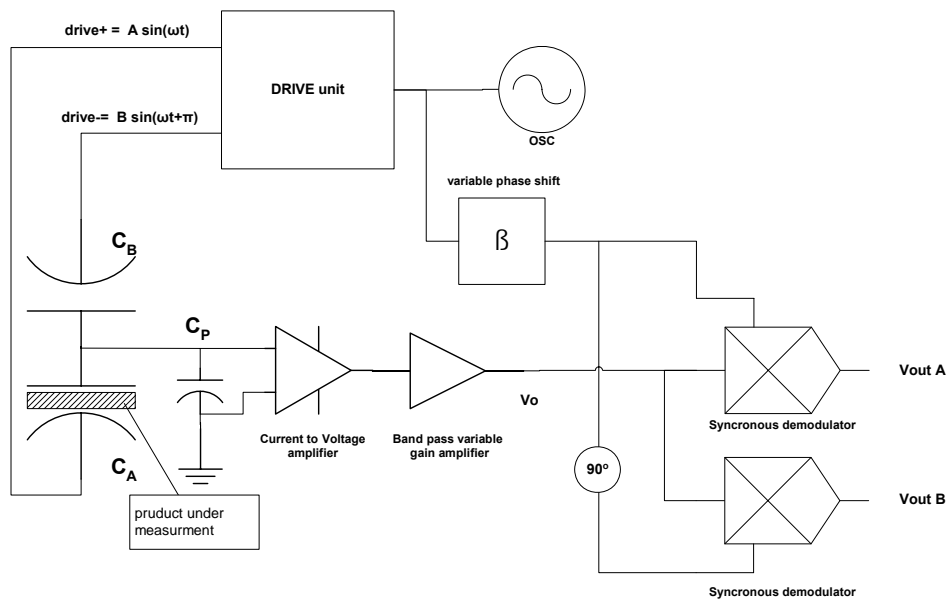
Η θωράκιση του αισθητήρα γειώνεται ενώ υπάρχουν δύο σήματα οδήγησης τα **drive+**, **drive-** και ένα σήμα εξόδου το **sense**, ένα για κάθε ομάδα ηλεκτροδίων.



Σχ. 13 Ο αισθητήρας χωρητικότητας σε εγκάρσια τομή με την διάταξη ηλεκτροδίων και τα απαιτούμενα ηλεκτρικά σήματα.

III.2.2 Μαθηματική περιγραφή της λειτουργίας του αισθητήρα

Στο Σχ. 14 φαίνεται ένα μπλοκ διάγραμμα του ηλεκτρονικού συστήματος που συνεργάζεται με τον αισθητήρα. Πρόκειται βασικά για ένα AC τύπου κύκλωμα μέτρησης. Το υποσύστημα οδήγησης οδηγεί τα ηλεκτρόδια τύπου **A**, **B** με δύο ημιτονοειδή σήματα μεταβλητού πλάτους και ίδιας συχνότητας με σταθερή διαφορά φάσης 90° μεταξύ τους. Το κυρίως ηλεκτρόδιο **S** συνδέεται στην είσοδο ενός ενισχυτή ρεύματος σε τάση (ενισχυτής διαντίστασης). Λόγω της μηδενικής αντίστασης εισόδου του ενισχυτή το ηλεκτρόδιο **S** είναι ουσιαστικά γειωμένο συνεπώς κάθε παρασιτική χωρητικότητα C_p μεταξύ αυτού του ηλεκτροδίου και της γης δεν διαρέεται από ρεύμα και δεν επηρεάζει την έξοδο του συστήματος. Το ίδιο ισχύει και για τις παρασιτικές χωρητικότητες των ηλεκτροδίων τύπου **A**, **B** ως προς την γη εφόσον το κύκλωμα οδήγησης του έχει επαρκώς μικρή αντίσταση εξόδου ώστε να μην επηρεάζεται η τάση οδήγησης των ηλεκτροδίων από αλλαγές στην χωρητικότητα..



Σχ. 14 Μπλόκ διάγραμμα του ηλεκτρονικού συστήματος του αισθητήρα.

Επομένως μόνο δύο χωρητικότητες συμμετέχουν στην έξοδο του κυκλώματος αυτή μεταξύ των ηλεκτροδίων A, S C_A και αυτή μεταξύ των B, S C_B . Η τάση εξόδου V_1 του ενισχυτή διαντίστασης υπολογίζεται εύκολα με χρήση στοιχειώδους ανάλυσης κυκλωμάτων AC ως

$$V_1 = (A_1 \cdot C_A - B_1 \cdot C_B) \cdot Z_f \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t + 90^\circ) \quad (53)$$

όπου A_1, B_1 τα πλάτη των σημάτων οδήγησης των ηλεκτροδίων A, B αντίστοιχα, Z_f το κέρδος του ενισχυτή και ω η συχνότητα.

Στην παραπάνω σχέση μόνο η χωρητικότητα C_A εξαρτάται από το υλικό που βρίσκεται κάτω από τον αισθητήρα ενώ η C_B παίζει ρόλο στοιχείου αντιστάθμισης. Με κατάλληλη ρύθμιση του πλάτους των σημάτων οδήγησης μπορούμε να μηδενίσουμε τον όρο μέσα στην παρένθεση δηλαδή και την τάση εξόδου. Τότε για κάθε αλλαγή ΔC στην τιμή της χωρητικότητας C_A θα έχουμε μη μηδενική τάση εξόδου

$$V = A_o \cdot \Delta C \cdot Z_f \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t + 90^\circ) \quad (54)$$

όπου A_o το πλάτος του σήματος οδήγησης των ηλεκτροδίων A μετά τον μηδενισμό. Από την σχέση αυτή βλέπουμε ότι το πλάτος της τάσης εξόδου εξαρτάται γραμμικά με την μεταβολή της χωρητικότητας ΔC , το πλάτος διέγερσης A_o και την συχνότητα ω .

Ενας ζωνοπερατός ενισχυτής τάσης μεταβλητού κέρδους ενισχύει ακόμη περισσότερο το σήμα. Οι συχνότητες αποκοπής αυτού επιλέγονται σχετικά μακριά

από την συχνότητα λειτουργίας του συστήματος ω και αρκετά πάνω από την AC συχνότητα του δικτύου παροχής ηλεκτρικής ισχύος (50-60Hz). Ο ρόλος του ενισχυτή είναι διπλός, Ενισχύει το σήμα στην επιθυμητή τάση εξόδου και ταυτόχρονα απορρίπτει όλες τις ανεπιθύμητες συχνότητες που περιέχει το σήμα. Σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον λόγω της ανοικτής μορφής των ηλεκτροδίων αναμένεται σημαντικές ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές στην συχνότητα του δικτύου ισχύος και τις αρμονικές της. Τέτοιες παρεμβολές σε συνδιασμό με το μεγάλο κέρδος τάσης που απαιτείται για αύξηση της ευασθησίας του συστήματος θα μπορούσαν εύκολα να οδηγήσουν σε κορεσμό τις τελευταίες βαθμίδες ενίσχυσης.

Τελικά το σήμα οδηγείται στην είσοδο ενός σύγχρονου αποδιαμορφωτή. Το σήμα αναφοράς αυτού προέρχεται από τον τοπικό ταλαντωτή μέσω ενός κυκλώματος μεταβολής της φάσης. Η εξοδος του V_{out} είναι μία DC τάση που προκύπτει από το εναλασσόμενο σήμα εισόδου ως

$$V_{out} = \kappa A_o \cos(\theta) \quad (55)$$

Οπου κ είναι μία σταθερά που παριστά το κέρδος του αποδιαμορφωτή, A_o το πλάτος του εναλασσόμενου σήματος εισόδου και θ η διαφορά φάσης μεταξύ των σήματος εισόδου και αναφοράς. Κάθε άλλο σήμα, συχνότητας διαφορετικής από ω απορρίπτεται. Με ρύθμιση της διαφοράς φάσης μπορούμε να μεγιστοποιήσουμε την έξοδο του αποδιαμορφωτή. Το κύκλωμα αυτό αν και σχετικά πολύπλοκο έχει άριστες επιδόσεις[35].

Ένα επιπλέον πλεονέκτημα του συγκεκριμένου κυκλώματος είναι ότι μπορεί να δώσει εύκολα και την συνιστώσα απωλειών της μετρούμενης χωρητικότητας. Απαιτείται επιπλέον ένας ίδιος αποδιαμορφωτής και ένα κύκλωμα αλλαγής φάσης 90° . Η έξοδος αυτού θα είναι ανάλογη της όποιας ολισθημένης κατά 90° συνιστώσα του σήματος εισόδου δηλαδή στην περίπτωση μας του ωμικού μέρους της μετρούμενης σύνθετης αντίστασης.

III.2.3 Σχεδίαση του αισθητήρα

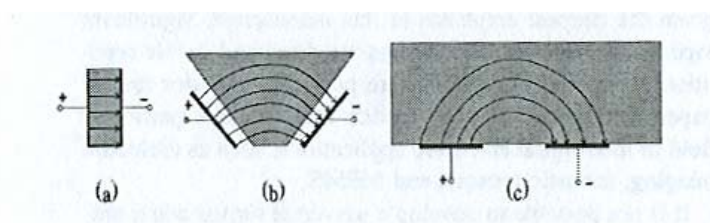
Ο ιδανικός αισθητήρας για το σύστημα θα ήταν ένας πυκνωτής παραλλήλων πλακών με το υλικό να περνά μεταξύ των πλακών του. Σε αυτή την περίπτωση η επίδραση αλλαγών στην θέση και στο πάχος του υλικού πάνω στην μετρούμενη χωρητικότητα θα μπορούσαν εύκολα να περιγραφούν σε κλειστή αναλυτική μορφή. Το ίδιο και η επίδραση των αλλαγών στο περιεχόμενο ύδατος.

Ωστόσο μία τέτοια διάταξη πολλές φορές, δεν μπορεί να εφαρμοστεί για πρακτικούς λόγους. Για παράδειγμα πολλά προϊόντα παράγονται σε μορφή φύλλων μικρού πάχους και μεγάλου πλάτους. Εγκατάσταση αισθητήρων παράλληλων πλακών για την τοπική μέτρηση της υγρασίας στο κέντρο θα ήταν πολύ δύσκολη. Αλλα προϊόντα

πάλι έχουν μεγάλες διαστάσεις εγκάρσιας τομής οπότε είναι αδύνατη η χρήση πυκνωτή παραλλήλων πλακών.

Συνήθως τα προϊόντα μεταφέρονται πάνω σε μεταλλικό ταινιόδρομο. Σε αυτή την περίπτωση λόγω της γειώσεως του ταινιόδρομου κάθε παρασιτική χωρητικότητα των ηλεκτροδίων του αισθητήρα ως προς τον ταινιόδρομο θα πρέπει να μελετηθεί σχολαστικά.

Επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε επίπεδες διατάξεις ηλεκτροδίων. Ένας πολύ διαδεδομένος τύπος επίπεδου πυκνωτή μεγάλης τεχνολογικής σημασίας είναι ο πυκνωτής επάλληλων ηλεκτροδίων (interdigitated capacitor). Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η εξέλιξη στον πυκνωτή επάλληλων ηλεκτροδίων από τον παράλληλων ηλεκτροδίων.

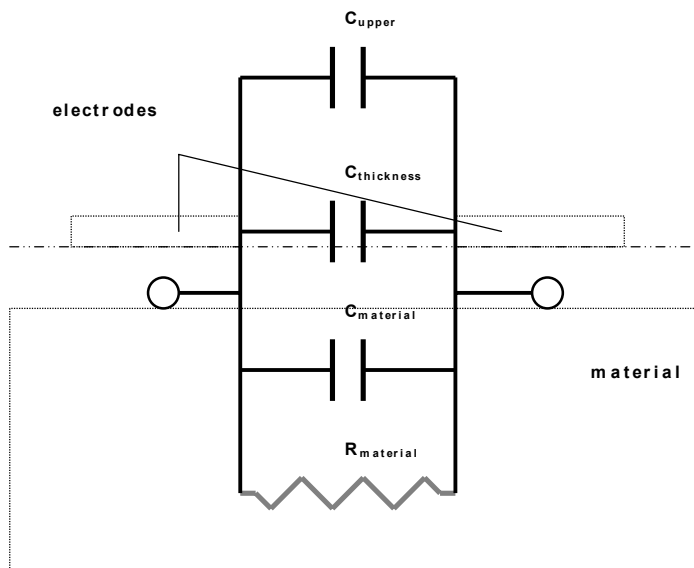


Σχ. 15 Η εξέλιξη στον πυκνωτή επάλληλων ηλεκτροδίων

Εχει μελετηθεί από πολλούς ερευνητές. Στην αναφορά [36] υπάρχει εκτενής παρουσίαση αισθητήρων βασισμένων σε επαλληλα ηλεκτρόδια. Βασικό πλεονέκτημά του είναι η ευκολία υλοποίησης με μεθόδους φωτολιθογραφίας σε ποικίλα υποστρώματα. Όπως φαίνεται και από το Σχ. 13 τα ομοεπίπεδα ηλεκτρόδια του αισθητήρα σχηματίζουν έναν πυκνωτή επάλληλων ηλεκτροδίων.

Για βελτίωση των επιδόσεων μπορούμε εύκολα να προσθέσουμε περισσότερα ηλεκτρόδια οπότε και η δομή προσεγγίζει ακόμη καλύτερα αυτή του πυκνωτή επάλληλων ηλεκτροδίων. Παράλληλα μπορούμε πίσω από ηλεκτρόδια S να τοποθετήσουμε και τα ηλεκτρόδια αντιστάθμισης που οδηγούνται αντισυμμετρικά από το σήμα **drive-**.

Μεταξύ των ηλεκτροδίων ενός αισθητήρα επίπεδης μορφής που γειτονεύουν με το προς μέτρηση υλικό μπορούμε να θεωρήσουμε ότι εμφανίζονται σύμφωνα και με την αναφορά [43] οι χωρητικότητες του Σχ. 16 .



Σχ. 16 Επιμέρους χωρητικότητες που αναπτύσσονται μεταξύ των ηλεκτροδίων πάνω από το προς μέτρηση υλικό.

Όπως βλέπουμε η συνολική χωρητικότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων αγνοώντας τα ηλεκτρόδια αντιστάθμισης διακρίνεται σε τρεις επιμέρους χωρητικότητες. Η C_{upper} περιλαμβάνει το πεδίο στον χώρο πίσω από τα ηλεκτρόδια. Η $C_{thickness}$ που γίνεται σημαντική για σχετικά παχέα ηλεκτρόδια μοντελοποιεί το πεπερασμένο πάχος των ηλεκτροδίων. Τέλος η $C_{material}$ είναι η κυρία χωρητικότητα του αισθητήρα καθώς περιλαμβάνει το πεδίο που διησδύει στο υλικό το οποίο θέλουμε να μετρήσουμε. Επιπλέον εάν το υλικό παρουσιάζει αγωγιμότητα παράλληλα σε αυτή θεωρούμε και την ύπαρξη ωμικής αντίστασης που περιγράφει τις απώλειες του εναλλασσόμενου ηλεκτρικού πεδίου μέσα στο υλικό προς μέτρηση.

Γενικά θεωρούμε ότι οι δύο πρώτες χωρητικότητες είναι σταθερές και δεν επηρεάζονται από το υλικό που βρίσκεται κάτω από τον αισθητήρα. Αρα μπορούν να θεωρηθούν ως σφάλματα μέτρησης στην επιθυμητή τιμή που είναι η τρίτη από αυτές και επομένως μέσω κατάλληλης τεχνικής αντιστάθμισης να αφαιρεθούν από αυτή. Στην ανάλυση που θα ακολουθήσει σε επόμενες παραγράφους θα επικεντρωθούμε κυρίως στον υπολογισμό την $C_{material}$ και θα αγνοήσουμε σιωπηρά τις άλλες δύο.

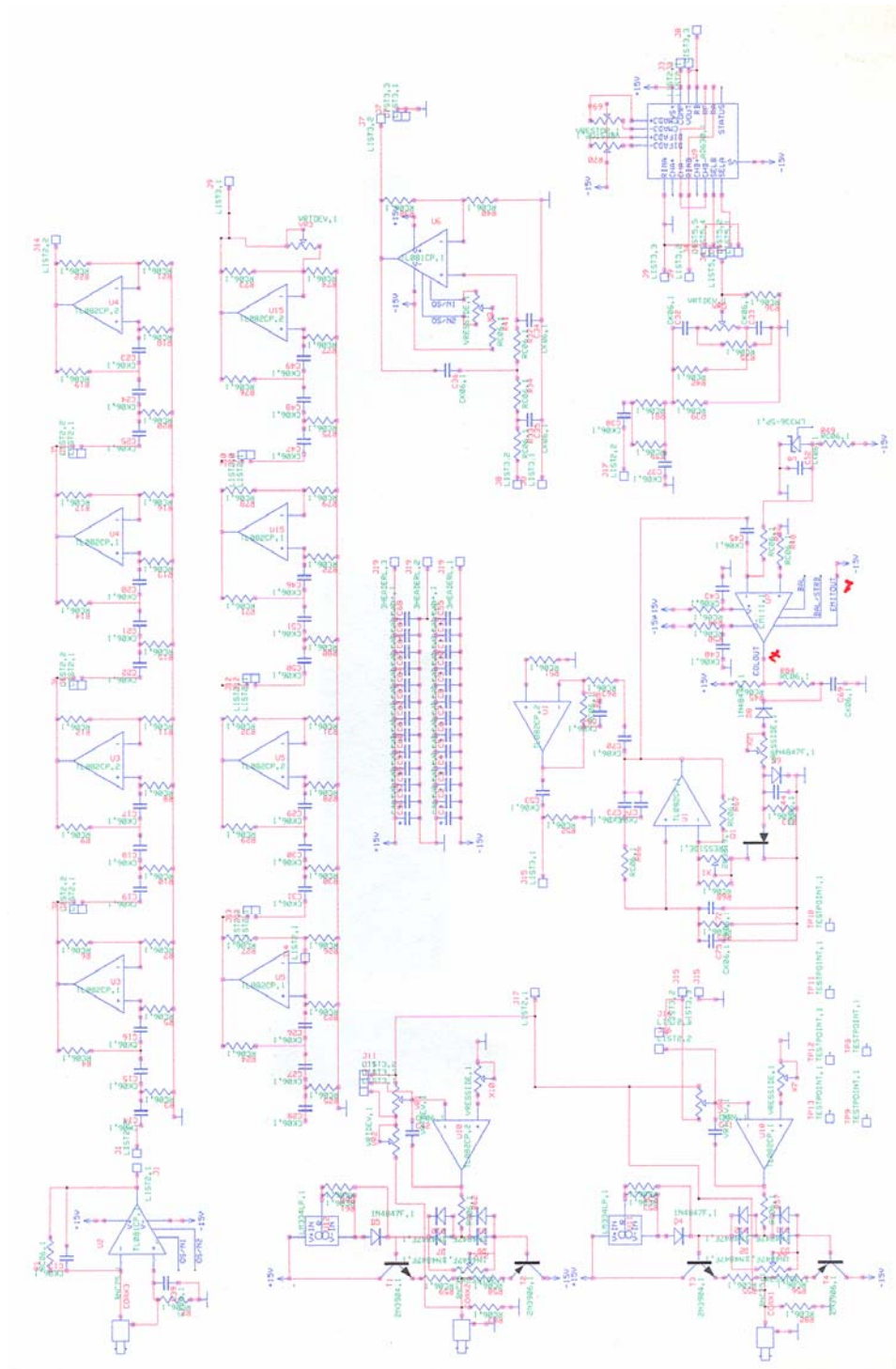
III.3 Υλοποίηση - Εγκατάσταση

III.3.1 Ηλεκτρονικό κύκλωμα μέτρησης

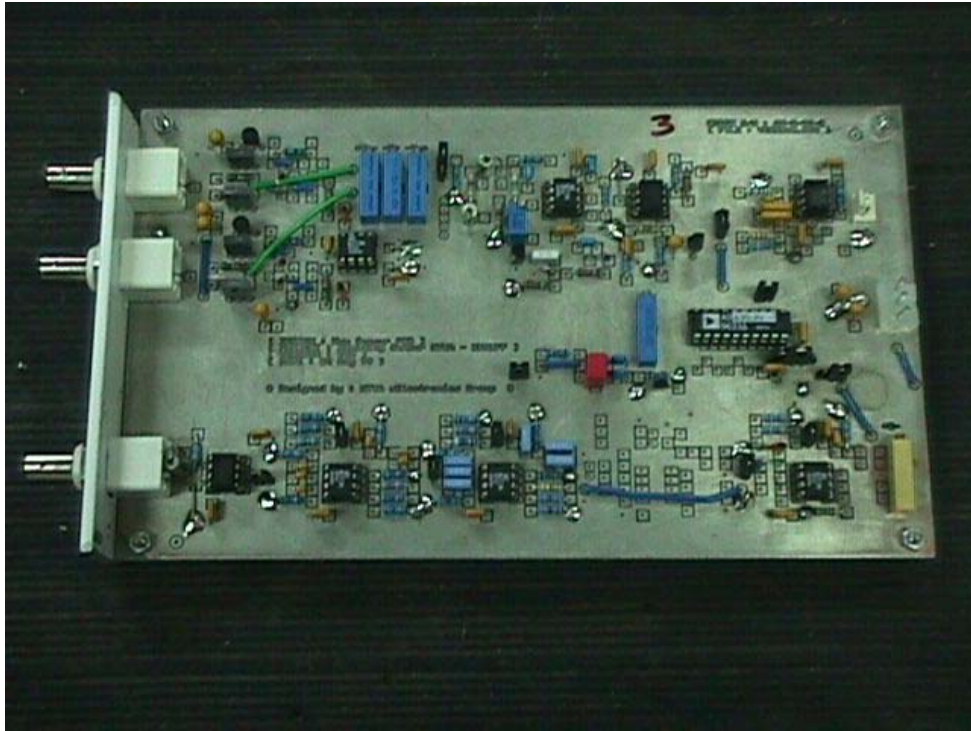
Στο Σχ. 17 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος που χρησιμοποιήσαμε για την μέτρηση της χωρητικότητας μεταξύ των ηλεκτροδίων του αισθητήρα. Η υλοποίηση σε πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (PCB) φαίνεται στα Σχ. 18 και Σχ. 19.

Όπως βλέπουμε σύμφωνα και με το μπλόκ διάγραμμα στο Σχ. 14 έχουμε ένα στάδιο εισόδου με έναν τελεστικό ενισχυτή σε διάταξη ενίσχυσης διαντίστασης που ακολουθείται από μία σειρά σταδίων ενίσχυσης τάσης. Τα στάδια ενίσχυσης έχουν χαμηλή συχνότητα αποκοπής μερικών ΚHz. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται να έρθουν σε κορεσμό οι τελικές βαθμίδες ενίσχυσης λόγω παρεμβολών στην βιομηχανική συχνότητα των 50Hz ή βασικά πολλαπλάσια αυτής. Πράγματι τέτοιες παρεμβολές παρατηρήθηκαν κατά την εγκατάσταση του συστήματος λόγω της ανοικτής φύσης των ηλεκτροδίων και το πλάτος τους στα πρώτα στάδια ενίσχυσης ήταν σαφώς μεγαλύτερο το πλάτος του λαμβανομένου σήματος στην συχνότητα οδήγησης.

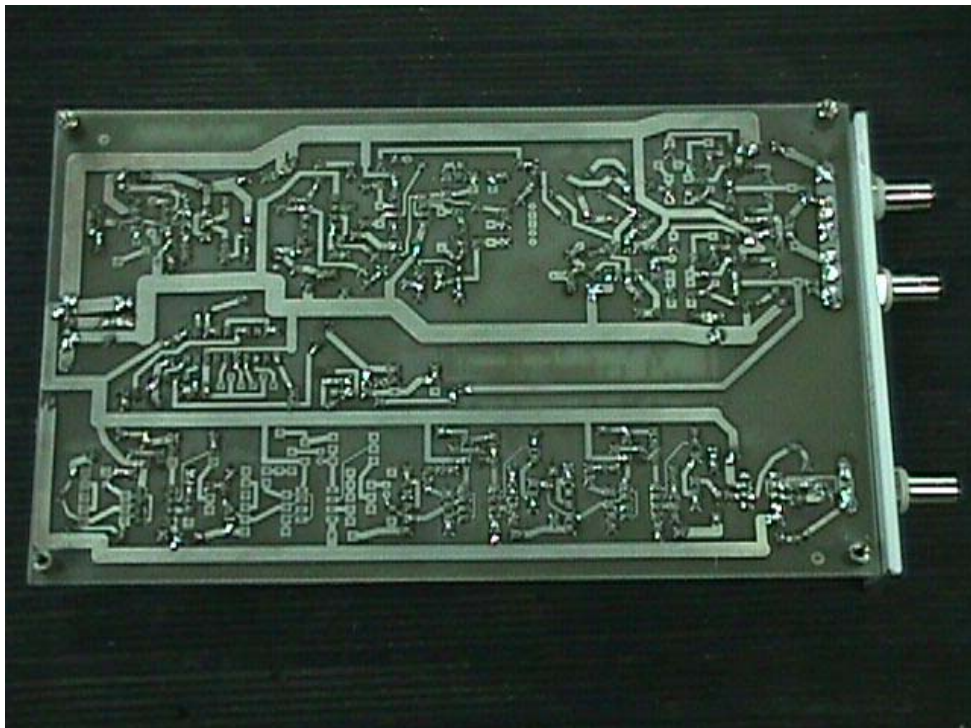
Όλες οι βαθμίδες ενίσχυσης βασίστηκαν στον τελεστικό ενισχυτή AD827 καθώς αυτός συνδυάζει χαμηλά ρεύματα πόλωσης και μεγάλο φάσμα συχνοτήτων λειτουργίας με συχνότητα μοναδιαίου κέρδους ανοικτού βρόγχου πάνω από 10MHz.



Σχ. 17 Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος μέτρησης χωρητικότητας



Σχ. 18 Φωτογραφία της πλακέτας (PCB) του κυκλώματος μέτρησης (Component Side)



Σχ. 19 Φωτογραφία της πλακέτας (PCB) του κυκλώματος μέτρησης (Solder Side)

Για να αποφύγουμε φαινόμενα φαινόμενα θερμοκρασιακής επίδρασης καθώς και μη γραμμικότητας το κέρδος κάθε μίας των βαθμίδων ενίσχυσης ήταν μικρότερο από 10.

Στο τελικό στάδιο πριν την αποδιαμόρφωση ένα απλό βαθυπερατό φίλτρο με συχνότητα αποκοπής μερικών MHz φιλτράριζε τις όποιες περαμβολές σε συχνότητες άνω της συχνότητας λειτουργίας του συστήματος.

Για την αποδιαμόρφωση χρησιμοποιήσαμε τον σύγχρονο αποδιαμορφωτή AD630. Η λειτουργία του βασίζεται στην προσθαφαίρεση την έξοδο της κυματομορφής εισόδου ανάλογα με την πολικότητα ενός σήματος αναφοράς που έχει την ίδια ακριβώς συχνότητα με το σήμα οδήγησης (δες Παράρτημα). Αν τοποθετήσουμε στην έξοδο ένα βαθυμερατό φίλτρο πολύ χαμηλής συχνότητας μερικών Hz που δρά ουσιαστικά ως ολοκληρωτής στον χρόνο τότε μόνο τα εναλλασσόμενα σήματα που είναι στα φάση με το σήμα αναφοράς ενισχύονται, καθώς οι θετικές και αρνητικές περιόδους τους εμφανίζονται πάντα θετικές στην έξοδο. Τελικά η έξοδος είναι ένα σήμα DC πλάτους ανάλογου με το πλάτος της συνιστώσας της κυματομορφής εισόδου στην συχνότητα του σήματος αναφοράς. Η έλειψη αναλογικού πολλαπλασιαστή που παρουσιάζει πολλά προβλήματα υλοποίησης καθιστά το συγκεκριμένο ολοκληρωμένο ιδανικό για εφαρμογές μέσης συχνότητας στην περιοχή 100KHz – 1MHz.

Όπως αναφέραμε και κατά την μαθηματική περιγραφή της λειτουργίας του συστήματος η εξόδός του είναι ευθέως ανάλογη του πλάτους και της συχνότητας της ημιτονοειδούς κυματομορφής οδήγησης. Είναι απαραίτητη επομένως η σταθεροποίηση του τοπικού ταλαντωτή παραγωγής της συχνότητας οδήγησης ως προς πλάτος και συχνότητα. Όπως φαίνεται και στο σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος αυτός είναι βασικά ένας ταλαντωτής Wein με ανάδραση για την σταθεροποίηση του πλάτους μέσω ενός jfet. Ανάλογα με την τιμή του πλάτους εξόδου συγκρινόμενη με αυτή μιας τάσης αναφοράς αλλάζει η πόλωση του jfet άρα και η αντίστασή του συνεπώς έχουμε και ενίσχυση ή αποσβεση στο κύκλωμα ταλάντωσης. Η συχνότητα της ταλάντωσης εξαρτάται μόνο από τις τιμές των αντιστάσεων και τον πυκνωτών του κυκλώματος ταλαντωτή για το λόγω αυτό επιλέχθηκαν πυκνωτές και αντιστάσεις καλής ποιότητας και σταθερότητας σε θερμοκρασιακές μεταβολές.

Το στάδιο οδήγησης των ηλεκτροδίων του αισθητήρα είναι πολύ βασικό. Όπως έχουμε πει σε προηγούμενη παράγραφο για να αγνοηθεί η επίδραση των παρασιτικών χωρητικότητας πρέπει η αντίσταση εξόδου του κυκλώματος οδήγησης να είναι πολύ μικρή. Επειδή η οδήγηση του των ηλεκτροδίων γίνεται μέσω ομοαξονικών καλωδίων πρέπει αυτό να είναι ικανό να οδηγήσει μία σχετικά μεγάλη τιμή παρασιτική χωρητικότητας. Επιπλέον η τάση εξόδου του συστήματος όπως προκύπτει από την μαθηματική περιγραφή είναι ευθέως ανάλογη του σήματος οδήγησης. Άρα είναι επιθυμητό η τάση οδήγησης να έχει το μέγιστο δυνατό πλάτος. Η διάταξη push-pull στο κύκλωμα εξόδου επιτρέπει μεγάλο πλάτος οδήγησης με χαμηλή τιμή αντίστασης εξόδου. Στο σχήμα βλέπουμε ότι αποτελείται από δύο όμοια κυκλώματα για την οδήγηση τόσο των κυρίων ηλεκτροδίων του αισθητήρα αλλά και των ηλεκτροδίων

αντιστάθμισης. Μέσω δύο ποτενσιομέτρων το βασικό πλάτος της των δύο αντισυμμετρικών σημάτων οδήγησης μπορεί να μεταβάλεται ανεξάρτητα ώστε να επιτυγχάνεται μηδενισμός της εξόδου του συστήματος και αντιστάθμιση.

Τέλος μέσω ενός τρίτου ποτενσιομέτρου για λεπτή ρύθμιση επιτυγχάνεται πλήρης μηδενική ρύθμιση. Πρακτικά λόγω μικρής διαφοράς στην φάση μεταξύ των σημάτων οδήγησης δεν είναι δυνατόν να πετύχουμε πλήρη μηδενισμό της εφόδου του συστήματος μόνο με την χρήση των παραπάνω ποτενσιομέτρων. Για τον σκοπό αυτό μεταξύ τα δύο κυκλώματα οδήγησης συνοδεύονται και από κύκλωμα διόρθωσης της φάσης τους. Αυτό αποτελείται από έναν μεταβλητό πυκνωτή αέρος τον οποίο μεταβάλλοντας επιτυγχάνουμε να έχουμε τελικά πάντα διαφορά φάσης 180° μεταξύ των δύο σημάτων οδήγησης.

III.3.2 Διαδικασία ρύθμισης-αντιστάθμισης

Όπως είπαμε και στην μαθηματική περιγραφή του κυκλώματος μέτρησης με πλήρη αντιστάθμιση του συστήματος η εξόδός είναι ανάλογη της μεταβολής της μετρούμενης χωρητικότητας. Για να πετύχουμε πλήρη μηδενισμό της εξόδου πρέπει να ακολουθήσουμε την παρακάτω διαδικασία.

Αρχικά επιλέγουμε ένα μέτριο πλάτος για τα δύο σήματα οδήγησης ώστε μετά από την ενίσχυση να μην έχουμε κορεσμό των τελικών σταδίων. Κατόπιν ρυθμίζοντας το ένα από τα δύο πλάτη με το αντίστοιχο ποτενσιόμετρο προσπαθούμε να ελαχιστοποιήσουμε την έξοδο του συστήματος. Λόγω της μικρής διαφοράς φάσης μεταξύ των δύο κυκλωμάτων οδήγησης όπως είπαμε και παραπάνω είναι αδύνατον με την διαδικασία αυτή να επιτύχουμε πλήρη μηδενισμό της εξόδου. Αυτό φαίνεται και στην έξοδο του συστήματος πριν τον αποδιαμορφωτή όταν συνδεθεί σε παλμογράφο. Παρατηρούμε μία ολίσθηση στην φάση του λαμβανομένου σήματος που κάποια στιγμή γίνεται πλέον ορθογώνιο (90°) ως προς την αρχική του θέση. Αυτό είναι και το ελάχιστο πλάτος που μπορούμε να επιτύχουμε με χρήση των ποτενσιονέτρων μόνο.

Εδώ απαιτείται μια διόρθωση της φάσης μεταξύ των δύο σημάτων οδήγησης που επιγχανεται μεταβάλλοντας των μεταβλητό πυκνωτή. Μεταβάλλοντας αργά τον πυκνωτή αυτό ξανακάνουμε το σήμα στην έξοδο πριν την αποδιαμόρφωση ορθογώνιο ως προς την θέση του κατά την επίτευξη του πρώτου ελαχίστου. Τελικά με χρήση του ποτενσιομέτρου λεπτής ρύθμισης έχουμε την τελική ελαχιστοποίηση της εξόδου.

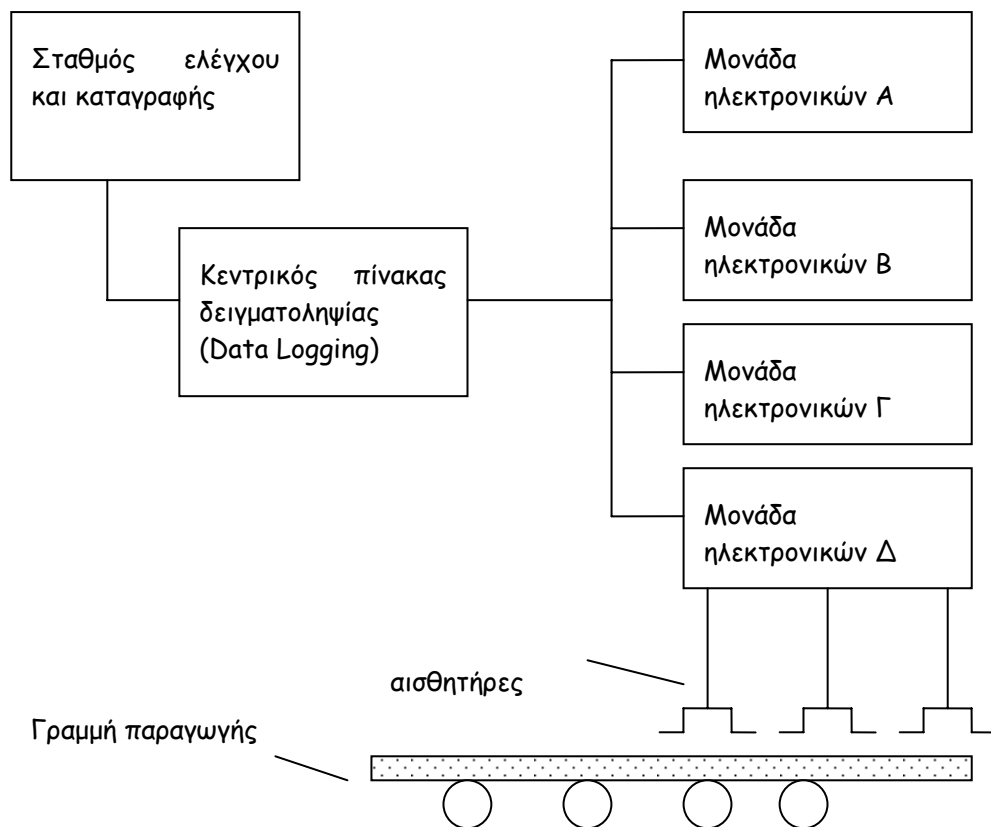
Πρακτικά όταν επιτύχουμε το δεύτερο ελάχιστο παρατηρούμε στον παλμογράφο ένα παραμένον μικρού πλάτους σήμα που οφείλεται στις μή γραμμικότητες των δύο κυκλωμάτων οδήγησης. Λόγω του πολύ μεγάλου κέρδους των βαθμίδων ενίσχυσης

το σήμα αυτό είναι εμφανές στην είσοδο και γίνεται μεγαλύτερο όσο μεγαλύτερο πλάτος επιλέγουμε για τα σήματα οδήγησης. Ωστόσο λόγω της σύγχρονης αποδιαμόρφωσης επειδή αποτελείται από συχνότητες εκτός τη βασικής συχνότητας απορίπτεται απο την βαθμίδα αποδιαμόρφωσης που ακολουθεί και δεν επηρεάζει την τελική έξοδο το συστήματος.

Με την διαδικασία αυτή επιτύχαμε να αντισταθμίσουμε το σύστημα και να μηδενίσουμε την εξοδό του. Χρησιμοποιώντας τώρα ξανά το πρώτο ποτενσίομετρο μπορούμε να αυξήσουμε απο κοινού το πλάτος των δύο σημάτων οδήγησης και να βελτιώσουμε την ευαισθησία του κυκλωματος όπως προκύπτει και από την Εξ. 54.

III.3.3 Εγκατάσταση σε βιομηχανικό περιβάλλον

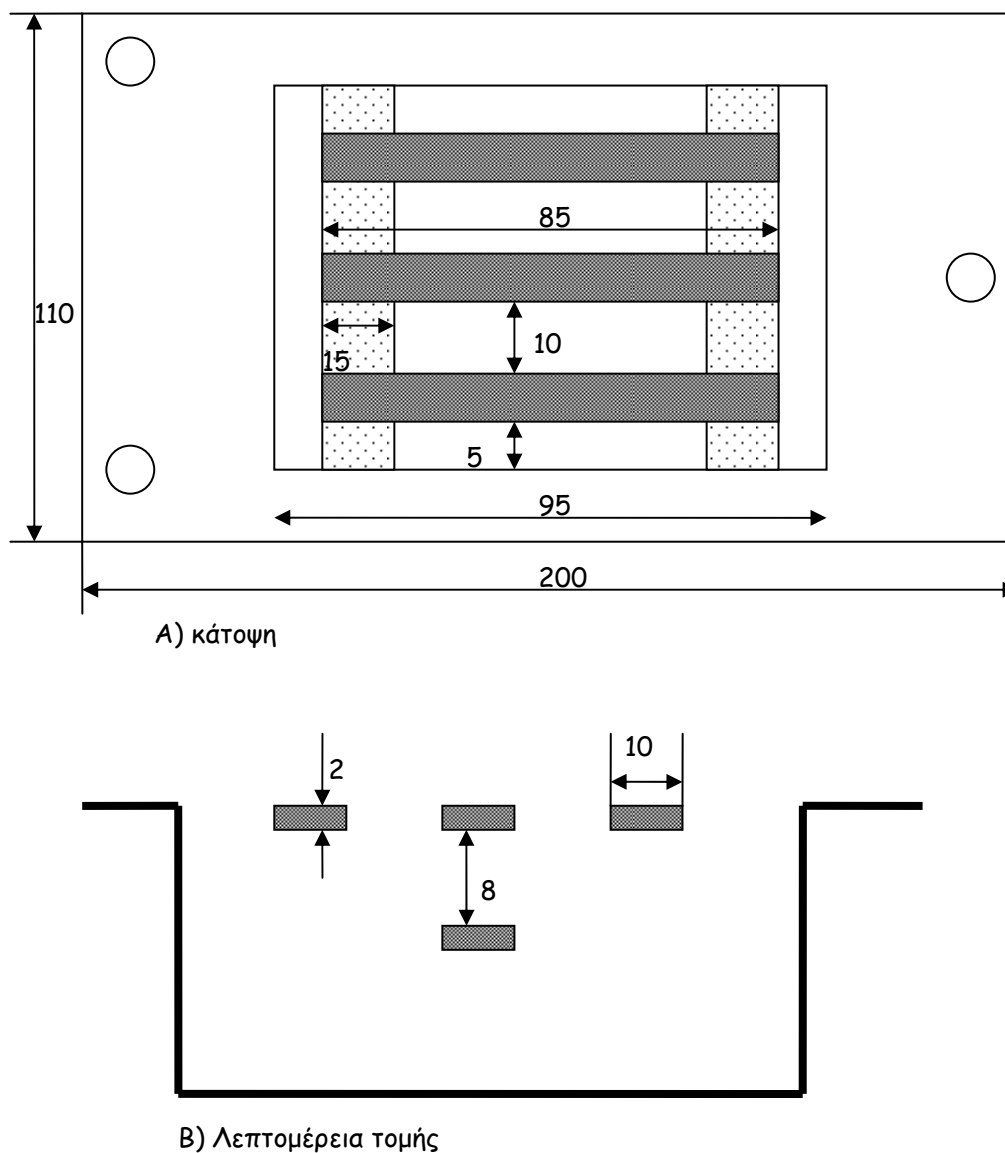
Το σύστημα εγκαταστάθηκε σε πραγματικές γραμμές παραγωγής. Συγκεκριμένα τοποθετήθηκε αρχικά σε γραμμή παράγωγής μπισκότων και κατόπιν σε γραμμή παραγωγής γυψοσανίδων. Στο Σχ. 20 φαίνεται ένα μπλόκ διάγραμμα του εγκατεστημένου συστήματος.



Σχ. 20 Η δομή του εγκατεστημένου συστήματος σε μπλόκ διάγραμμα.

Όπως βλέπουμε έχουμε ένα κεντρικό σταθμό ελέγχου και καταγραφής. Ο σταθμός αποτελείται από ένα βιομηχανικό ηλεκτρονικό υπολογιστή εφοδιασμένο με οθόνη. Ο σταθμός καταγράφει τα σήματα που συλλέγονται από το σύστημα δειγματοληψίας της εξόδου των μονάδων ηλεκτρονικών που βρίσκεται σε έναν κεντρικό πίνακα κοντά στις μονάδες ηλεκτρονικών. Η κάθε μονάδα ηλεκτρονικών περιλαμβάνει τα απαιτούμενα κυκλώματα οδήγησης και μέτρησης για τρεις αισθητήρες που συνδέονται με ομοαξονικά καλώδια και τοποθετούνται πάνω από το προϊόν στην γραμμή παραγωγής. Σε επόμενες φωτογραφίες απεικονίζεται το εγκατεστημένο σύστημα.

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στο Σχ. 22 . Ενα μηχανολογικό τους σκαρίφμα δίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχ. 21 Απλό μηχανολογικό σχέδιο των αισθητήρων.. Διαστάσεις σε mm.

Όπως βλέπουμε η δομή τους είναι ιδιαίτερα απλή αλλά ταυτόχρονα στιβαρή ώστε να μπορούν να αντέξουν σε βιομηχανική χρήση. Ο αισθητήρας αποτελείται από μία μεταλλική πλάκα με ένα μεγάλο άνοιγμα στο κέντρο από όπου προβάλλουν τα ηλεκτρόδια. Υπάρχουν τρία σημεία περιμετρικά για την στήριξη και ευθυγράμμιση του πάνω από την γραμμή παραγωγής.

Συνολικά αποτελείται από τέσσερα ηλεκτρόδια. Ένα κεντρικό που συνδέεται με το κύκλωμα ενισχυσης. Εκατέρωθεν αυτού υπάρχουν δύο ηλεκτρόδια οδήγησης κι ακριβώς πίσω από το κεντρικό και σε μεταβλητή απόσταση τοποθετείται το ηλεκτρόδιο αντιστάθμισης.

Οι αισθητήρες λόγω των σχετικά μικρών διαστάσεων μπορούσαν ευκολά να τοποθετητούν ανάμεσα από τα ράουλα μεταφοράς των γυψοσανίδων (Σχ. 23) κοντά στην έξοδο του φούρνου του ξηραντήριου. Αισθητήρες τοποθετήθηκαν επίσης και το τελικό σταδιο της γραμμής παραγωγής πριν την κοπή των γυψοσανίδων Σχ. 24 .

Κάθε μία από τις μονάδες ηλεκτρονικών περιελάμβανε την τροφοδοσία και τα κυκλώματα για τρεις αισθητήρες. Οι σύνδεση των μονάδων με τους αισθητήρες έγινε με ομοαξονικά καλώδια συνολικού μήκους το καθένα 6m Συνολικά τοποτετήθηκαν στην γραμμή παραγωγής τέσσερις παρόμοιες μονάδες δηλαδή δώδεκα αισθητήρες μέτρησης.

Τα σήματα εξόδου των μονάδων ηλεκτρονικών οδηγούνταν σε έναν κεντρικό πίνακα για δειγματοληψία Σχ. 27 . Από εκεί μέσω με σεριακής σύνδεσης RS-485 κατέληγαν στον κεντρικό σταθμό ελέγχου όπου ένας βιομηχανικός ηλεκτρονικός υπολογιστής τα κατέγραφε και τα επεξεργαζόταν.

Λογισμικό Καταγραφής

Στο Σχ. 29 φαίνεται η κύρια οθόνη του προγράμματος καταγραφής που αναπτύχθηκε. Το πρόγραμμα αυτό επέτρεπε την καταγραφή της τάσης εξόδου των αισθητήρων. Βάση πινάκων βαθμονόμησης για τον κάθε τύπο προϊόντος της γραμμής παραγωγής.η τάση εξόδου μετατρεπόταν σε ένδειξη «περιεχομένου ύδατος».

Πριν από την έναρξη κάθε παραγωγής επιλεγονταν ο τύπος του προϊόντος και εισάγονταν στοιχεία για την βάρδια. Στην απεικόνιση στην κύρια οθόνη του προγράμματος εμφανίζονταν τόσο η τρέχουσα τιμή αλλά και το ιστορικό της παραγωγής για μεταβλητά χρονικά διαστήματα.

Μετά το τέλος της παραγωγής ο χρήστης μπορούσε να εκτυπώσει την καταγραφή του συστήματος ή να αποθηκεύσει τις καταγεγραμμένες τιμές για περαιτέρω στατιστική επεξεργασία.

Βαθμονόμηση

Η βαθμονόμηση του συστήματος έγινε με την βοήθεια εγγρασθηρικών μετρήσεων για το περιεχόμενο ύδατος του προϊόντος. Οι μετρήσεις αυτές στηρίζονται στην μέτρηση της μεταβολής βάρους του προϊόντος πριν και μετά την πλήρη ξηρανσή του σε εργαστηριακούς φούρνους. Η ποσοστιαία μεταβολή του βάρους αποτελεί και το κατα

βάρος περιεχόμενο ύδατος του προϊόντος. Η διαδικασία αυτή παρόλο που είναι ακριβής δεν προσφέρεται για την παρακολούθηση της υγρασίας του προϊόντος σε πραγματικό χρόνο διότι είναι εξαιρετικά χρονοβόρα.

Συγκεκριμένα για κάθε διαφορετικό τύπο προϊόντος της γραμμής παραγωγής καταγράφηκαν οι τιμές εξόδου του συστήματος σε όλη την διάρκεια της συγκεκριμένης παραγωγής. Παράλληλα σε τακτά χρονικά διαστήματα λαμβάνονταν δείγματα το προϊόντος για τον ακριβή προσδιορισμό του περιεχόμενου ύδατος στο εργαστήριο. Μπορούμε να υποθέσουμε ότι λόγω των μικρών μεταβολών της υγρασίας καθόλη την διάρκεια της παραγωγής ισχύει η παρακάτω γραμμική σχέση μεταξύ του περιεχομένου ύδατος

$$WaterContent(\%) = a \cdot Vout + b \quad (56)$$

Από την αντιπαράθεση της εξόδου του συστήματος με τα αποτελέσματα των εργαστηριακών μετρήσεων με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων για ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων προέκυψαν οι σταθερές a, b της παραπάνω σχέσης.

Από την εμπειρία των ανθρώπων της παραγωγής το προφίλ της υγρασίας του προϊόντος ήταν περίπου γνωστό. Συγκεκριμένα κατά την έναρξη και την λήξη της εκάστοτε παραγωγής λόγω της μειωμένης συνολικής ποσότητας προϊόντος στον φούρνο του ξηραντηρίου αναμένονταν και αντίστοιχο προϊόν χαμηλού περιεχομένου ύδατος. Κατά την κυρίως φάση της παραγωγής το περιεχόμενο ύδατος παραμένει με σταθερές τις υπολοιπές συνθήκες σχεδόν σταθερό. Οι παραπάνω εμπειρικές παρατηρήσεις επιβεβαιώθηκαν άμεσα από την αβαθμονόμητη έξοδο του συστήματος. Επιπλέον υπήρχε άμεση αντίστοιχη ανταπόκριση της εξόδου του συστήματος σε εσκεμένες μικροδιορθώσεις της θερμοκρασίας του φούρνου ξήρανσης.



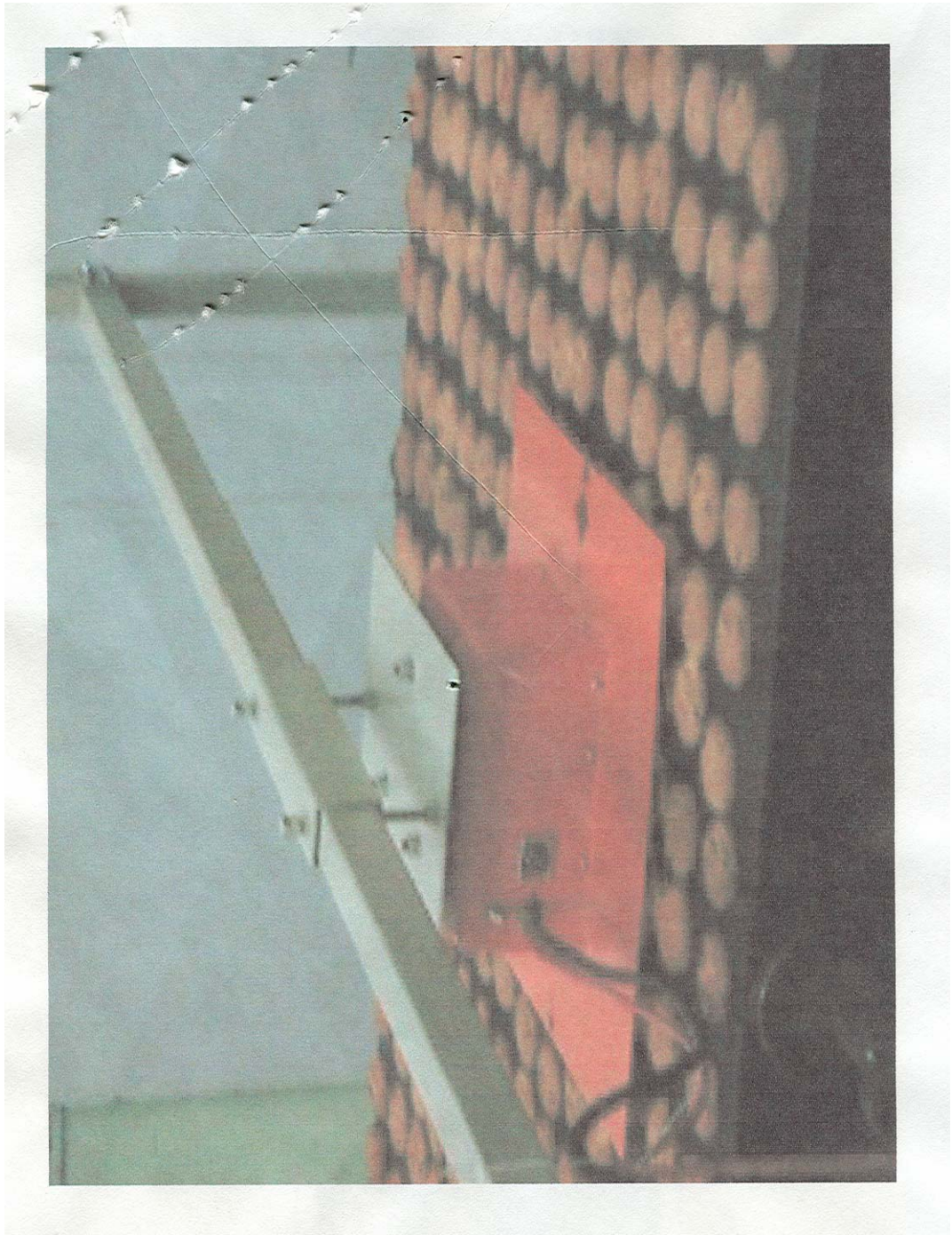
Σχ. 22 Οι αισθητήρες για τοποθέτηση στην γραμμή παραγωγής



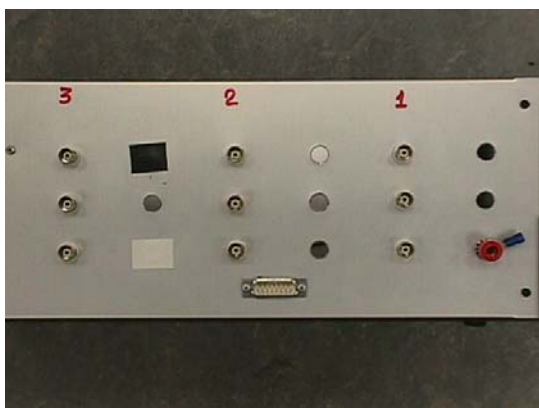
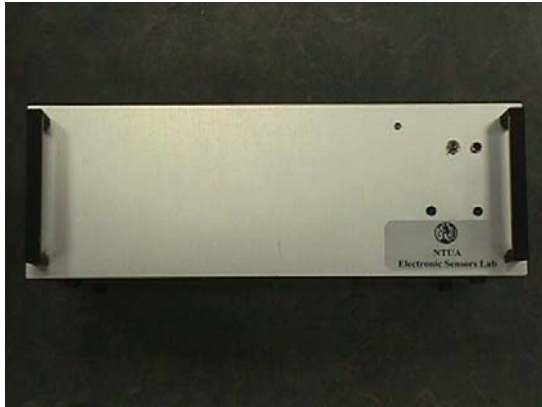
Σχ. 23 Τοποθέτηση των αισθητήρων ανάμεσα από ράουλα κοντά στην έξοδο του φούρνου αφύγρανσης



Σχ. 24 Τοποθέτηση των αισθητήρων πάνω από γυψοσανίδες



Σχ. 25 Τοποθέτηση του αισθητήρα πάνω από γραμμή παραγωγής μπισκότων



Σχ. 26 Φωτογραφίες της τοποθέτησης των πλακέτων με τα ηλεκτρονικά σε μονάδες μαζί με την τροφοδοσία τους.



Σχ. 27 Ο κύριος ηλεκτρικός πίνακας συγκέντρωσης των σημάτων των ασητηρών που περιέχει και τα συστήματα δειγματοληψίας (Data Logging)



Σχ. 28 Φωτογραφία του σταθμού ελέγχου και καταγραφής



Σχ. 29 Φωτογραφία από την κυρία οθόνη του προγράμματος καταγραφής.

III.3.4 Πειραματικά αποτελέσματα

Για την μελέτη του συστήματος κατασκευάσαμε διάφορους τύπους αισθητήρων. Ως διηλεκτρικά υλικά χρησιμοποιήσαμε πλάκες γυαλιού και πλεξιγκλάς. Η σχετική διηλεκτρική σταθερά τους υπολογίστηκε επακριβώς με την βοήθεια της πειραματικής διάταξης που περιγράφεται στο παράρτημα Β.

Παρόλο που ο αισθητήρας έχει ως στόχο την μέτρηση του περιεχομένου ύδατος είναι πολύ δύσκολη η αξιόπιστη προετοιμασία δειγμάτων υλικών με μεταβλητό και ομοιόμορφο περιεχόμενο ύδατος. Επιπλέον η παρουσία ύδατος συνδέεται και με φαινόμενα αγωγιμότητας στον όγκο του υλικού άρα και απώλειες που μοντελοποιούνται όπως έχουμε πει ήδη με προσθήκη μίας αντίστασης παράλληλα προς την μετρούμενη χωρητικότητα όπως φαίνεται και στο Σχ. 16 . Έτσι επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε μόνο γνωστά σταθερά και σχεδόν τέλεια διηλεκτρικά για την αξιόπιστη συλλογή πειραματικών δεδομένων.

Αρχικά χρησιμοποιήσαμε στο εργαστήριο έναν αισθητήρα της δομής του Σχ. 13 με τα επόμενα χαρακτηριστικά. Ο αισθητήρας αποτελείτο από όμοια ηλεκτρόδια με μήκος 27cm πλάτος 1cm και πάχος 0,5cm. Διέθετε τρία ηλεκτρόδια εισόδου, εκατέρωθεν των οποίων και σε απόσταση 1cm τοποθετήθηκαν ηλεκτρόδια οδήγησης. Έτσι ο συνολικός αριθμός των ομοεπίπεδων ηλεκτροδίων ήταν εννέα. Τα ηλεκτρόδια περιβάλλοντο από μεταλλικό κέλυφος σε απόσταση 10cm πίσω από αυτά. Ακριβώς πίσω από τα τρία ηλεκτρόδια εισόδου βρίσκονταν αντίστοιχα ηλεκτρόδια αντιστάθμισης.

Ο αισθητήρας τοποθετήθηκε πάνω από επίπεδο γείωσης. Πάνω από τον αισθητήρα τοποθετήθηκαν κατα σειρά οι διαθέσιμες διηλεκτρικές πλάκες που περιγράφονται στον επόμενο πίνακα. Η πειραματική διάταξη επέτρεπε την κατακόρυφη μετακίνηση των υλικών σε μεταβλητή απόσταση από τον αισθητήρα.

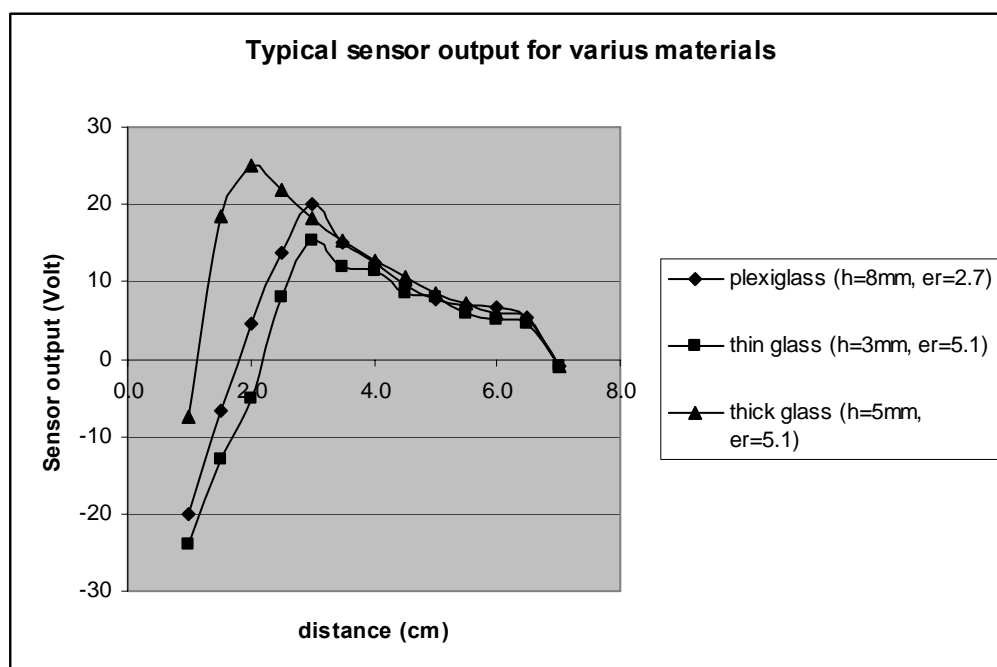
Πίνακας 3. Ιδιότητες διηλεκτρικών υλικών που χρησιμοποιήσαμε

Τύπος Υλικού	Σχ. Διηλεκτρική Σταθερά	Πάχος
Λεπτό φύλλο γυαλί	5.1	3mm
Παχύ φύλλο γυαλί	5.1	5mm
Φύλλο Πλεξιγκλας	2.7	8mm

Η έξοδος του συστήματος μετρήθηκε ως η τάση εξόδου $V_{peak-peak}$ στην τελευταία βαθμίδα ενίσχυσης. Με τον τρόπο αυτό δεν επεισέρχονταν στην μέτρηση τα πιθανά σφάλματα φάσης που επηρεάζουν την τελική έξοδο μετά τον αποδιαμορφωτή.

Επειδή υπήρχε πάντα μια αναστοφή φάσης καθώς το διηλεκτρικό απομακρύνονταν από τον αισθητήρα αυτό δηλώνεται στα διαγράμματα που ακολουθούν με αρνητικές τιμές. Το σύστημα ρυθμιζόταν πάντα αρχικά για μηδενική έξοδο απουσία διηλεκτρικού υλικού. Έτσι θετικές τιμές της εξόδου ισοδυναμούν με τιμές της αμοιβαίας χωρητικότητας μεταξύ των ηλεκτροδίων μικρότερες αυτής για αέρα (δηλαδή απουσία διηλεκτρικού) ενώ αρνητικές τιμές ισοδυναμούν με αμοιβαία χωρητικότητα μεγαλύτερη αυτή για αέρα.

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η έξοδος του συστήματος για τα διάφορα διηλεκτρικά υλικά συναρτήσει της απόστασης από τον αισθητήρα και πάντα παρουσία επιπέδου γείωσης σε απόσταση 10 cm

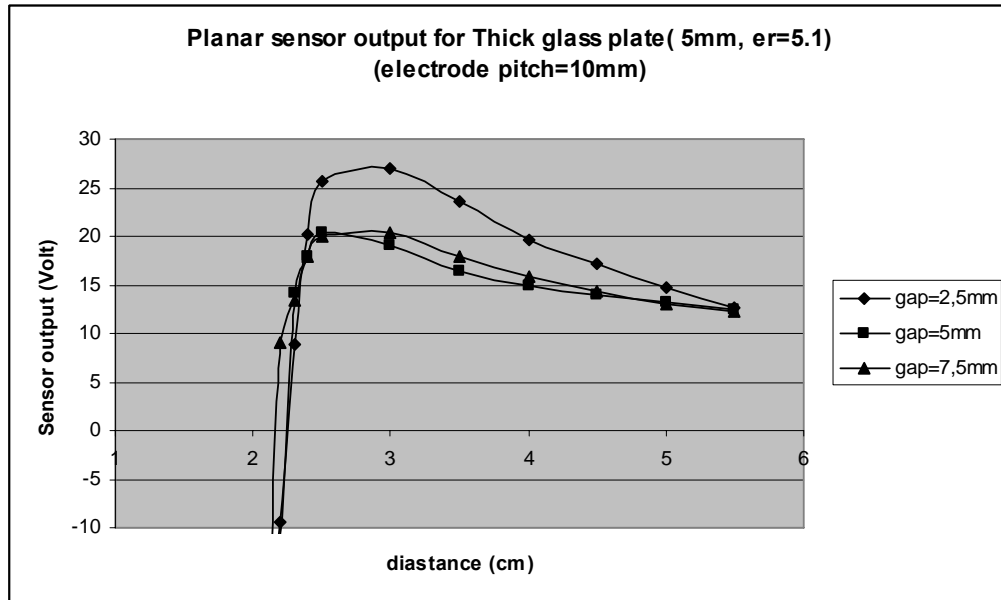


Σχ. 30 Τυπική έξοδος του συστήματος για διάφορα διηλεκτρικά υλικά συναρτήσει της απόστασης από τον αισθητήρα χωρίς παρουσία επιπέδου.

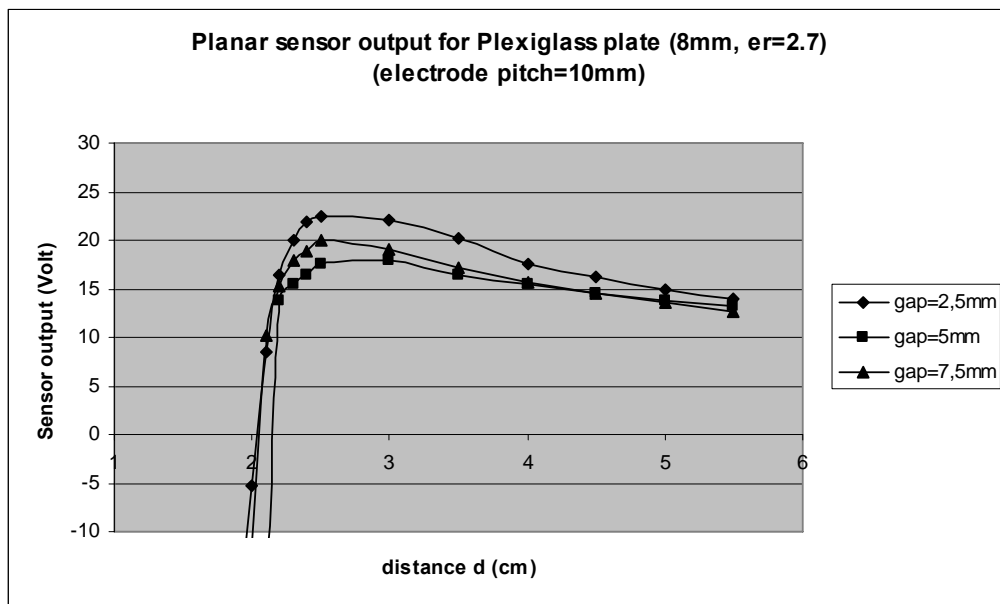
Μετά από θεωρητική μελέτη και προσομοιώσεις με πεπερασμένα στοιχεία κατασκευάσαμε και μια επιπλέον ομάδα αισθητήρων. Στόχος ήταν η πειραματική μελέτη της συμπεριφοράς του αισθητήρα για σταθερό βήμα ηλεκτροδίων και μεταβλητό διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων.

Για ευκολία οι αισθητήρες αυτοί κατασκευάστηκαν πάνω σε πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος PCB τύπου FR-4 με φωτολιθογραφία. Οι διαστάσεις της πλακέτας ήταν 16cm x 22cm. Ο συνολικός αριθμός των ηλεκτροδίων ήταν 21 με σταθερό βήμα μεταξύ τους 1cm. Το διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων s ήταν μεταβλητό και ίσο με 2.5mm, 5.0mm και 7.5mm αντίστοιχα. Επίπεδα γείωσης τοποθετήθηκαν σε

απόσταση 3cm πίσω από τα ηλεκτρόδια και 25cm μπροστά από αυτά. Η έξοδος του συστήματος μηδενίστηκε ξανά απουσία διηλεκτρικής πλάκας. Τα πειραματικά αποτελέσματα για λεπτή και παχιά πλάκα γυαλιού συναρτήση της θέσης της πάνω από τον αισθητήρα φαίνονται στα δύο επόμενα σχήματα.



Σχ. 31 Η έξοδος του συστήματος για παχύ γυαλί συναρτήσε της απόστασης από τον αισθητήρα παρουσία επιπέδου γείωσης σε απόσταση 10 cm και για διαφορετικές γεωμετρίες ηλεκτροδίων

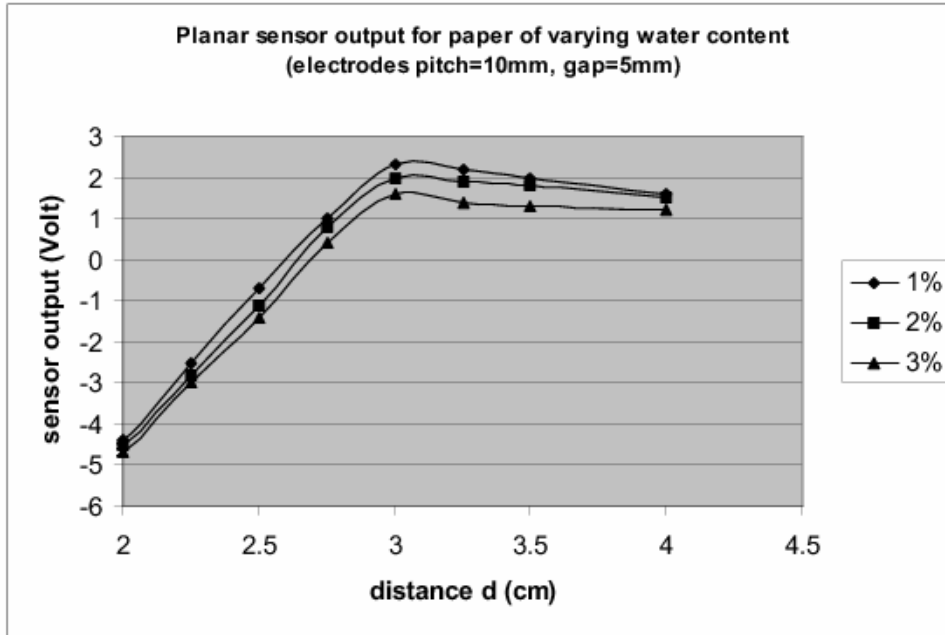


Σχ. 32 Η έξοδος του συστήματος για λεπτό γυαλί συναρτήσει της απόστασης από τον αισθητήρα παρουσία επιπέδου γείωσης σε απόσταση 10 cm και για διάφορες γεωμετρικές ηλεκτροδίων

Όπως φαίνεται καθαρά από τα πειραματικά δεδομένα και επιβεβαιώθηκε τόσο με προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων αλλά και με αναλυτικό τρόπο η μεταβολή της αμοιβαίας χωρητικότητας που μετράται μεταξύ των ηλεκτροδίων του αισθητήρα ως προς την χωρητικότητα απουσία διηλεκτρικού πάνω από τα ηλεκτρόδια λαμβάνει θετικές αλλά και αρνητικές τιμές. Συγκεκριμένα όταν η διηλεκτρική πλάκα βρίσκεται πού κοντά στον αισθητήρα η αμοιβαία χωρητικότητα αυξάνει ταχύτατα. Καθώς απομακρύνουμε την διηλεκτρική πλάκα από τα ηλεκτρόδια σε μία κρίσιμη απόσταση γίνεται ίση με αυτή του αέρα και κατόπιν σχετικά ομαλά γίνεται μικρότερη αυτής για αέρα. Για πολύ μεγάλες αποστάσεις από τον αισθητήρα όπως αναμενόταν η μετρούμενη αμοιβαία χωρητικότητα πλησιάζει ασυμπτωτικά αυτή του αέρα.

Η ιδιαίτερη αυτή συμπεριφορά της μετρούμενης χωρητικότητας έχει παρατηρηθεί και από άλλους ερευνητές[37], μελετήθηκε εκτενώς αναλυτικά και με προσομοιώσεις και είναι καθοριστική για την σχεδίαση και τοποθέτηση του αισθητήρα στην γραμμή παραγωγής.

Επιπλέον διερευνήσαμε την συμπεριφορά του συστήματος ως προς το «περιεχόμενο ύδατος». Το υλικό ήταν ένα sandwich από 12 φύλλα χαρτί A4. Ένα ελεγχόμενο ποσό ύδατος ψεκαζόταν ανάμεσα στα φύλλα και περιμέναμε να διαχυθεί. Το περιεχόμενο ύδατος προέκυπτε από την μεταβολή του βάρους των φύλλων. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η έξοδος του συστήματος όταν χρησιμοποιήσαμε τον επίπεδο αισθητήρα με διάκενο ηλεκτροδίων 5mm.



Σχ. 33 Εξοδος του συστήματος για φύλλα χαρτί συναρτήση της θέσης και παράμετρο το «περιεχόμενο ύδατος» κατά βάρος

III.4 Θεωρητική μελέτη

III.4.1 Ημι-Εμπειρικές σχέσεις

Βάση ημι-εμπειρικών σχέσεων[38],[39] έχουμε την παρακάτω σχέση για την αμοιβαία χωρητικότητα C_m ανά μονάδα μήκους μεταξύ δύο απείρου μήκους αγωγών πάνω σε πλάκα διηλεκτρικού (Σχ. 34).

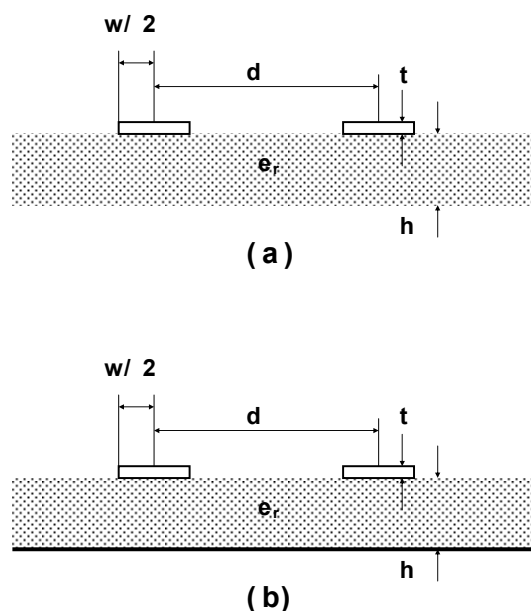
$$\frac{C_m}{l} = \frac{\pi \cdot \epsilon_{r(eff)} \cdot \epsilon_o}{\ln\left(\frac{\pi \cdot (d - w)}{w + t} + 1\right)} \quad (F / m) \quad (57)$$

όπου η παράμετρος $\epsilon_{r(eff)}$ δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\epsilon_{r(eff)} \approx 1 \quad \text{if} \quad d/h \gg 1 \quad \text{ή} \quad \epsilon_{r(eff)} \approx \frac{(1 + \epsilon_r)}{2} \quad \text{if} \quad d/h \approx 1 \quad (58)$$

Από την Εξ. 57 παρατηρούμε ότι η αμοιβαία χωρητικότητα εξαρτάται από τον λογάριθμο της απόστασης μεταξύ των δύο αγωγών. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι και

άν ακόμη μετακινούσαμε τους δύο αγωγούς πλησιέστερα για αύξηση της μεταξύ τους χωρητικότητας αυτό δεν θα επέφερε δραματική αλλαγή την επίδοση του αισθητήρα.



Σχ. 34 Γεωμετρίες για τον υπολογισμό της χωρητικότητας βάση ημι-εμπειρικών σχέσεων.

Ενας πολύ σημαντικός παράγοντας την σχεδίαση αισθητήρων χωρητικότητας είναι και η επίδραση γειτονικών μεταλικών αντικειμένων. Σύμφωνα με την αναφορά [38] μία ημιεμπειρική σχέση για την διάταξη ηλεκτροδίων στο σχήμα είναι:

$$\frac{C_m}{l} = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_o}{\pi} \cdot K_{L1} \cdot K_{C1} \left(\frac{w}{d} \right)^2 \quad \text{for} \quad \frac{2 \cdot h}{d} < 3 \quad (59)$$

Γενικά τοποθετώντας μία μεταλλική πλάκα κάτω από το διηλεκτρικό υλικό η αμοιβαία χωρητικότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων που απαρτίζουν τον αισθητήρα μειώνεται δραστικά. Από την παραπάνω εξίσωση φαίνεται ότι η αμοιβαία χωρητικότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης μεταξύ των αγωγών. Επομένως παρουσία μεταλλικής πλάκας γείωσης μείωση της απόστασης μεταξύ των αγωγών βελτιώνει δραστικά τις επιδόσεις του αισθητήρα. Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι η παρουσία επιπέδου γείωσης σε πολλές εφαρμογές είναι δεδεδεμένη για παράδειγμα όταν μια μεταλλική μεταφορική ταινία μεταφέρει το προϊόν που θέλουμε να μετρήσουμε.

Ωστόσο η παρουσία επιπέδου γείωσης σύμφωνα με αυτά που έχουμε αναφέρει στον παράγραφο για τα ηλεκτρόδια προστάσις παρά την δραστική μείωση της

ευαισθησίας του αισθητήρα παρουσιάζει και κάποια πλεονεκτήματα. Συγκεκριμένα τείνει να κάνει το ηλεκτροστατικό πεδίο περισσότερο συγκεντρωμένο μειώνοντας την επίδραση στο πεδίο του αισθητήρα γειτονικών αντικειμένων. Επιπλέον εφόσον αυτό είναι επαρκώς γειωμένο εμποδίζει την ληψη ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών από τον αισθητήρα χαλαρώνοντας τις απαιτήσεις για φιλτράρισμα θορύβου και παρεμβολών στην μονάδα ηλεκτρονικών.

Στο Σχ. 34 οι αγωγοί έρχονται σε επαφή με το διηλεκτρικό ενώ στην πράξη είναι υποχρεωτικό να υπάρχει ένα μικρό διάκενο μεταξύ αυτού και των ηλεκτροδίων του αισθητήρα. Διάκενο μπορεί να υπάρχει ακόμη και μεταξύ διηλεκτρικού και τις πλάκας γείωσης όταν για παράδειγμα το μετρούμενο προϊόν μεταφέρεται πάνω σε ράουλα.

III.4.2 Αναλυτικές μέθοδοι

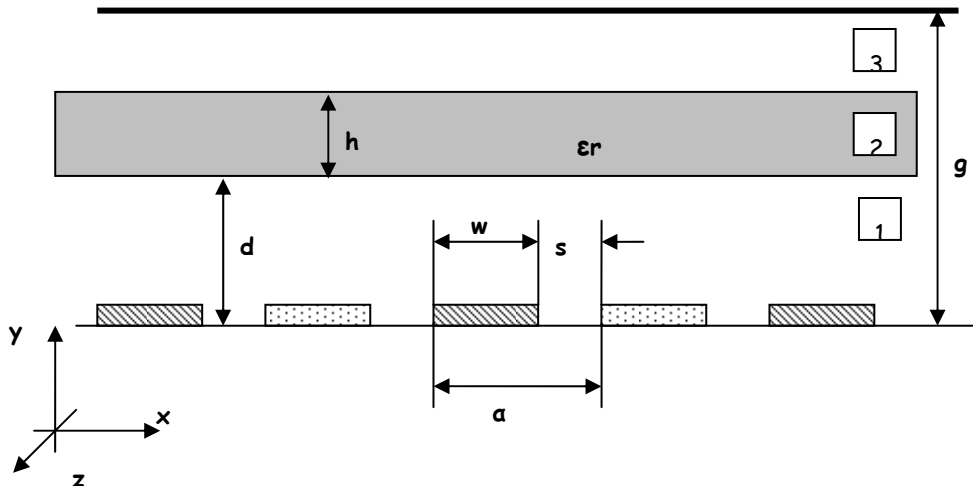
Ο αισθητήρας αποτελείται από περισσότερα του ενός επάλληλα ηλεκτρόδια οδήγησης και μέτρησης ώστε τελικά η διάταξη να μοιάζει με πυκνωτή επάλληλων ηλεκτροδίων. Αρκετοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με τον υπολογισμό της χωρητικότητας μεταξύ επάλληλων ηλεκτροδίων. Το αντίστοιχο ηλεκτροστατικό πρόβλημα λύθηκε πρώτα από τον Engan [45][46]. Αν και η λύση που έδωσε για το δυναμικό και την χωρητικότητα είναι ακριβής τα αποτελέσματα εκφράζονται ως λόγοι ελλειπτικών ολοκληρωμάτων και απαιτούν πολύπλοκες αριθμητικές μεθόδους. Στις προτεινόμενες μεθόδους περιλαμβάνονται χρήση σύμμορφης απεικόνισης [47] αλλά και άλλες μέθοδοι [48].

Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι η πλειοψηφία των λύσεων προϋποθέτει ότι το διηλεκτρικό υλικό καλύπτει ολόκληρο τον χώρο που βρίσκεται ο αισθητήρας. Στην συγκεκριμένη περίπτωση το διηλεκτρικό πρέπει να περιγραφεί ως μία διηλεκτρική πλάκα συγκεκριμένου πάχους σε δεδομένη απόσταση από το επίπεδο των ηλεκτροδίων. Επίσης πιθανόν να πρέπει να προστεθεί στο μοντέλο όπως έχουμε ήδη πει και ένα επίπεδο γείωσης σε μεγαλύτερη απόσταση.

III.4.3 Προσέγγιση με την χρήση της Μεθόδου Χωριζομένων μεταβλητών

Ας θεωρήσουμε την διάταξη που φαίνεται επόμενο σχήμα και παριστά μία τομή του αισθητήρα. Όπως βλέπουμε μία πλάκα διηλεκτρικού υλικού πάχους h και διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_r βρίσκεται σε απόσταση d από τα ηλεκτρόδια του αισθητήρα. Τα ηλεκτρόδια εναλλάσσονται και έχουν ομοιόμορφο πλάτος w . ενώ η μεταξύ τους απόσταση είναι s . Η διάταξη ηλεκτροδίων επαναλαμβάνεται κατάμήκος

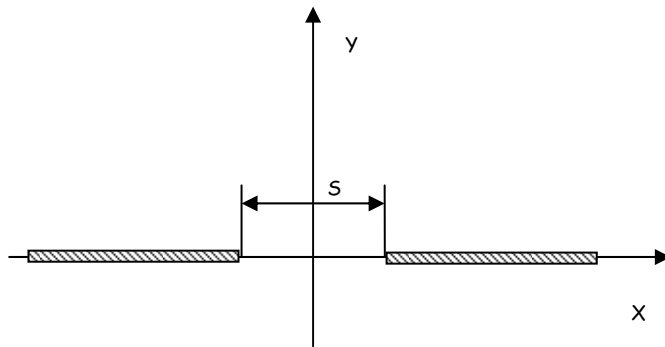
του άξονα X με βήμα $a = w + s$ ενώ το πάχος τους θεωρείται αμελητέο σε σχέση με τις υπόλοιπες διαστάσεις του συστήματος. Επίσης προαιρετικά σε απόσταση g από την κεφαλή μπορεί να υπάρχει επίπεδο γείωσης. Για να ισχύει η διδιαστατη ανάλυση υποθέτουμε ότι όλη η διάταξη εκτείνεται στο άπειρο καταμήκος του άξονα Z .



Σχ. 35 Διάταξη για την μοντελοποίηση του αισθητήρα με αναλυτικές εξισώσεις.

Ημι-απέραντες λεπτές φορτισμένες πλάκες

Πριν να μελετήσουμε θεωρητικά των αισθητήρα με επάλληλα ηλεκτρόδια θα εξετάσουμε την περίπτωση δύο ημιαπέραντων πολύ λεπτών φορτισμένων πλακών στο επίπεδο $y = 0$ και περιγράφονται από την σχέση $x < -s/2$ και $x > s/2$ αντίστοιχα, Σχ. 36 . Εάν αγνοήσουμε προς το παρόν την ύπαρξη της διηλεκτρικής πλάκας, επιπέδου γείωσης και υποθέσουμε ότι βρισκόμαστε πολύ κοντά στο διάκενο μεταξύ των πλακών τότε η διάταξη των επάλληλων ηλεκτροδίων μοιάζει πολύ με την εν λόγω διάταξη και αναμένεται τοπικά το πεδίο στην περιοχή του διάκενου μεταξύ των πλακών να έχει περίπου παρόμοια δομή.



Σχ. 36 Γεωμετρία για το πρόβλημα των δύο ημι-απέραντων λεπτών φορτισμένων πλακών στο επίπεδο $Y=0$.

Το πρόβλημα των ημι-απέραντων λεπτών αντίθετα φορτισμένων πλακών λύνεται αναλυτικά και η σχέση για το ηλεκτρικό δυναμικό είναι [10]

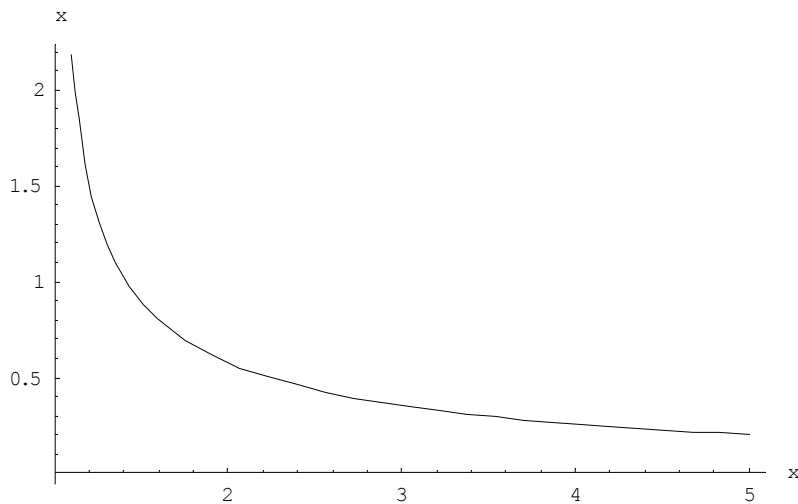
$$V_{plates}(x, y) = \frac{2V_o}{\pi} \operatorname{Re} \left[\arcsin \left(2 \frac{x + iy}{s} \right) \right] \quad (60)$$

για δυναμικό των δύο πλακών $\pm V_o$ αντίστοιχα. Το δυναμικό αυτό αποτελεί μια εξαιρετικά καλή προσέγγιση όπως θα δείξουμε για το δυναμικό μεταξύ γειτονικών ηλεκτροδίων του αισθητήρα. Η προσέγγιση αυτή βελτιώνεται ιδιαίτερα όταν το πλάτος του διακένου είναι πολύ μικρότερο του πλάτους των ηλεκτροδίων δηλαδή όταν $w \gg s$.

Η παραπάνω παρατήρηση αποτελεί την βάση για την δημιουργία προσεγγιστικών σχέσεων υπολογισμού της χωρητικότητας του πυκνωτή επάλληλων ηλεκτροδίων [48] καθώς και του μοντέλου αισθητήρα στο Σχ. 35. Για δικαιολογήσουμε περισσότερο την επιλογή αυτή πρέπει να μελητήσουμε την κατανομή της επιφανειακής πυκνότητας ηλεκτρικού φορτίου πάνω στις δύο πλάκες. Αυτή ως γνωστό δίνεται βάση του νόμου Gauss από τις παρακάτω σχέσεις για την θετική πλάκα

$$\begin{aligned} \sigma_p(x) &= -2\varepsilon \lim_{y \rightarrow 0} \left(\frac{\partial V_{plates}(x, y)}{\partial y} \right) \\ &= -2\varepsilon \left(\frac{2V_o}{\pi} \right) \left(\frac{1}{\sqrt{(2x/s)^2 - 1}} \right) \left(\frac{2}{s} \right) \end{aligned} \quad (61)$$

Παρατηρούμε ότι εμφανίζεται και ένας παράγοντας 2 στην σχέση αυτή λόγω της άνω και κάτω πλευράς της πλάκας. Το φορτίο στην αρνητική πλάκα είναι το αρνητικό αυτού που μόλις υπολογίσαμε για την θετική πλάκα. Μία τυπική γραφική παράσταση της επιφανειακής πυκνότητας φορτίου φαίνεται στο επόμενο σχήμα



Σχ. 37 Γραφική παράσταση της πυκνότητας φορτίου $\sigma(x)$ συναρτήση της αποστάσεως x για $s=2$ και αυθαίρετη τάση πλακών.

Απο την γραφική παράσταση είναι εμφανές ότι η επιφανειακή πυκνότητα φορτίου είναι πολύ μεγάλη κοντά στην ακμή της πλάκας και γρήγορα πλησιάζει στο μηδέν όσο απομακρυνόμαστε από την περιοχή του διακένου. Ανάλογη αναμένεται να είναι και η κατανομή επιφανειακής πυκνότητας φορτίου κοντά στις περιοχές διακένων και πάντα πάνω στα ηλεκτρόδια του αισθητήρα.

Εάν ήταν γνωστή η κατανομή του φορτίου πάνω στις πλάκες η αρχή της υπερθεσης θα έδινε το δυναμικό σε όλο τον χώρο. Στην πιο γενική μορφή θα είχαμε

$$V(\vec{p}) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\rho(\vec{r}')}{4\pi\epsilon |\vec{p} - \vec{r}'|} d^3r' \quad (62)$$

που για το συγκεκριμένο πρόβλημα γίνεται

$$V(x, y, z) = \int_{x=-\infty}^{x=s/2} \int_{z=-\infty}^{z=\infty} \left(\frac{\sigma_n(x')}{4\pi\epsilon} \right) \frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + y^2 + (z-z')^2}} dxdz + \int_{x=s/2}^{x=\infty} \int_{z=-\infty}^{z=\infty} \left(\frac{\sigma_p(x')}{4\pi\epsilon} \right) \frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + y^2 + (z-z')^2}} dxdz \quad (63)$$

καθώς η ολοκλήρωση περιορίζεται μόνο στην επιφάνεια των πλακών όπου έχουμε μη μηδενικά ελεύθερα φορτία.

Η προσέγγιση που προτείνεται είναι να ελαττωθούν τα όρια της παραπάνω ολοκλήρωσης ως προς x από $-\infty$ σε $a/2$ και από ∞ σε $a/2$ για τον υπολογισμό του δυναμικού των πλακών [48]. Το σφάλμα στον υπολογισμό του δυναμικού σε αυτή

την περίπτωση είναι η συνδρομή των πιο απομακρυσμένων από το διάκενο, φορτίων. Δηλαδή αγνοούνται τα φορτία σε απόσταση $|x| > a/2$. Καθώς απομακρυνόμαστε από τα εν λόγω φορτία αυτά η υπόθεση της προσέγγισης ικανοποιείται καλύτερα. Για παράδειγμα όταν $|x| \ll a/2$ δηλαδή κοντά στο κέντρο του διακένου των πλακών.

Στόχος όλων των παραπάνω ήταν να τεκμηριώσουμε μία προσέγγιση του δυναμικού στην περιοχή του διακένου μεταξύ των ηλεκτροδίων του interdigitated πυκνωτή για $y = 0$. Γνώση του δυναμικού πάνω στο επίπεδο $y = 0$ με βάση το ολοκλήρωμα Poisson ισοδυναμεί με γνώση του δυναμικού σε όλο τον χώρο πάνω και κάτω από το επίπεδο αυτό. Οι προϋποθέσεις για τη ισχύ της προτεινόμενης προσέγγισης ικανοποιούνται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο στο κέντρο του διακένου και για $y = 0$.

Θεωρούμε λοιπόν ότι στο επίπεδο $y = 0$ το δυναμικό δύο ημιαπέραντων πλακών που είναι γνωστό και δίνεται από την Εξ. 60 προσεγγίζει και το δυναμικό μεταξύ γειτονικών επάλληλων ηλεκτροδίων.

Υπολογισμός του δυναμικού για interdigitated πυκνωτή

Χάρη στην προσέγγιση πάνω σε όλο το επίπεδο $y=0$ είναι γνωστό το δυναμικό και περιγράφεται από τις σχέσεις

$$V(x,0) = \frac{2V_o}{\pi} \arcsin\left(\frac{2x}{s}\right) \text{ για } |x| < s/2 \text{ και} \quad (64)$$

$$V(x,0) = \pm V_o \text{ για } s/2 \leq |x| < a \quad (65)$$

ενώ επαναλαμβάνεται περιοδικά σε όλο το επίπεδο με περίοδο $2a$.

Πρέπει τώρα να υπολογίσουμε από την γνωστή κατανομή του δυναμικού στο επίπεδο $y = 0$ και την κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού σε όλο τον χώρο άνω των ηλεκτροδίων με ή χωρίς την παρουσία διηλεκτρικού και επιπέδου γης. Πρόκειται βασικά δηλαδή για πρόβλημα ηλεκτροστατικής τύπου Dirichlet όπου το δυναμικό εκτός της ικανοποίησης των γνωτών τιμών του πάνω στο επίπεδο $y = 0$ και το άπειρο ή το επίπεδο γης πρέπει να ικανοποιεί και τις συνοριακές συνθήκες μετάβασης του ηλεκτροστατικού πεδίου πάνω στις επιφάνειες της διηλεκτρικής πλάκας.

Η λύση του προβλήματος θα μελετηθεί για τις δύο περιπτώσεις, με ή χωρίς την παρουσία γης. Η ειδική περίπτωση όπου δεν υπάρχει διηλεκτρική πλάκα περιέχεται σε αυτές κάνοντας την σχετική διηλεκτρική σταθερά της πλάκας μονάδα.

Περιγραφή προβλήματος, συνοριακών συνθηκών

Το ηλεκτρικό δυναμικό στην περιοχή άνω των ηλεκτροδίων του αισθητήρα πρέπει να ικανοποιεί τις σχέσεις μετάβασης του ηλεκτρικού πεδίου πάνω στις δύο επιφάνειες του διηλεκτρικού. Αν το δυναμικό περιγράφεται από τις συναρτήσεις $V_1(x, y), V_2(x, y)$ και $V_3(x, y)$ αντίστοιχα στις τρεις περιοχές του μοντέλου στο Σχ. 35 οι συνθήκες αυτές γράφονται

$$\begin{aligned} V_1(x, d) &= V_2(x, d) \\ \left. \frac{\partial V_1(x, y)}{\partial y} \right|_{y=d} &= \varepsilon_r \left. \frac{\partial V_2(x, y)}{\partial y} \right|_{y=d} \end{aligned} \quad (66)$$

$$\begin{aligned} V_2(x, d+h) &= V_3(x, d+h) \\ \varepsilon_r \left. \frac{\partial V_2(x, y)}{\partial y} \right|_{y=d+h} &= \left. \frac{\partial V_3(x, y)}{\partial y} \right|_{y=d+h} \end{aligned} \quad (67)$$

για την κάτω και αντίστοιχα την άνω επιφάνεια του διηλεκτρικού.

Στην περίπτωση τώρα που υπάρχει επίπεδο γείωσης στην θέση $y = g$ πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη

$$V_3(x, g) = 0 \quad (68)$$

ενώ χωρίς την παρουσία γης πρέπει το δυναμικό να τείνει στο μηδέν στο άπειρο δηλαδή ισχύει

$$V_3(x, y) \underset{y \rightarrow \infty}{=} 0 \quad (69)$$

Τέλος πρέπει το δυναμικό για $y = 0$ να ταυτίζεται με την προσέγγιση που υποθέσαμε.

Σε όλο τον υπολοιπο χώρο πρέπει να ικανοποιείται η εξίσωση Laplace δηλαδή πρέπει

$$\frac{\partial^2 V_t(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_t(x, y)}{\partial y^2} = 0 \quad (70)$$

όπου t η αντίστοιχη περιοχή

Ανάπτυξη σε σειρά Fourier

Λόγω της περιοδικότητας ως προς τον άξονα X το δυναμικό στις τρεις περιοχές μπορεί να περιγραφεί από σειρές Fourier της παρακάτω γενικής μορφής

$$V_t(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} T_n \sin\left(\frac{(2n-1)\pi x}{a}\right) \left(At_n \exp\left(\frac{(2n-1)\pi y}{a}\right) + Bt_n \exp\left(-\frac{(2n-1)\pi y}{a}\right) \right) \quad (71)$$

για $y \geq 0$, και όπου t η αντίστοιχη περιοχή.

Κάθε ένας απο τους όρους της παραπάνω σειράς ικανοποιεί αυτόματα την εξίσωση Laplace και ταυτόχρονα περιλαμβάνει την περιττή περιοδική συμπεριφορά της συνάρτησης δυναμικού κατα μήκος του άξονα X .

Στις παραπάνω σειρές οι όροι At_n και Bt_n , καθορίζονται από την ικανοποίηση των συνοριακών συνθηκών κατα μήκος του άξονα y δηλαδή πάνω στις δύο επιφάνειες της διηλεκτρικής πλάκας και την ύπαρξη ή όχι επιπέδου γείωσης.

Για τον προσδιορισμό των συντελεστών T_n βλέπουμε ότι για $y=0$ η σειρά εκφυλίζεται στην

$$V_1(x, 0) = \sum_{n=1}^{\infty} T_n \sin\left(\frac{(2n-1)\pi x}{a}\right) \quad (72)$$

Αρα οι συντελεστές T_n προκύπτουν από την ικανοποίηση της γνωστής πλέονκατανομής του δυναμικού στο επίπεδο $y=0$.

Προσδιορισμός των συντελεστών

Με αντικατάσταση της γενικής σειράς κάθε περιοχής στις αντίστοιχες συνοριακές συνθήκες προσδιορίζονται τα At_n και Bt_n , και δίνονται μετά απο υπολογισμό από τις παρακάτω σχέσεις ανάλογα με την ύπαρξη ή όχι επιπέδου γείωσης:

$$p_n = \frac{(2n-1)\pi}{a} \quad (73)$$

Α) Χωρίς επίπεδο γείωσης

$$DA(p, \varepsilon_r, d, h) = -e^{4pd} (-1 + \varepsilon_r)^2 + e^{2p(d+d+h)} (1 + \varepsilon_r)^2 + e^{2pd} (-1 + \varepsilon_r^2) - e^{2p(d+h)} (-1 + \varepsilon_r^2) \quad (74)$$

Περιοχή 1

$$A1_n = \frac{(-1 + \varepsilon_r^2)(e^{2p_n d} - e^{2p_n(d+h)})}{DA(p_n, \varepsilon_r, d, h)} \quad (75)$$

$$B1_n = 1 - A1_n \quad (76)$$

Περιοχή 2

$$A2_n = \frac{2(-1 + \varepsilon_r)e^{2p_n d}}{DA(p_n, \varepsilon_r, d, h)} \quad (77)$$

$$B2_n = \frac{2(1 + \varepsilon_r)e^{2p_n(d+d+h)}}{DA(p_n, \varepsilon_r, d, h)} \quad (78)$$

Περιοχή 3

$$A3_n = 0 \quad (79)$$

$$B3_n = \frac{4\varepsilon_r e^{2p_n(d+d+h)}}{DA(p_n, \varepsilon_r, d, h)} \quad (80)$$

Β) Με επίπεδο γείωσης

$$\begin{aligned} DG(p, \varepsilon_r, d, h, g) = & e^{2p(2d+g)}(\varepsilon_r - 1)^2 - e^{4p(d+h)}(\varepsilon_r - 1)^2 + e^{2p(d+d+h)}(\varepsilon_r + 1)^2 - e^{2p(d+g+d+h)}(\varepsilon_r + 1)^2 - \\ & e^{2p(d+g)}(\varepsilon_r^2 - 1) - e^{2p(d+d+h)}(\varepsilon_r^2 - 1) + e^{2p(d+h+g)}(\varepsilon_r^2 - 1) - e^{2p(d+d+h+d+h)}(\varepsilon_r^2 - 1) \end{aligned} \quad (81)$$

Περιοχή 1

$$A1_n = \frac{-e^{4p_n(d+h)}(\varepsilon_r - 1)^2 + e^{2p_n(d+d+h)}(\varepsilon_r + 1)^2 - e^{2p_n(d+g)}(\varepsilon_r^2 - 1) + e^{2p_n(d+h+g)}(\varepsilon_r^2 - 1)}{DG(p_n, \varepsilon_r, d, h, g)} \quad (82)$$

$$B1_n = 1 - A1_n \quad (83)$$

Περιοχή 2

$$A2_n = \frac{2e^{2p_n d} (e^{2p_n g}(\varepsilon_r - 1) - e^{2p_n(d+h)}(\varepsilon_r + 1))}{DG(p_n, \varepsilon_r, d, h, g)} \quad (84)$$

$$B2_n = \frac{2e^{2p_n(d+d+h)} (e^{2p_n(d+h)}(\varepsilon_r - 1) - e^{2p_n g}(\varepsilon_r + 1))}{DG(p_n, \varepsilon_r, d, h, g)} \quad (85)$$

Περιοχή 3

$$A3_n = \frac{4\varepsilon_r e^{2p_n(d+d+h)}}{DG(p_n, \varepsilon_r, d, h, g)} \quad (86)$$

$$B3_n = \frac{4\varepsilon_r e^{2p_n(d+d+h+g)}}{DG(p_n, \varepsilon_r, d, h, g)} \quad (87)$$

Υπολογισμός δυναμικού

Για τον υπολογισμό τώρα των συντελεστών T_n έχουμε.

$$T_n = \frac{4}{a} \int_0^{a/2} V(x,0) \sin(p_n x) dx = \frac{8V_o}{\pi a} \left(\int_0^{s/2} \arcsin\left(\frac{2x}{s}\right) \sin(p_n x) dx + \int_{s/2}^{a/2} \frac{\pi}{2} \sin(p_n x) dx \right) \quad (88)$$

Το δεύτερο από τα δύο παραπάνω ολοκληρώματα υπολογίζεται εύκολα. Το πρώτο ολοκλήρωμα με παραγοντική ολοκλήρωση δίνει

$$\int_0^{s/2} \arcsin\left(\frac{2x}{s}\right) \sin(p_n x) dx = \left[\arcsin\left(\frac{2x}{s}\right) \left(\frac{-1}{p_n}\right) \cos(p_n x) \right]_0^{s/2} + \int_0^{s/2} \left(\frac{1}{4}s^2 - x^2\right)^{-1/2} \frac{1}{p_n} \cos(p_n x) dx \quad (89)$$

και με χρήση του μετασχηματισμού $x = \frac{1}{2}s[\cos(u)]$ ο δεύτερος όρος απλοποιείται

$$\int_0^{s/2} \left(\frac{1}{4}s^2 - x^2\right)^{-1/2} \frac{1}{p_n} \cos(p_n x) dx = \int_0^{\pi/2} \frac{1}{p_n} \cos\left(p_n \frac{s}{2} \cos(u)\right) du \quad (90)$$

Εφαρμόζοντας το λήμμα 8.411.2 από την αναφορά [49] ότι

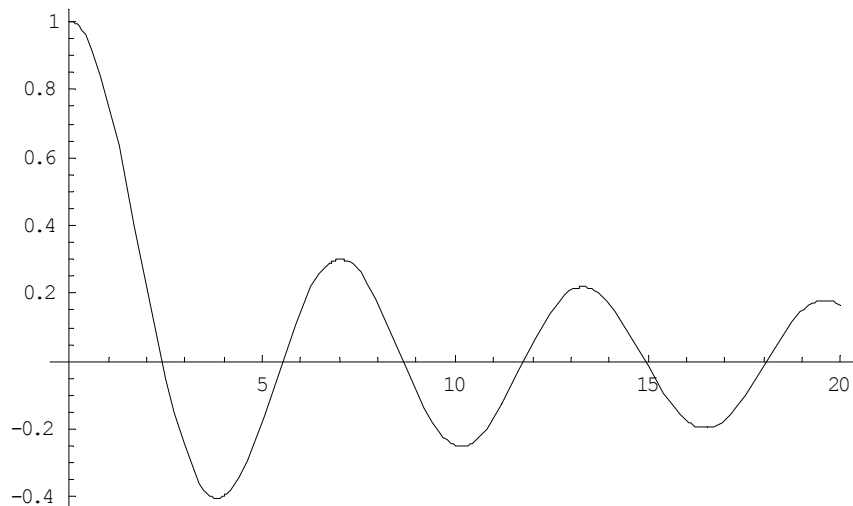
$$J_0(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \cos(t \cos(\theta)) d\theta \quad (91)$$

όπου J_0 η συνάρτηση Bessel πρώτου είδους, μηδενική τάξης (βλέπε Σχ. 38)

$$T_n = \frac{4V_o}{(2n-1)\pi} J_0\left(\frac{(2n-1)\pi s}{2a}\right) = \frac{4V_o}{p_n a} J_0\left(\frac{p_n s}{2}\right) \quad (92)$$

Παρατηρούμε εδώ ότι οι συντελεστές T_n εξαρτώνται μόνο από τον λόγο s/a .

Έχοντας υπολογίσει όλους τους συντελεστές έχουμε μια έκφραση περιγραφής του δυναμικού σε όλο τον χώρο άνω των ηλεκτροδίων του αισθητήρα. Ειδικά για ομοιόμορφο διηλεκτρικό σε όλο τον χώρο το χαρακτηριστικό βάθος διεισδυση στο υπόβαθρο είναι a/π όπως προκύπτει από τον πρώτος όρο της σειράς για $n=1$ που διεισδύει βαθύτερα στο υπόβαθρο.



Σχ. 38 Γραφική παράσταση της συνάρτησης Bessel πρώτου είδους και μηδενικής τάξης.

Θα δείξουμε ότι οι σειρές που καταλήξαμε για τα δύο προβλήματα δηλαδή με ή χωρίς την παρουσία επιπέδου γείωσης σε απόσταση g περιγράφουν επαρκώς το πεδίο που δημιουργούν τα επάλληλα ηλεκτρόδια.

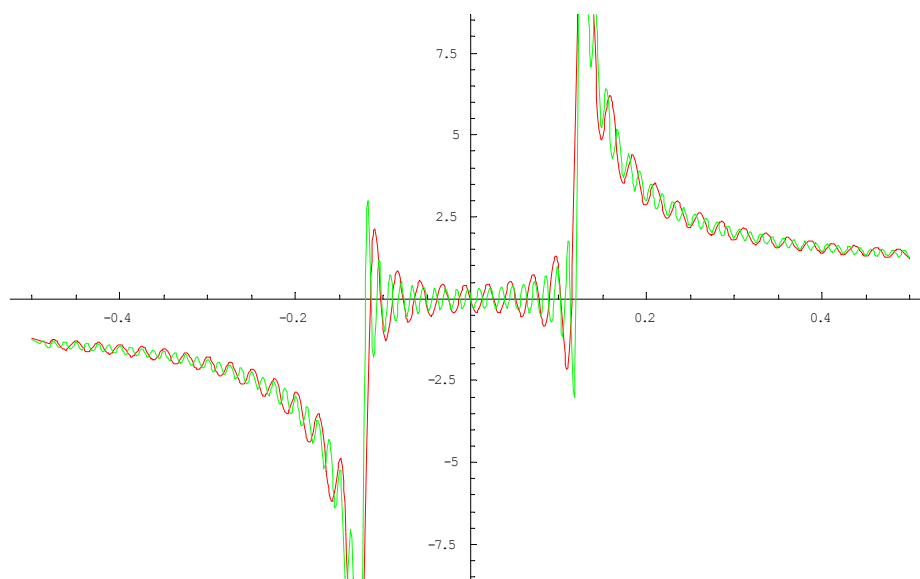
Στις περιοχές 2,3 η αντίστοιχη σειρά ικανοποιεί τις συνορικές συνθήκες και την εξίσωση Laplace αυτόματα λόγω του τρόπου υπολογισμού των συντελεστών των αντιστοιχών σειρών.

Στην περιοχή 1 τώρα υποθέσαμε ότι το δυναμικό $V_1(x,0)$ μεταξύ των ηλεκτροδίων δίνεται κατά προσέγγιση, από το γνωστό δυναμικό για λεπτές ημι-απέραντες πλάκες και από τα δυναμικά των ηλεκτροδίων πάνω σε αυτά.. Για την ακρίβεια ενώ πάνω στα ηλεκτρόδια η τιμή του δυναμικού είναι γνωστή, στον χώρο μεταξύ των

ηλεκτροδίων θα πρέπει η επιφανειακή συγκέντρωση φορτίου να είναι μηδενική ή ισοδύναμα η κλίση του δυναμικού κατα μήκος του άξονα Y καθώς ισχύει η γνωστή σχέση για τον υπολογισμό της επιφανειακής συγκέντρωσης φορτίου

$$\sigma(x) = -2\varepsilon \lim_{y \rightarrow 0} \left(\frac{\partial V_1(x, y)}{\partial y} \right) \quad (93)$$

Εάν προσέγγιση που υποθέσαμε είναι σωστή θα πρέπει η υπολογιζόμενη επιφανειακή συγκέντρωση φορτίου με βάση την σειρά ανάπτυξης του δυναμικού που καταλήξαμε για την περιοχή 1 να τείνει στο μηδέν.



Σχ. 39 Τυπική υπολογιζόμενη επιφανειακή συγκέντρωση φορτίου για το πρόβλημα χωρίς παρουσία επιπέδου γής από τους πρώτους 50(solid) και 100(grey) όρους αντίστοιχα της σειράς ανάπτυξης στην περιοχή 1.

Στο Σχ. 39 φαίνεται μία τυπική υπολογιζόμενη επιφανειακή συγκέντρωση από τους πρώτους 50 και 100 όρους της σειράς ανάπτυξης στην περιοχή 1 όπως προκύπτει με εφαρμογή της Εξ. 93 και για $s/a = 0.2$. Παρατηρούμε ότι πράγματι όπως προβλέπεται η συγκέντρωση φορτίου είναι μέγιστη στα άκρα των ηλεκτροδίων εκατέρωθεν του διακένου μεταξύ τους ενώ στον χώρο του διακένου μικραίνει καθώς αυξάνονται οι όροι της σειράς τείνοντας στο μηδέν. Επίσης λόγω της ημιτονοειδούς συμπεριφοράς της υπολογιζόμενης επιφανειακής συγκέντρωσης η μέση τιμή επιφανειακού φορτίου στην περιοχή του διακένου είναι ακόμη μικρότερη πράγμα που καθιστά ικανοποιητική την εν λόγω προσέγγιση του δυναμικού ακόμη και με λιγότερους όρους της αντίστοιχης σειράς.

III.4.4 Υπολογισμός χωρητικότητας μέσω επιφανειακού φορτίου

Έχοντας υπολογίσει το ηλεκτροστατικό δυναμικό σε όλο τον χώρο άνω των ηλεκτροδίων του interdigitated πυκνωτή σε μορφή σειράς η χωρητικότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων μπορεί να βρεθεί υπολογίζοντας το συνολικό φορτίο που φέρει ένα από τα ηλεκτρόδια εφόσον είναι ήδη γνωστό το δυναμικό του. Είναι δηλαδή

$$C_{tot} = \frac{Q_{plus,tot}}{V_o} = \frac{\int_{s/2}^{s/2+w} \sigma(x,0) dx}{V_o} = \frac{\int_{s/2}^{s/2+w} \left(\varepsilon \lim_{y \rightarrow 0} \frac{\partial V_1(x,y)}{\partial y} \right)}{V_o} \quad (94)$$

όπου ε η διηλεκτρική σταθερά του αέρα και C_{tot} η συνολική χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους. Προφανώς επειδή στην πράξη συνδέονται μεταξύ τους περισσότερα του ενός ηλεκτρόδια η συνολική χωρητικότητα μεταξύ των ακροδεκτών του αισθητήρα πρέπει να πολλαπλασιαστεί με τον αριθμό τους καθώς και το πραγματικό μήκος των ηλεκτροδίων. Εδώ δεν λαμβάνεται υπόψιν για πραγματικούς αισθητήρες με πεπερασμένο αριθμό επάλληλων ηλεκτροδίων και μήκος ηλεκτροδίων η επίδραση της χωρητικότητας των ακραίων ηλεκτροδίων καθώς και της διασύνδεσής τους. Πρακτικά αποδεικνύεται ότι η συνολική χωρητικότητα για ικανό αριθμό ηλεκτροδίων και μήκος ηλεκτροδίων καθορίζεται κυρίως από αυτή στο εσωτερικών ηλεκτροδίων.

Αντικατάσταση στη προηγούμενη σχέση του $V_1(x,y)$ από το ανάπτυγμα σε σειρά που υπολογίσαμε δίνει τις παρακάτω σχέσεις για την συνολική χωρητικότητα στα δύο προβλήματα με ή χωρίς παρουσία επιπέδου γείωσης.

$$C_{tot,\infty} = \frac{1}{V_o} \int_{s/2}^{a-s/2} \left[\varepsilon \lim_{y \rightarrow 0} \frac{\partial}{\partial y} \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{4aV_o}{p_n} J_0\left(\frac{p_n s}{2}\right) \sin(p_n x) (A1_{n,\infty} e^{p_n y} + (1 - A1_{n,\infty}) e^{-p_n y}) \right) \right] dx \quad (95)$$

και με εναλλαγή της ολοκλήρωσης με το αθροισμα μετά από υπολογισμό του ορίου της μερικής παραγώγου πάνω στους όρους του αθροίσματος έχουμε τελικά

$$C_{tot,\infty} = \frac{8}{a} \varepsilon \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{p_n} J_0(p_n s/2) \cos(p_n s/2) (2A1_{n,\infty} - 1) \right] \quad (96)$$

όπου $C_{tot,\infty}$ η χωρητικότητα για το πρόβλημα χωρίς επίπεδο γείωσης. Με ανάλογο τρόπο

$$C_{tot,g} = \frac{8}{a} \varepsilon \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{p_n} J_0(p_n s/2) \cos(p_n s/2) (2A1_{n,g} - 1) \right] \quad (97)$$

όπου $C_{tot,g}$ η χωρητικότητα για το πρόβλημα με επίπεδο γείωσης

Από τις δύο προηγούμενες σχέσεις γίνεται εμφανής η επίδραση επιπέδου γείωσης στην συμπεριφορά αισθητήρα χωρητικότητας βασισμένου σε πυκνωτή επάλληλων ηλεκτροδίων. Όπως βλέπουμε για δεδομένη γεωμετρία των ηλεκτροδίων δηλαδή για δεδομένα a, s κάθε όρος των αντίστοιχων σειρών υπολογισμού της χωρητικότητας αποτελείται από ένα κοινό μέρος ανεξάρτητα του προβλήματος που μελετάμε. Όμως ο τελικός όρος κάθε σειράς διαμορφώνεται από ένα παράγοντα που εξαρτάται από την ύπαρξη ή όχι γειτονικού επιπέδου γείωσης μέσω των αντιστοίχων συντελεστών που υπολογίζουμε για την ικανοποίηση των συνοριακών συνθηκών πάνω στο διηλεκτρικό και το πιθανό επίπεδο γείωσης.

III.4.5 Υπολογισμός χωρητικότητας μέσω ηλεκτροστατικής ενέργειας

Μια εναλλακτική μέθοδος για τον υπολογισμό της χωρητικότητας και μάλιστα σύμφωνα με την αναφορά [48] περισσότερο ακριβής υπάρχει. Η μέθοδος αυτή βασίζεται την διατήρηση της αποθηκευμένης ηλεκτροστατικής ενέργειας στο σύστημα.

Λόγω της περιοδικότητας του προβλήματος αγνοούμε την παραμόρφωση του πεδίου στην περιμετρο του αισθητήρα και υποθέτουμε αρκετά μεγάλο αριθμό ηλεκτροδίων. Η αποθηκευμένη ηλεκτροστατική ενέργεια θα δίνεται από το παρακάτω ολοκλήρωμα στον όγκο που καταλαμβάνει το πεδίο του αισθητήρα

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} C_{odd} (2V)^2 X_o Z_o &= \int_0^{X_o} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{Z_o} \frac{1}{2} \epsilon E^2 dx dy dz \\ &= \int_0^{X_o} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{Z_o} \frac{1}{2} \epsilon \left[\left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy dz \end{aligned} \quad (98)$$

όπου θεωρούμε ότι ο αισθητήρας εκτείνεται σε επιφάνεια $X_o \times Z_o$, αντίστοιχα και C_{odd} δηλώνει την ισοδύναμη χωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας για περιττή διέγερση του αισθητήρα.

Λόγω της ομοιομορφίας του πεδίου κατα μήκος του άξονα Z και με την ολοκλήρωση κατά διαστήματα στις αντίστοιχες περιοχές 1,2 και 3 του προβλήματος έχουμε

$$\begin{aligned}
C_{odd} &= \frac{\varepsilon_o}{4V_o^2 X_o} \\
&\left\{ \int_0^{X_o} \int_0^d \left[\left(\frac{\partial V_1}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_1}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy + \right. \\
&\varepsilon_r \int_0^{X_o} \int_d^{d+h} \left[\left(\frac{\partial V_2}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_2}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy + \\
&\left. \int_0^{X_o} \int_{d+h}^g \left[\left(\frac{\partial V_3}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_3}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy \right\} \quad (99)
\end{aligned}$$

όπου g η θέση του επιπέδου γείωσης ή το ∞ εφόσον δεν υπάρχει αυτό. Επιπλέον αγνοήσαμε το πεδίο για αρνητικά y .

Κάθενα από τα επιμέρους ολοκληρώματα που καταλήξαμε έχει την ίδια γενική μορφή μετά την αντικατάσταση της συνάρτησης για το δυναμικό με την ανάπτυξη της σε σειρά από την Εξ. 71.

Το δεύτερο από τα ολοκληρώματα για παράδειγμα δίνει μετά από την εναλλαγή παραγωγίσις και άθροισης

$$\begin{aligned}
&\int_0^{X_o} \int_d^{d+h} \left[\left(\frac{\partial V_2}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_2}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy = \\
&\int_0^{X_o} \int_d^{d+h} \left[\left(\sum_n p_n T_n \cos(p_n x) (A 2_n \exp(p_n y) + B 2_n \exp(-p_n y)) \right)^2 + \right. \\
&\left. \left(\sum_n p_n T_n \sin(p_n x) (A 2_n \exp(p_n y) - B 2_n \exp(-p_n y)) \right)^2 \right] dx dy \quad (100)
\end{aligned}$$

Ισχύουν οι επόμενες σχέσεις ορθογωνιότητας μεταξύ των τριγωνομετρικών συναρτήσεων της βάσης ανάπτυξης σε σειρά Fourier.

$$\begin{aligned}
\int_0^{2a} \cos(p_n x) \cos(p_m x) dx &= \begin{cases} 0 & , n \neq m \\ a & , n = m \end{cases} \\
\int_0^{2a} \sin(p_n x) \sin(p_m x) dx &= \begin{cases} 0 & , n \neq m \\ a & , n = m \end{cases} \\
\int_0^{2a} \cos(p_n x) \sin(p_m x) dx &= 0
\end{aligned} \tag{101}$$

Άρα το προηγούμενο ολοκλήρωμα δίνεται από την παρακάτω σχέση εάν το X_o είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του $2a$.

$$\begin{aligned}
&\int_0^{X_o} \int_d^{d+h} \left[\left(\frac{\partial V_2}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_2}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy = \\
&\sum_n \left[\frac{X_o}{2a} a(p_n T_n)^2 \int_d^{d+h} (A2_n \exp(p_n y) + B2_n \exp(-p_n y))^2 dy \right] + \\
&\sum_n \left[\frac{X_o}{2a} a(p_n T_n)^2 \int_d^{d+h} (A2_n \exp(p_n y) - B2_n \exp(-p_n y))^2 dy \right]
\end{aligned} \tag{102}$$

Ευκολα μπορεί να υπολογιστούν τα παραπάνω ολοκληρώματα άρα καταλήγουμε στην εξής τελική σχέση για την χωρητικότητα C_{odd} στην περίπτωση με επίπεδο γείωσης

$$\begin{aligned}
C_{odd} &= \frac{\varepsilon_o}{4V_o^2 X_o} \frac{X_o}{2} \sum_n (p_n T_n)^2 \frac{1}{p_n} [1 - B3_n^2 e^{-2p_n g} + A3_n^2 e^{2p_n g} + \\
&2A1_n (e^{-2p_n d} - 1) + 2A1_n^2 e^{-2p_n d} (e^{4p_n d} - 1) - \\
&\varepsilon_r A2_n^2 e^{2p_n d} + e^{2p_n(d+h)} (-A3_n^2 + \varepsilon_r A2_n^2) + e^{-2p_n(d+h)} (B3_n^2 - \varepsilon_r B2_n^2) + e^{-2p_n d} (B2_n^2 \varepsilon_r - 1)]
\end{aligned} \tag{103}$$

ή

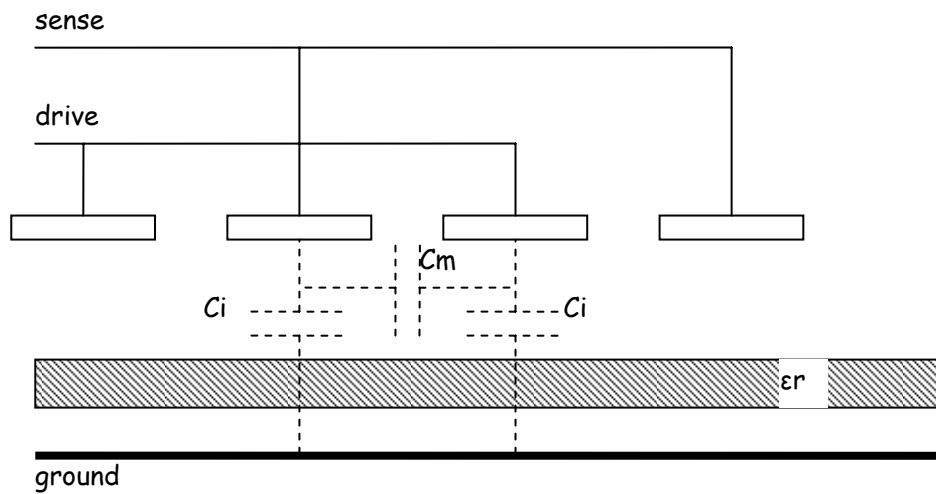
$$\begin{aligned}
C_{odd} = & \frac{2\varepsilon_o}{a^2} \sum_n \left(J_o \left(\frac{p_n s}{2} \right) \right)^2 \frac{1}{p_n} [1 - B3_n^2 e^{-2p_n s} + A3_n^2 e^{2p_n s} + \\
& 2A1_n (e^{-2p_n d} - 1) + 2A1_n^2 e^{-2p_n d} (e^{4p_n d} - 1) - \\
& \varepsilon_r A2_n^2 e^{2p_n d} + e^{2p_n(d+h)} (-A3_n^2 + \varepsilon_r A2_n^2) + e^{-2p_n(d+h)} (B3_n^2 - \varepsilon_r B2_n^2) + e^{-2p_n d} (B2_n^2 \varepsilon_r - 1)]
\end{aligned}
\tag{104}$$

III.4.6 Η αμοιβαία χωρητικότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων

Η σχέση που καταλήξαμε με βάση την ενέργεια του ηλεκτροστατικού πεδίου μας δίνει την συνολική χωρητικότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων του αισθητήρα. Λόγω της ύπαρξης επιπέδου γείωσης και της αντισυμμετρικής διέγερσης του αισθητήρα στην παραπάνω χωρητικότητα περιλαμβάνεται τόσο η αμοιβαία χωρητικότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων αλλά και οι επιμέρους χωρητικότητες καθενός από τα ηλεκτρόδια ως προς το επίπεδο γείωσης.

Ο αισθητήρας λόγω της «ουσιαστικής» γείωσης στα ηλεκτρόδια που συνδέονται με τον τελεστικό ενισχυτή εισόδου του ηλεκτρονικού κυκλώματος επηρεάζεται μόνο από την αμοιβαία χωρητικότητα. Το «ουσιαστικό» βραχυκλωμα αναιρεί την επίδραση της όποιας χωρητικότητας μεταξύ των αντιστοίχων ηλεκτροδίων και του επιπέδου γείωσης όπως περιγράψαμε και κατά την παρουσίαση των κυκλωμάτων μέτρησης

Στο επόμενο σχήμα φαίνονται οι συγκεντρωμένες ισοδύναμες χωρητικότητες. Βλέπουμε δηλαδή ότι υπάρχει η αμοιβαία χωρητικότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων C_m αλλά και η χωρητικότητα καθενός των ηλεκτροδίων ως προς την γή C_i



Σχ. 40 Ισοδύναμες χωρητικότητες του αισθητήρα επάλληλων ηλεκτροδίων παρουσία επιπέδου γείωσης.

Με βάση το σχήμα για περιττή διέγερση η συνολική χωρητικότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι

$$C_{odd} = C_m + C_i/2$$

καθώς οι επιμέρους χωρητικότητες C_i των ηλεκτροδίων συνδέονται εν σειρά και συνολικά παράλληλα στην C_m

Αρκεί επομένως να υπολογιστεί η χωρητικότητα C_i για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε την αμοιβαία χωρητικότητα C_m εφόσον η χωρητικότητα C_{odd} προκύπτει από την Εξ. 104.

III.4.7 Υπολογισμός της χωρητικότητας προς γή των ηλεκτροδίων

Η χωρητικότητα C_i προκύπτει θεωρώντας άρτια διέγερση των ηλεκτροδίων. Τότε η διαφορά δυναμικού στα άκρα της C_m είναι μηδενική άρα μπορεί ουσιαστικά να αφαιρεθεί από το Σχ. 40 .

Για τον υπολογισμό της υποθέτουμε ότι όλα τα ηλεκτρόδια του αισθητήρα έχουν κοινό δυναμικό. Βλέπουμε τότε ότι η διάταξη σε καθένα από τα ηλεκτρόδια μοιάζει με ένα πυκνωτή παράλληλων πλακών με διηλεκτρική πλάκα ανάμεσα στους οπλισμούς. Αν η διηλεκτρική πλάκα βρίσκεται σχετικά μακριά από τα ηλεκτρόδια

του αισθητήρα τότε το δυναμικό θα είναι σχεδόν παντού σταθερό καταμήκος του άξονα X και θα μεταβάλλεται γραμμικά στον άξονα Y.

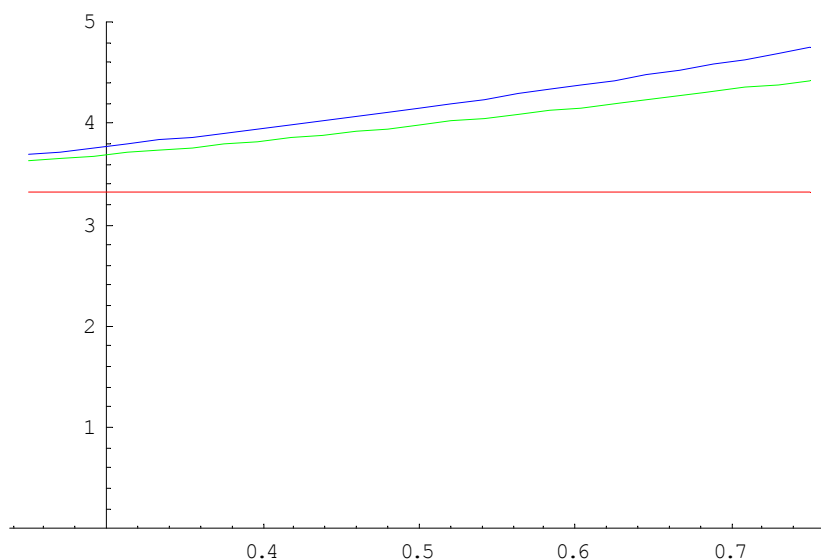
Από το αντίστοιχο πρόβλημα για πυκνωτή παραλληλων πλακών εάν υποθέσουμε την σταθερότητα το δυναμικού στις διεπιφάνειες αέρα – διηλεκτρικής πλάκας αυτές μπορούν να θεωρηθεί ότι ταυτίζονται με δύο απείρως λεπτά ηλεκτρόδια και έτσι η συνολική χωρητικότητα προκύπτει ως ο εν σειρά συνδιασμός δύο πυκνωτών. Ενώς με διηλεκτρικό υλικό την πλάκα και απόσταση οπλισμών το πάχος της και ενός δευτέρου με διηλεκτικό τον αέρα και απόσταση οπλισμών αυτή του χώρου χωρίς διηλεκτικό.

Από τα παραπάνω προκύπτει μία πρώτη προσέγγιση για την επιμέρους χωρητικότητα ανά μονάδα μήκος καθενός ηλεκτροδίου ως προς την γή ως

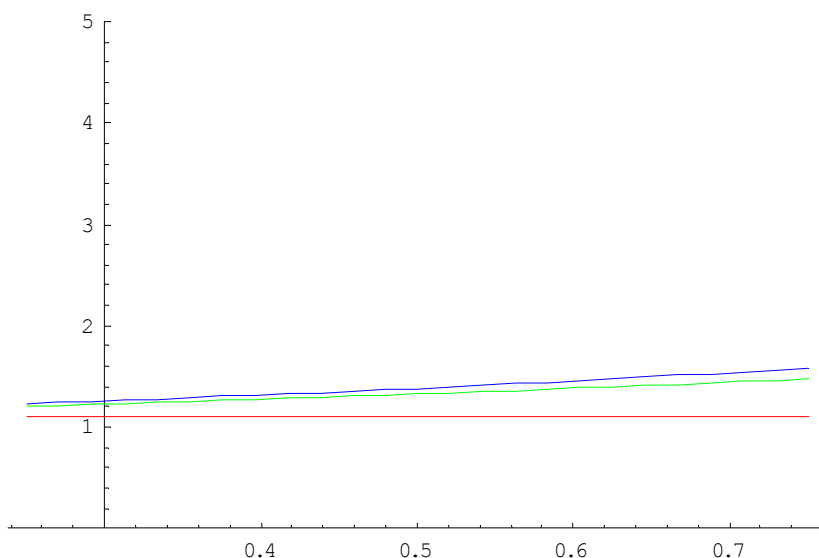
$$C_a = \epsilon_o \epsilon_r \frac{w}{h}, \quad C_b = \epsilon_o \frac{w}{g-h}$$

$$C_i = \frac{C_a C_b}{C_a + C_b}$$

Αν θεωρήσουμε το βήμα των ηλεκτροδίων a ως μονάδα μέτρησης των αποστάσεων η γραφική παράστασή της C_i δίνεται στα επόμενα σχήματα για διαφορετικά πλάτη ηλεκτροδίων συναρτήσει του πάχους της διηλεκτρικής πλάκας και παράμετρο την σχετική διηλεκτρική σταθερά.



Σχ. 41 Η χωρητικότητας ως προς γή (pF/m) για $s=0.25$, $g=2.0$ συναρτήσει του πάχους της διηλεκτρικής πλάκας h και παράμετρο την διηλεκτρική της σταθερά $\epsilon_r=1,3$ και 5



Σχ. 42 Η χωρητικότητα ως προς γή (pF/m) για $s=0.75$, $g=2.0$ συναρτήσει του πάχους της διηλεκτρικής πλάκας h και παράμετρο την διηλεκτρική της σταθερά $\epsilon_r=1,3$ και 5

Βλέπουμε καθαρά ότι όσο αυξάνει το πάχος της πλάκας διηλεκτρικού τόσο διαχωρίζονται καλύτερα και καμπύλες της χωρητικότητας για δεδομένες σχετικές διηλεκτρικές σταθερές.

III.4.8 Θεωρητικά αποτελέσματα

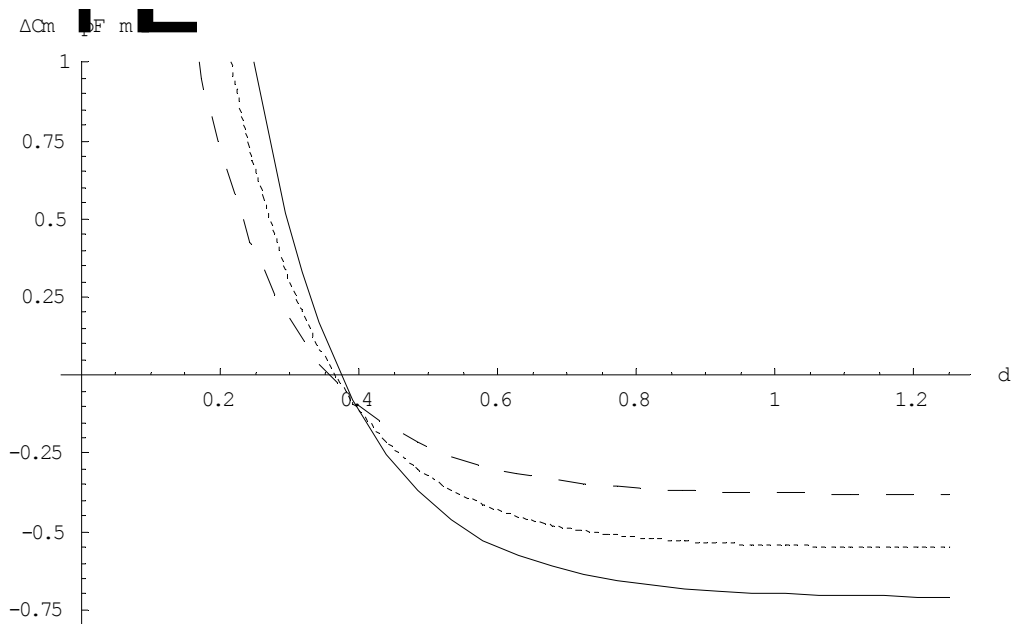
Απο την Εξ. 106 έχουμε για την αμοιβαία χωρητικότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων

$$C_m = C_{odd} - \frac{C_i}{2}$$

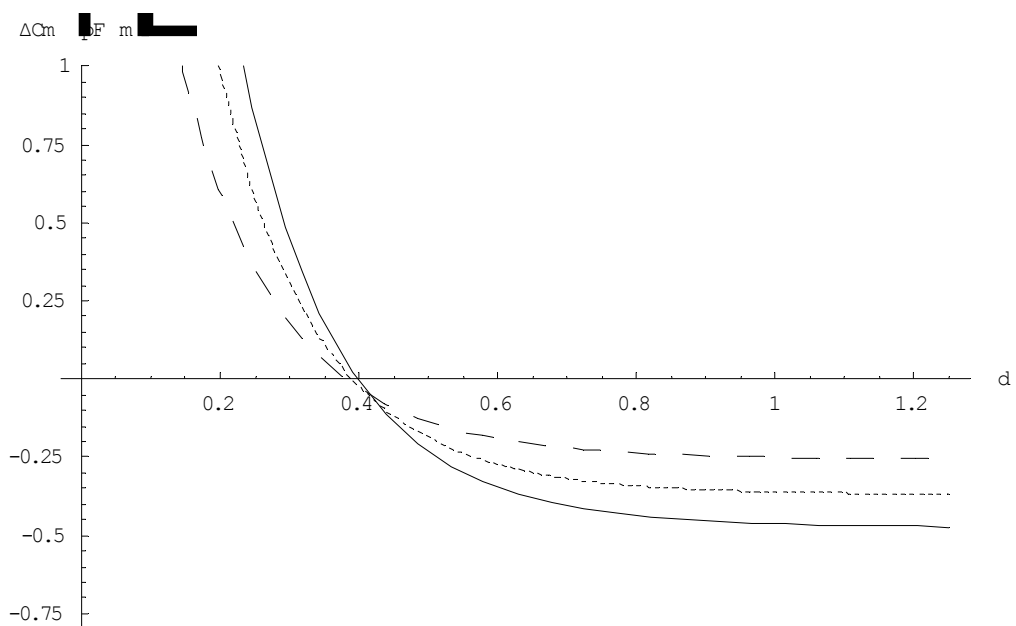
Επειδή ο αισθητήρας μετρά μετά από την αντιστάθμιση του μόνο μεταβολές χωρητικότητας και για άμεση σύγκριση των θεωρητικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα με χρήση πεπερασμένων στοιχείων μελετήσαμε κυρίως την μεταβολή της χωρητικότητας από αυτής για αέρα σε διαφορετικές γεωμετρίες των ηλεκτροδίων συναρτήσει της θέσης της διηλεκτρικής πλάκας και παράμετρο την διηλεκτρική σταθερά. Στα επόμενα σχήματα φαίνεται η

$$\Delta C_m = C_{m,\epsilon_r} - C_{m,\epsilon_r=1}$$

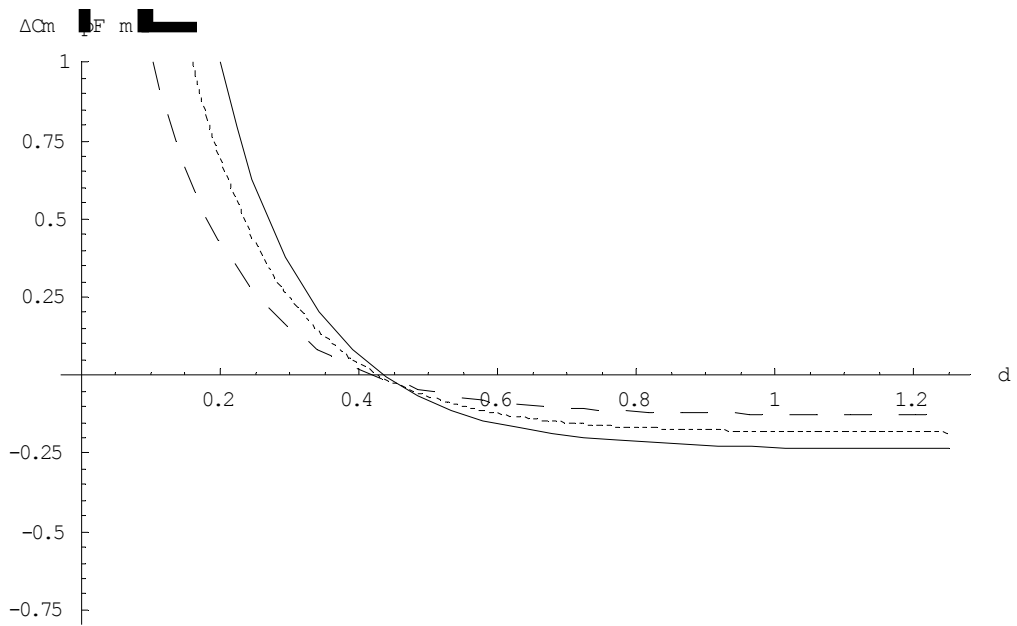
που είναι πάντα ανα σε $\frac{pF}{m}$ ενώ ως μονάδα μέτρησης αποστάσεων λαμβάνεται το βήμα a των ηλεκτροδίων. Η σειρά που προσέγγιζε την χωρητικότητα C_{odd} υπολογίστηκε μέχρι τον όρο τάξης 25



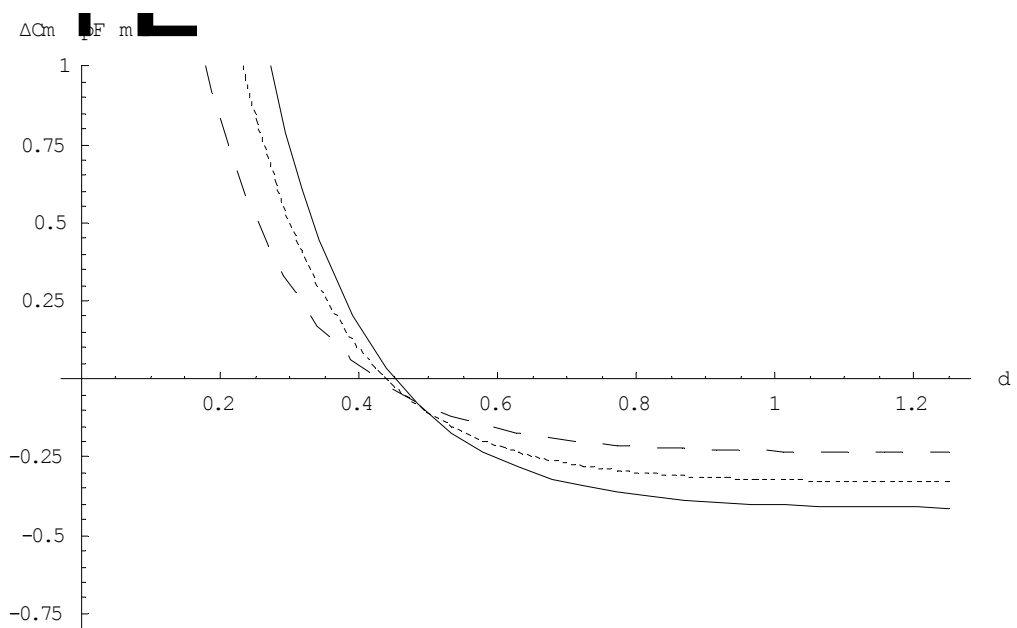
Σχ. 43 Η μεταβολή της αμοιβαίας χωρητικότητας για $s=0.25$, $h=0.75$, $g=2.0$ συναρτήσει της θέσης της διηλεκτρικής πλάκας και παράμετρο την σχετική διηλεκτρική της σταθερά ϵ_r , 5 (solid), 3 (dot) και 2 (dash)



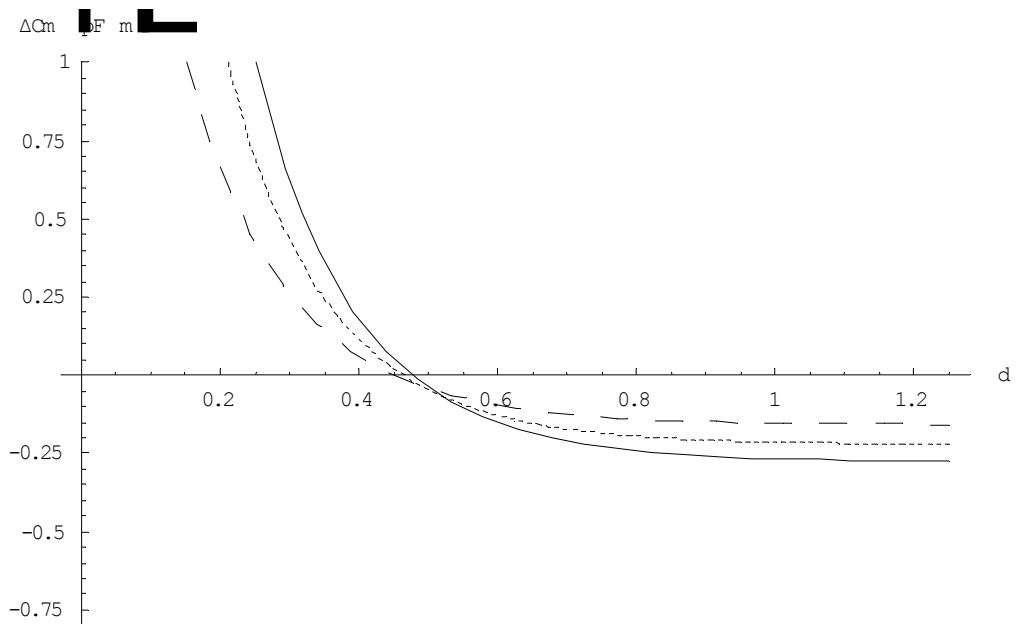
Σχ. 44 Η μεταβολή της αμοιβαίας χωρητικότητας για $s=0.50$, $h=0.75$, $g=2.0$ συναρτήσει της θέσης της διηλεκτρικής πλάκας και παράμετρο την σχετική διηλεκτρική της σταθερά ϵ_r , 5 (solid), 3 (dot) και 2 (dash)



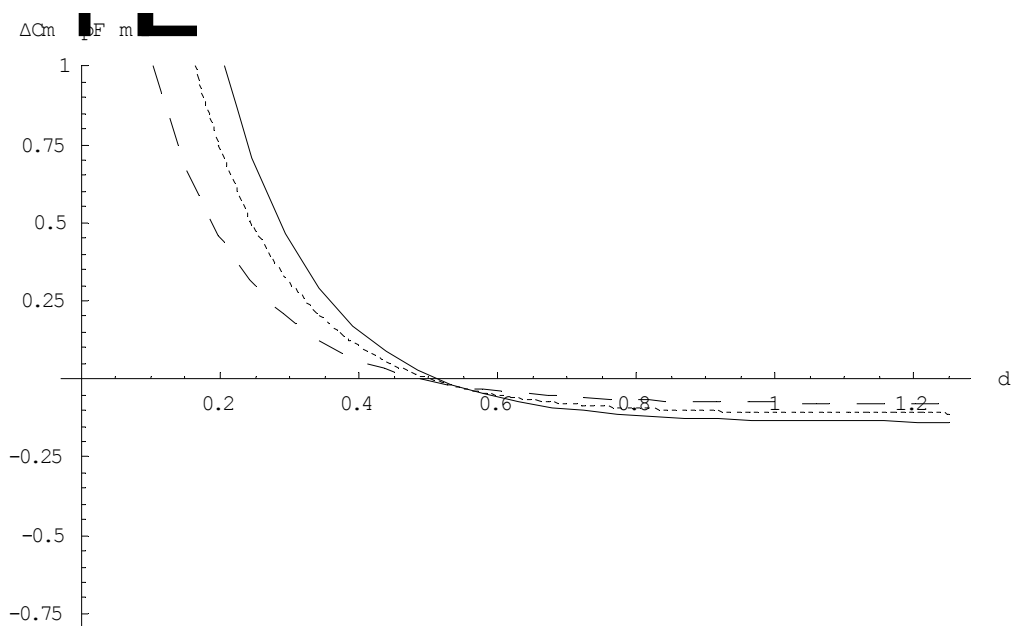
Σχ. 45 Η μεταβολή της αμοιβαίας χωρητικότητας για $s=0.75$, $h=0.75$, $g=2.0$ συναρτήσει της θέσης της διηλεκτρικής πλάκας και παράμετρο την σχετική διηλεκτρική της σταθερά ϵ_r , 5 (solid), 3 (dot) και 2 (dash)



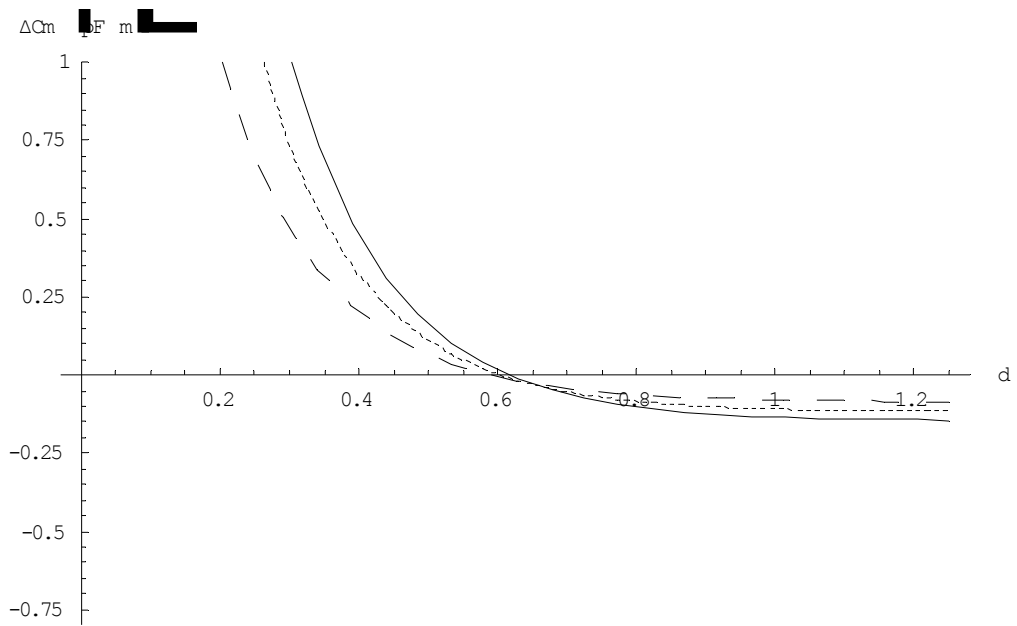
Σχ. 46 Η μεταβολή της αμοιβαίας χωρητικότητας για $s=0.25$, $h=0.50$, $g=2.0$ συναρτήσει της θέσης της διηλεκτρικής πλάκας και παράμετρο την σχετική διηλεκτρική της σταθερά ϵ_r , 5 (solid), 3 (dot) και 2 (dash)



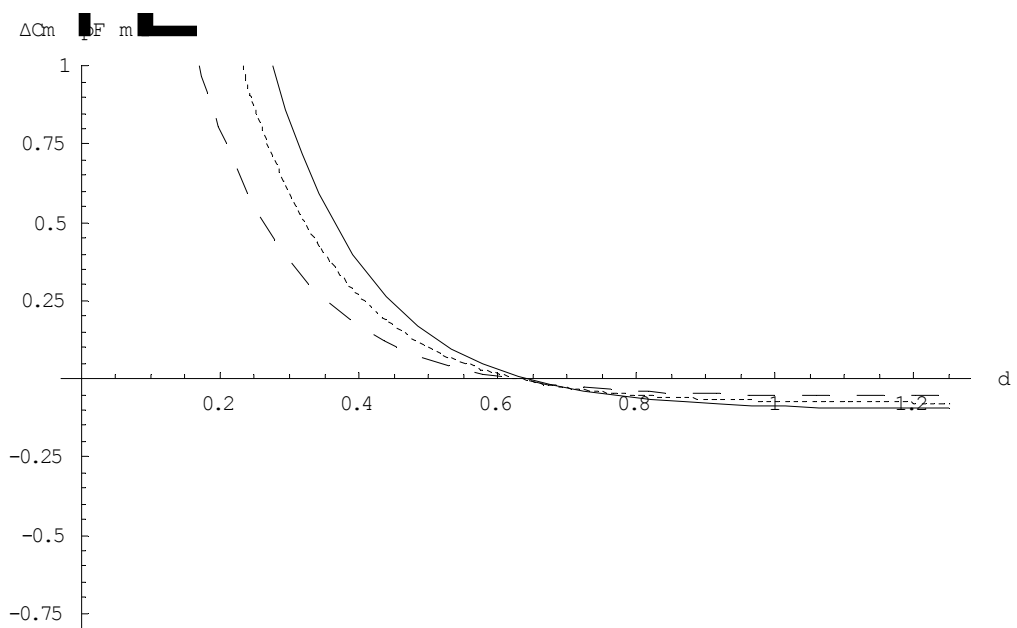
Σχ. 47 Η μεταβολή της αμοιβαίας χωρητικότητας για $s=0.50$, $h=0.50$, $g=2.0$ συναρτήσει της θέσης της διηλεκτρικής πλάκας και παράμετρο την σχετική διηλεκτρική της σταθερά ϵ_r , 5 (solid), 3 (dot) και 2 (dash)



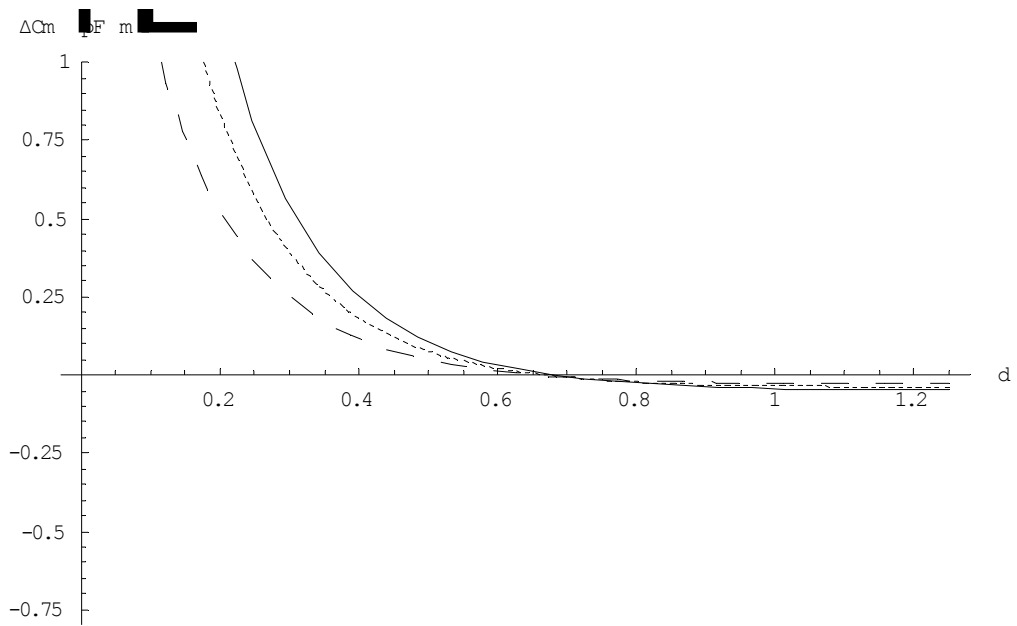
Σχ. 48 Η μεταβολή της αμοιβαίας χωρητικότητας για $s=0.75$, $h=0.50$, $g=2.0$ συναρτήσει της θέσης της διηλεκτρικής πλάκας και παράμετρο την σχετική διηλεκτρική της σταθερά ϵ_r , 5 (solid), 3 (dot) και 2 (dash)



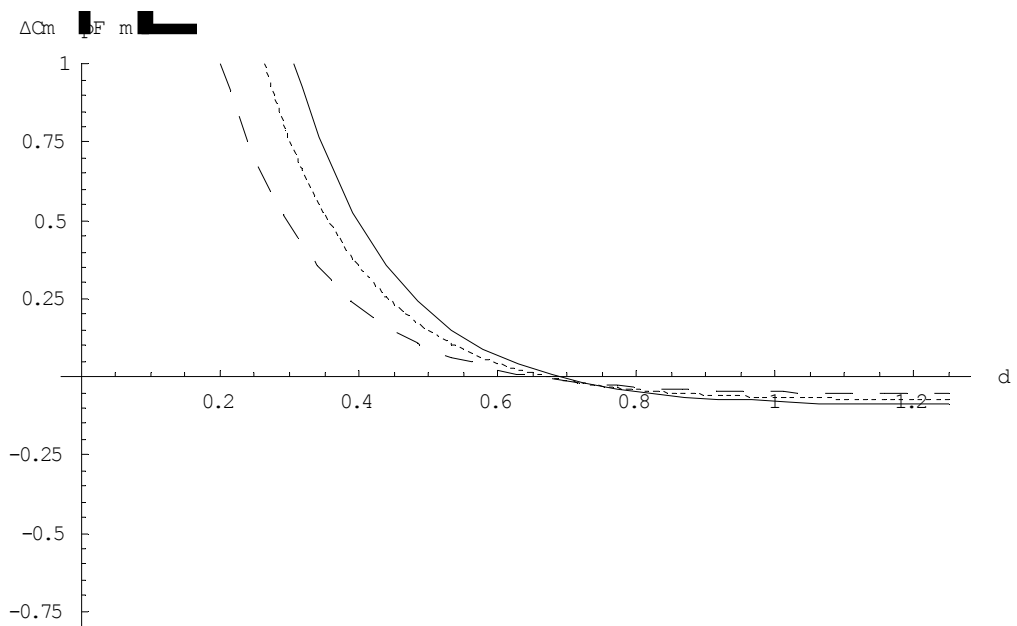
Σχ. 49 Η μεταβολή της αμοιβαίας χωρητικότητας για $s=0.25$, $h=0.75$, $g=4.0$ συναρτήσει της θέσης της διηλεκτρικής πλάκας και παράμετρο την σχετική διηλεκτρική της σταθερά ϵ_r , 5 (solid), 3 (dot) και 2 (dash)



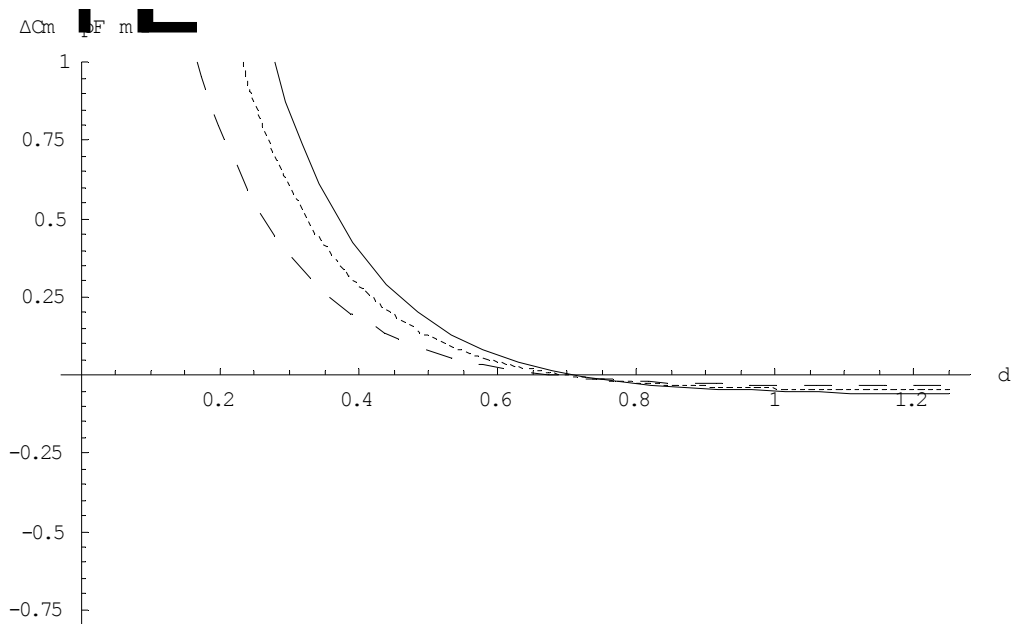
Σχ. 50 Η μεταβολή της αμοιβαίας χωρητικότητας για $s=0.50$, $h=0.75$, $g=4.0$ συναρτήσει της θέσης της διηλεκτρικής πλάκας και παράμετρο την σχετική διηλεκτρική της σταθερά ϵ_r , 5 (solid), 3 (dot) και 2 (dash)



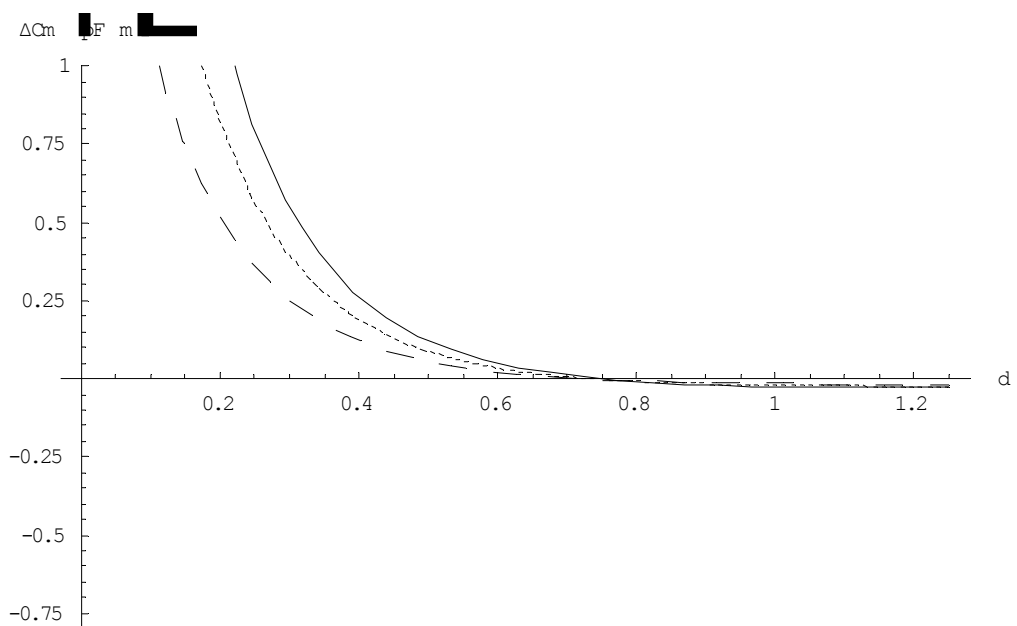
Σχ. 51 Η μεταβολή της αμοιβαίας χωρητικότητας για $s=0.75$, $h=0.75$, $g=4.0$ συναρτήσει της θέσης της διηλεκτρικής πλάκας και παράμετρο την σχετική διηλεκτρική της σταθερά ϵ_r , 5 (solid), 3 (dot) και 2 (dash)



Σχ. 52 Η μεταβολή της αμοιβαίας χωρητικότητας για $s=0.25$, $h=0.50$, $g=4.0$ συναρτήσει της θέσης της διηλεκτρικής πλάκας και παράμετρο την σχετική διηλεκτρική της σταθερά ϵ_r , 5 (solid), 3 (dot) και 2 (dash)



Σχ. 53 Η μεταβολή της αμοιβαίας χωρητικότητας για $s=0.50$, $h=0.50$, $g=4.0$ συναρτήσει της θέσης της διηλεκτρικής πλάκας και παράμετρο την σχετική διηλεκτρική της σταθερά ϵ_r , 5 (solid), 3 (dot) και 2 (dash)

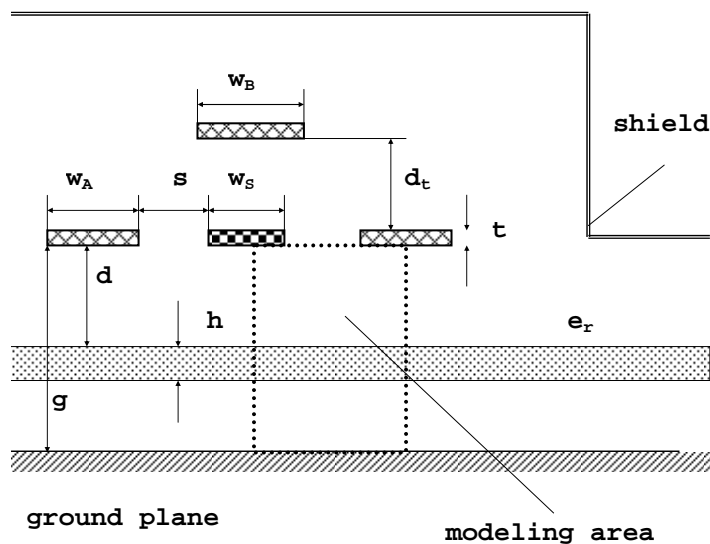


Σχ. 54 Η μεταβολή της αμοιβαίας χωρητικότητας για $s=0.75$, $h=0.50$, $g=4.0$ συναρτήσει της θέσης της διηλεκτρικής πλάκας και παράμετρο την σχετική διηλεκτρική της σταθερά ϵ_r , 5 (solid), 3 (dot) και 2 (dash)

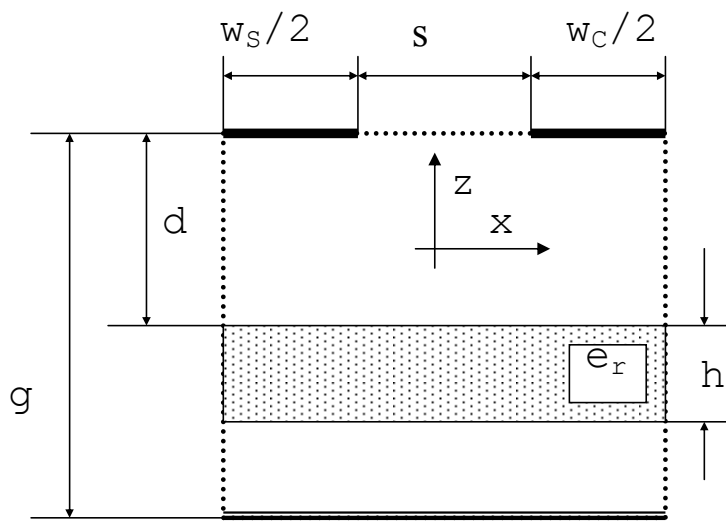
III.4.9 Χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Το πακέτο λογισμικού ANSYS® χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία της γεωμετρίας του προβλήματος που φαίνεται στο επόμενο σχήμα.

Θα ξαναεπισημάνουμε εδώ ότι η χωρητικότητα είναι ανεξάρτητη της διέγερσης και εξαρτάται μόνο από την σχετική θέση αγωγών και διηλεκτρικών στον χώρο. Επομένως είναι καθαρά ιδιότητα της προκύπτουσας μήτρας για την επίλυση του προβλήματος με πεπερασμένα στοιχεία και μπορεί να προκύψει χωρίς υπολογισμό της λύσης στους κόμβους του δικτυώματος των πεπερασμένων στοιχείων και χωρίς ανάγκη επιβολής συγκεκριμένης διέγερσης[41]. Η παρατήρηση αυτή είναι πολύ σημαντική καθώς η μητρα χωρητικότητας μεταξύ των αγωγών του προβλήματος προκύπτει άμεσα από την προηγούμενη και μειώνεται αρκετά ο απαιτούμενος χρόνος προσομοίωσης.



Σχ. 55 Η γεωμετρία του προβλήματος και ο χώρος προσομοίωσης που χρησιμοποιήσαμε (διακεκομμένη περιοχή).



Σχ. 56 Ο χώρος προσομοίωσης που μελετήθηκε με πεπερασμένα στοιχεία.

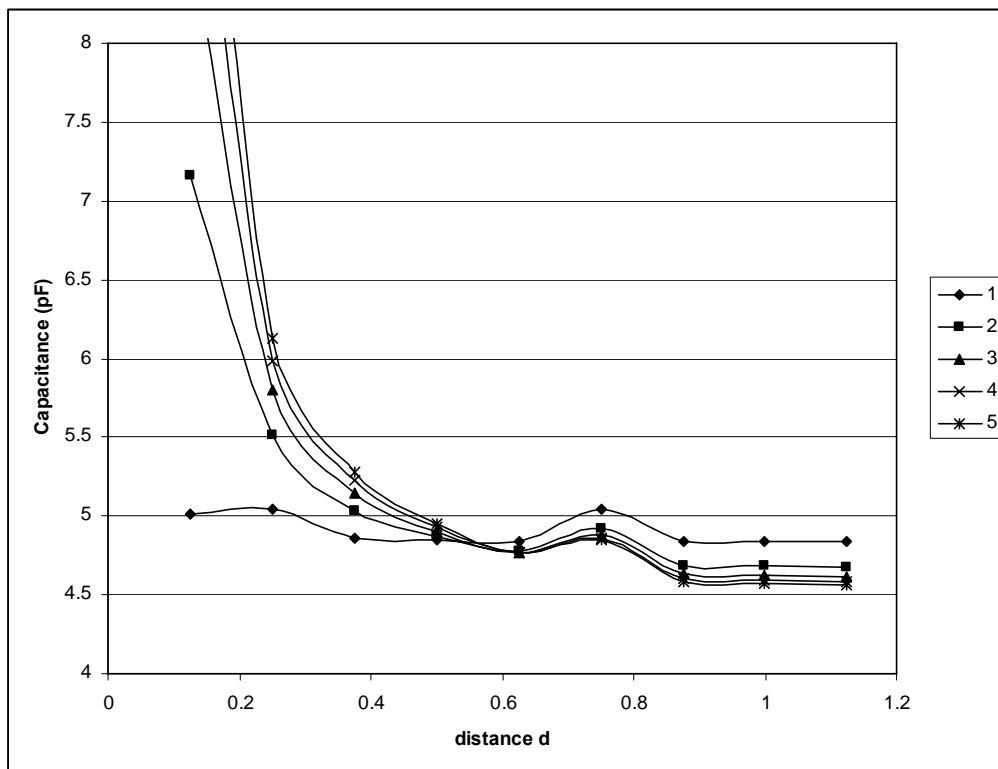
Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται με λεπτομέρεια ο χώρος προσομοίωσης με όλες τις σχετικές διαστάσεις. Υποθέσαμε ότι ο αισθητήρας αποτελείται από μεγάλο αριθμό ηλεκτροδίων που εκτείνονται στο άπειρο κατά μήκος του άξονα Y . Συνεπώς το πεδίο είναι περιοδικό και λόγω συμμετρίας περιγράφεται πλήρως από τον επιλεγμένο χώρο προσομοίωσης.

Ως μονάδα μέτρησης των αποστάσεων επιλέξαμε το πλάτος του χώρου προσομοίωσης ενώ υποθέσαμε ότι το επίπεδο γείωσης βρισκόταν σε διπλάσια του πλάτους απόσταση.

Για να μπορέσουμε να συγκρίνουμε τα διάφορα αποτελέσματα μεταξύ τους ευκολά επιλέξαμε να απεικονίσουμε την μεταβολή της χωρητικότητας που προκαλεί η παρουσία της διηλεκτρικής πλάκας από την τιμή αυτής χωρίς την παρουσία διηλεκτρικού δηλαδή για αέρα. Οι τιμές της χωρητικότητας είναι προφανώς ανα μονάδα μήκους και πρέπει να πολλαπλασιαστούν με το μήκος και τον αριθμό των ηλεκτροδίων για να προκύψουν οι τελικές τιμές.

Επειδή η θέση της πλάκας διηλεκτρικού αλλάζει, αλλάζει και το δικτύωμα των πεπερασμένων στοιχείων που προκύπτει μετά από τον διαμερισμό του χώρου του προβλήματος. Επιπλέον και λόγω των αριθμητικών σφαλμάτων που συνοδεύουν την επίλυση με πεπερασμένα στοιχεία η υπολογιζόμενη κάθε φορά τιμή της χωρητικότητας παρουσίαζε μια ταλάντωση γύρω από την ακριβή τιμή [42]. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα στο παρακάτω σχήμα όπου απεικονίζεται η υπολογιζόμενη χωρητικότητα και για σχετική διηλεκτρική σταθερά της πλάκας διηλεκτρικού ίση με την μονάδα συναρτησει της θέσης της. Ενώ θα περιμέναμε να είναι σταθερή ανεξάρτητα της θέσης της πλάκας υπάρχει μία σαφής ταλάντωση γύρω από την ακριβή τιμή της. Στο ίδιο σχήμα παρατηρούμε ότι όλες οι καμπύλες για διαφορετικές

διηλεκτρικές σταθερές έχουν περίπου την ίδια συμπεριφορά γεγονός που δικαιολογεί την επίδραση της αλλαγής της διαμέρισης σε πεπερασμένα στοιχεία.

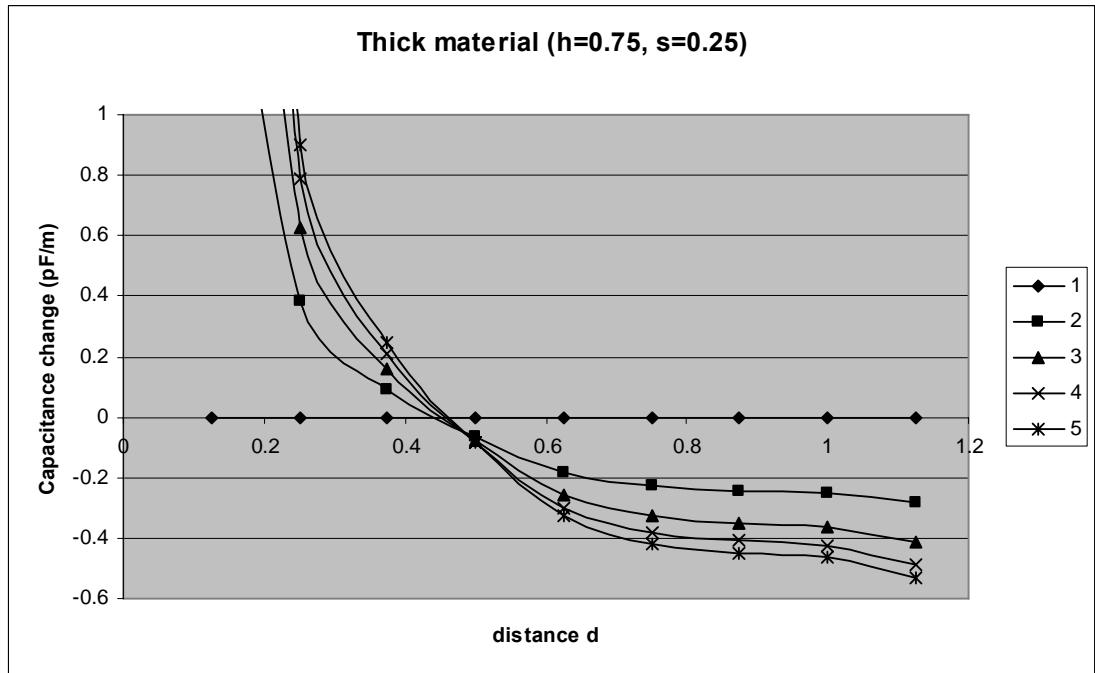


Σχ. 57 Τυπική γραφική παράσταση των αποτελεσμάτων της λύσης με πεπερασμένα στοιχεία για την χωρητικότητα συναρτήσει της θέσης διηλεκτρικής πλάκας και με παράμετρο την σχετική διηλεκτρική της σταθερά.

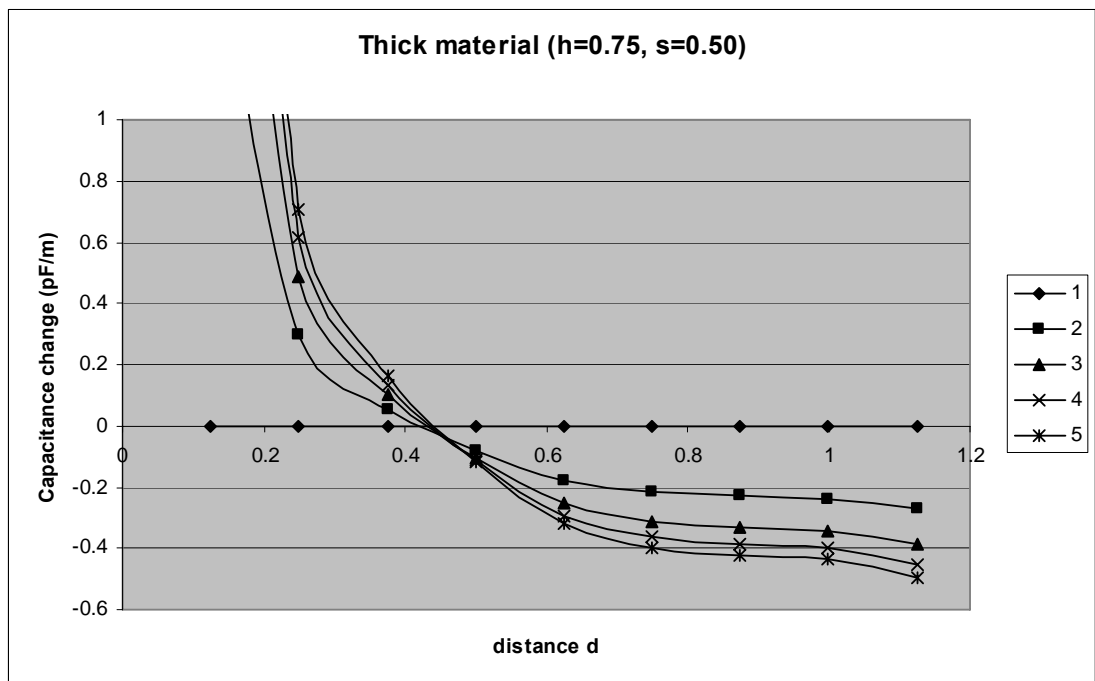
Για να μειωθεί η επίδραση της αλλαγής του διαμερισμού σε πεπερασμένα στοιχεία κάθε προσομοίωση περιελάμβανε πάντα και μία προσομοίωση με σχετική διηλεκτρική σταθερά της πλάκας ίση με του αέρα. Έτσι η μεταβολή που απεικονίζεται και στα διαγράμματα είναι η διαφορά μεταξύ των δύο αποτελεσμάτων για διηλεκτρικό και αέρα στην θέση της πλάκας.

Πίνακας 4. Λίστα παραμέτρων των προσομοιώσεων για την γεωμετρία στο Σχ. 56 .

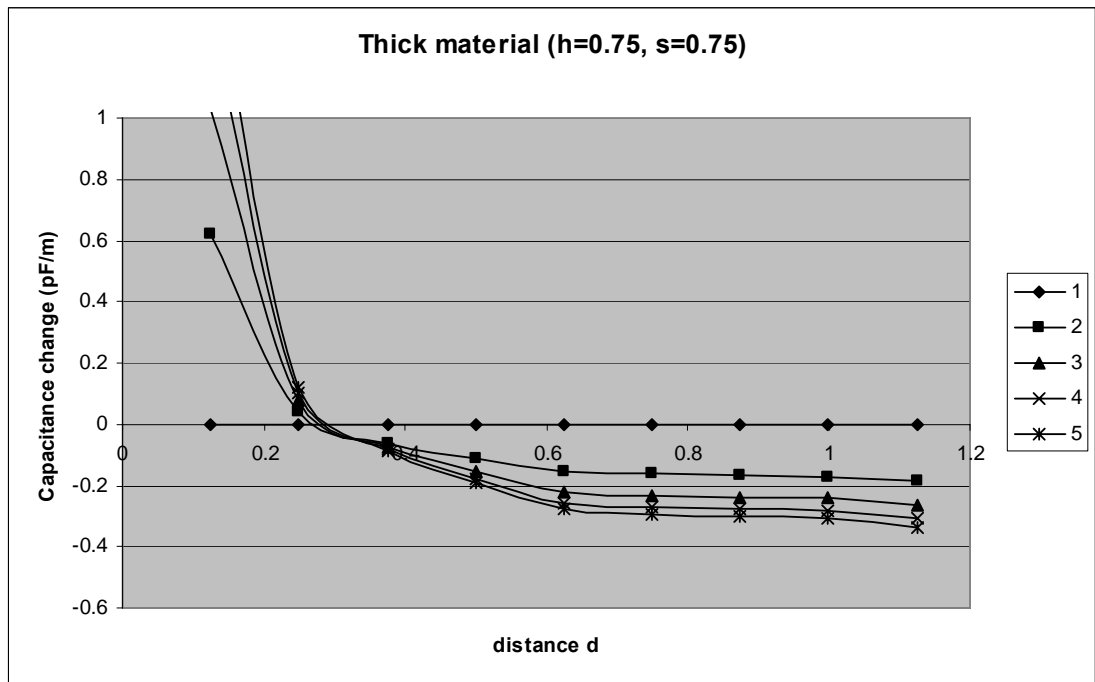
Πλάτος ηλεκτροδίων ($w_s/2=w_c/2$)	Διάκενο (s)	Πάχος (h)	Σχ. Διηλεκτρ. Σταθερά (ϵ_r)	Γείωση (g)
0.375	0.25	0.75	1,2,3,4,5	2
0.25	0.50	0.75	1,2,3,4,5	2
0.125	0.75	0.75	1,2,3,4,5	2
0.375	0.25	0.50	1,2,3,4,5	2
0.25	0.50	0.50	1,2,3,4,5	2
0.125	0.75	0.50	1,2,3,4,5	2



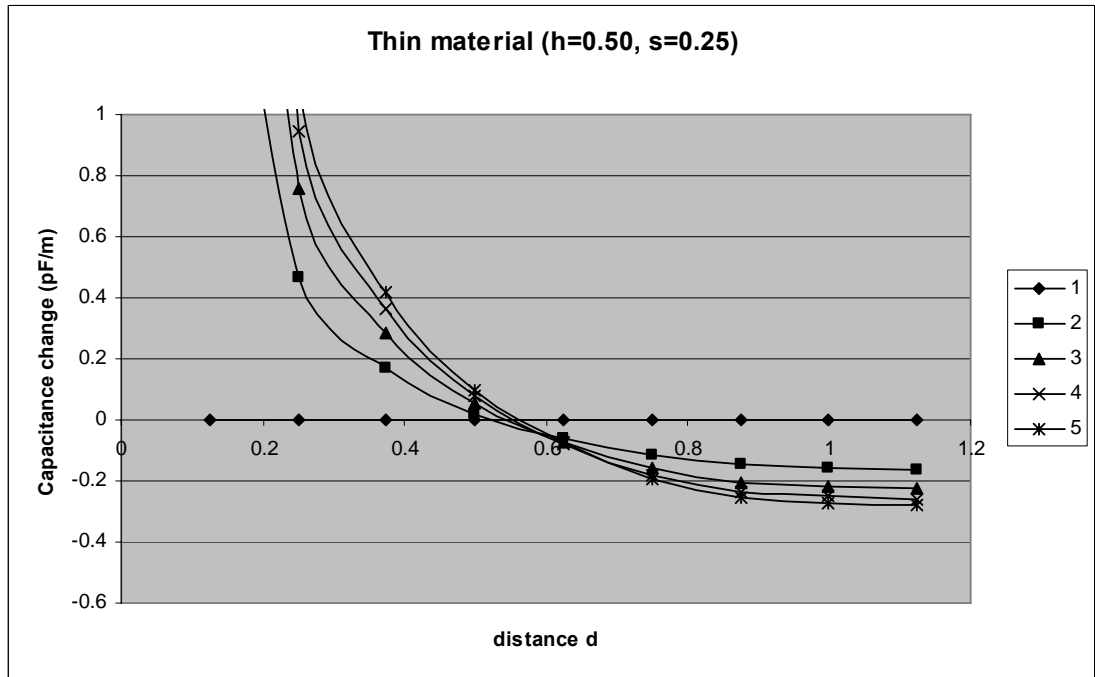
Σχ. 58 Μεταβολή της χωρητικότητας για παχύ υλικό και μικρό διάκενο ηλεκτροδίων



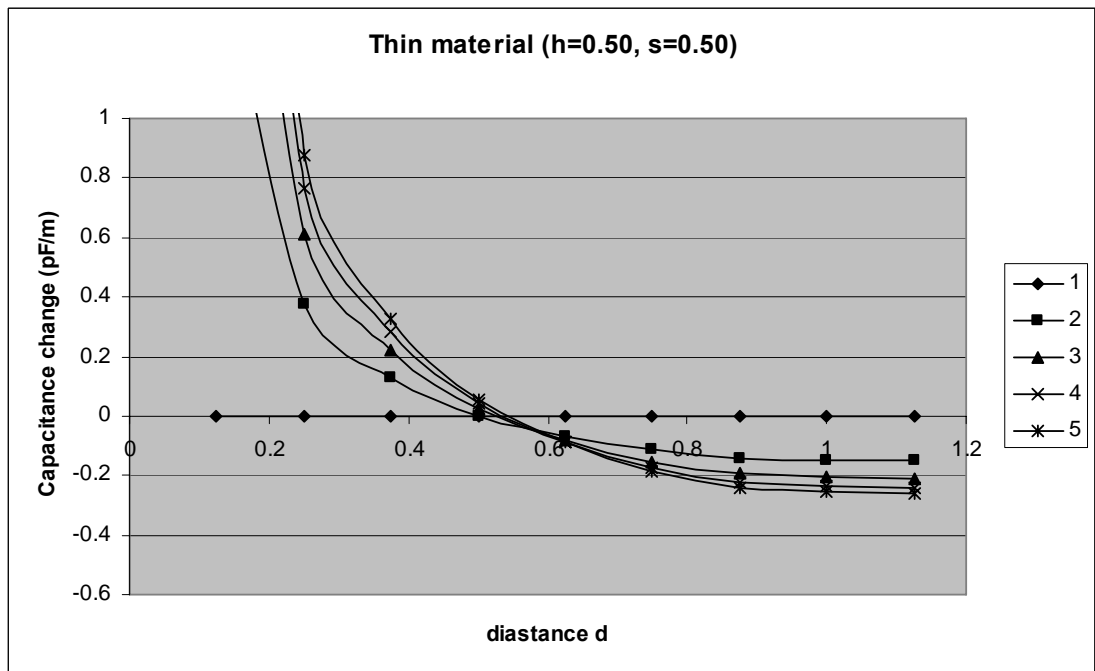
Σχ. 59 Μεταβολή της χωρητικότητας για παχύ υλικό και μέτριο διάκενο ηλεκτροδίων



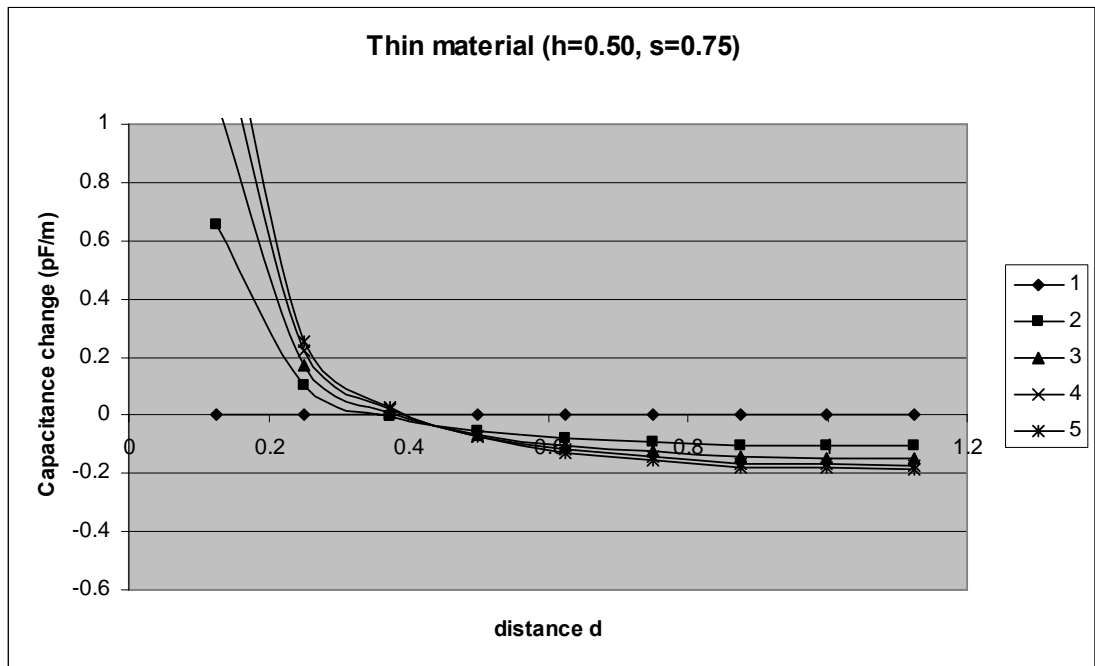
Σχ. 60 Μεταβολή της χωρητικότητας για παχύ υλικό και μεγάλο διάκενο ηλεκτροδίων



Σχ. 61 Μεταβολή της χωρητικότητας για λεπτό υλικό και μικρό διάκενο ηλεκτροδίων



Σχ. 62 Μεταβολή της χωρητικότητας για λεπτό υλικό και μέτριο διάκενο ηλεκτροδίων



Σχ. 63 Μεταβολή της χωρητικότητας για λεπτό υλικό και μεγάλο διάκενο ηλεκτροδίων

III.5 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

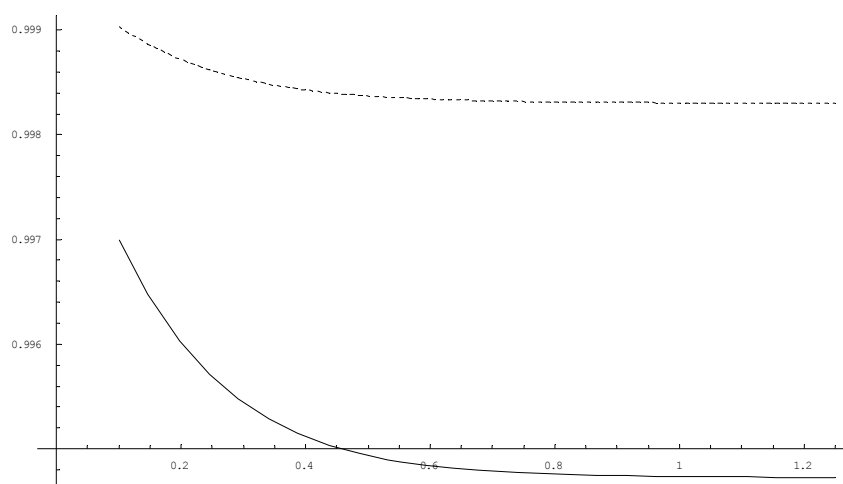
III.5.1 Σύγκριση αναλυτικών σχέσεων-πεπερασμένων στοιχείων

Στα Σχ. 43 έως και Σχ. 48 φαίνεται η γραφική παράσταση της θεωρητικά προβλεπόμενης τιμής από την προσεγγιστική σχέση που καταλήξαμε. Στα αντίστοιχα Σχ. 58 μέχρι και Σχ. 63 δίνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τη ίδια γεωμετρία του πρόβληματος με χρήση πεπερασμένων στοιχείων.

Παρατηρούμε ότι εκτός από μία μικρή υπερεκτίμηση της μεταβολής της αμοιβαίας χωρητικότητας μεταξύ των ηλεκτροδίων υπάρχει γενικά καλή συμφωνία. Η χαρακτηριστική θέση σύμπτωσης των καμπυλών στα αντίστοιχα γραφήματα παρουσιάζει την ίδια τάση μετατόπισης καθώς αλλάζει το πάχος του διηλεκτρικού αν και οι τιμές για την απόσταση d που λαμβάνει χώρα η ταύτιση διαφέρουν.

Η όποιες διαφορές μεταξύ των αναλυτικά προβλεπόμενων με αυτές που προκύπτουν χρησιμοποιώντας πεπερασμένα στοιχεία οφείλονται σε κατά την εκτίμησή μας στους παρακάτω λόγους

Οι όροι της σειράς που περιγράφει την χωρητικότητα C_{odd} περιορίστηκαν κατά τους υπολογισμούς σε 25. Αναμένεται ότι αυξάνοντας τους όρους που λαμβάνουμε υπόψιν θα βελτιωθεί και η ακρίβεια των αναλυτικών αποτελεσμάτων. Στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται Τυπικός λόγος της C_{odd} για 25(solid) και 50(dot) ορους προς αυτή για 100 όρους συναρτήσει της θέσης της πλάκας.



Σχ. 64 Τυπικός λόγος της C_{odd} για 25(solid) και 50(dot) ορους προς αυτή για 100 όρους συναρτήσει της θέσης της πλάκας. Αμφότεροι βρίσκονται κοντά στην μονάδα.

Η εκτίμηση της χωρητικότητας των ηλεκτροδίων ως προς την γή έγινε με βάση την υπόθεση ότι η διάταξη μοιάζει με πυκνωτή παραλλήλων πλακών που περιέχει διηλεκτρική πλάκα μεταξύ των οπλισμών. Παρόλο που γενικά όπως άλλωστε φάνηκε και από την σύγκριση των αποτελεσμάτων η υπόθεση πρέπει να ισχύει ικανοποιητικά, ωστόσο μια πιο ακριβής σχέση για τον υπολογισμό της απαιτείται. Η σχέση που χρησιμοποιήσαμε δίνει μία τιμή της χωρητικότητας σταθερή ανεξάρτητα της απόστασης της πλάκας διηλεκτρικού από τα ηλεκτρόδια ενώ στην πράξη λόγω της παραμόρφωσης του πεδίου αναμένεται η πραγματική τιμή να είναι ελαφρώς μικρότερη της αυτής που υπολογίσαμε.

Επίσης με πιο ακριβή προσδιορισμό της τιμής της χωρητικότητας των ηλεκτροδίων ως προς την γή αναμένεται να υπάρχει εξάρτηση στην προκύπτουσα σχέση από την θέση της διηλεκτρικής πλάκας. Αυτό μπορεί να εξηγήσει και την διαφορά στον υπολογισμό της θέσης του σημείου ταύτησης των καμπυλών στα διαγράμματα.

Τέλος όπως αναφέραμε και κατά την ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων λόγω της αλλαγής της θέσης την πλάκας άλλαζε και ο διαμερισμός του χώρου σε πεπερασμένα στοιχεία με αποτέλεσμα η λύση να παρουσιάζει σφάλματα στον υπολογισμό της μεταβολής της αμοιβαίας χωρητικότητας των ηλεκτροδίων.

III.5.2 Συγκριση Θεωρητικών - πειραματικών δεδομένων

Ενώ και τα πειραματικά αποτελέσματα εμφανίζουν αμοιβαία χωρητικότητα μικρότερη από αυτή του αέρα σε μεγάλη απόσταση της πλάκας από τον αισθητήρα η μεταβολή της χωρητικότητας τείνει στο μηδέν.

Αυτό οφείλεται στις πεπερασμένες αδιαστάσεις του πραγματικού αισθητήρα. Στο σημείο όπου μεγιστοποιείται η απόκριση η ευασθησία ως προς την θέση του προϊόντος γίνεται μηδενική και αποτελεί μια βέλτιστη θέση για το προϊόν.

Καθώς αυξάνει ο αριθμός επάλληλων ηλεκτροδίων του αισθητήρα βλέπουμε πιο ομαλή συμπεριφορά που προσεγγίζει καλύτερα όπως άλλωστε αναμενόταν τα θεωρητικά αποτελέσματα.

III.5.3 Εξαγωγή κανόνων σχεδίασης (Design Rules)

Στις προηγούμενες παραγράφους παρουσιάσαμε αποτελέσματα που προέκυψαν, θεωρητικά, με χρήση πεπερασμένων στοιχείων και πειραματικές μετρήσεις. Σε όλα η γενική μορφή της αποκρίσης του αισθητήρα ήταν παρόμοια. Η όποια διαφοροποίηση των πειραματικών αποτελεσμάτων οφείλονταν όπως σχολιάσαμε στις πεπερασμένες διαστάσεις του πραγματικού αισθητήρα ενώ για την ανάλυση και μοντελοποίηση υποθέσαμε άπειρο μήκος ηλεκτροδίων και αριθμό ηλεκτροδίων. Έτσι οι αποκλίσεις

του ηλεκτρικού πεδίου στην περίμετρο του αισθητήρα δεν μπορούν να αμεληθούν. Στους κανόνες σχεδίασης που ακολουθούν θα αγνοήσουμε την επίδραση αυτών των αποκλίσεων.

Σε σχεδόν όλα τα αποτελέσματα η βασική μονάδα μέτρησης ήταν το βήμα των ηλεκτροδίων ώστε να μπορούν να συγκριθούν οι επιδόσεις αισθητήρων με δεδομένες εξωτερικές διαστάσεις.

Από την ανάλυση προκύπτει ότι οι αισθητήρας χωρητικότητας της γενικής μορφής που μελετήσαμε παρουσιάζουν δύο κύριες περιοχές στην αποκρίσή τους με τελείως διαφορετική συμπεριφορά στην κάθε μία. Οι δύο περιοχές διακρίνονται από την σχετική θέση του διηλεκτρικού υλικού προς μέτρηση ως προς τα ηλεκτρόδια του αισθητήρα.

Η πρώτη περιοχή χαρακτηρίζεται από το διηλεκτρικό υλικό που μετρά ο αισθητήρας να βρίσκεται πολύ κοντά στα ηλεκτρόδια. Στην περιοχή αυτή η χωρητικότητα αυξάνει εκθετικά καθώς το υλικό πλησιάζει τα ηλεκτρόδια. Η ευαισθησία του αισθητήρα είναι μεγάλη σε αλλαγές της θέσης του πάχους και της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς του υλικού. Το διάστημα αποστάσεων που καταλαμβάνει η περιοχή αυτή είναι κλάσμα του βήματος των ηλεκτροδίων του αισθητήρα όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα μεταβολής της χωρητικότητας συναρτήσει της θέσης του διηλεκτρικού. Άρα πρέπει το υλικό να βρίσκεται πολύ κοντά στα ηλεκτρόδια.

Για μεγαλύτερες αποστάσεις του διηλεκτρικού υλικού η απόκριση χαρακτηρίζεται από μία μεταβατική ζώνη όπου οι παραμετρικές καμπύλες των διαγραμμάτων διασταυρώνονται και κατόπιν γίνονται παράλληλες μεταξύ τους και σχεδόν ανεξάρτητες της θέσης του διηλεκτρικού υλικού ενώ η μεταβολή αλλάζει πρόσημο και γίνεται αρνητική. Εδώ εντοπίζεται η δεύτερη κύρια περιοχή απόκρισης του αισθητήρα.

Στην δεύτερη περιοχή η απόσταση μεταξύ των παραμετρικών καμπύλων για διαφορετικές τιμές της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς του υλικού μεγαλώνει για μικρότερα διάκενα μεταξύ των ηλεκτροδίων και μεγαλύτερα πάχη του υλικού. Οι καμπύλες είναι πρακτικά ανεξάρτητες από την θέση του διηλεκτρικού

Η περιοχή αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς η ευαισθησία της εξόδου του συστήματος ως προς την θέση του διηλεκτρικού υλικού που μετρά ο αισθητήρας είναι μηδενική. Άρα για δεδομένο πλάτος και βήμα ηλεκτροδίων του αισθητήρα η έξοδος του συστήματος εξαρτάται μόνο από το πάχος και την διηλεκτρική σταθερά του υλικού. Παρόλο που η μεταβολή της χωρητικότητας είναι σαφώς μικρότερη από ότι στην πρώτη περιοχή αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα καθώς όπως έχουμε ήδη πεί σε προηγούμενες παραγράφους τα σύγχρονα ηλεκτρονικά επιτρέπουν την μέτρηση με ακρίβεια πολύ μικρών μεταβολών χωρητικότητας.

Εάν λοιπόν το πρόβλημα παρουσιάζει μεταβολές στο πάχος και την θέση του διηλεκτρικού υλικού που μετράμε τότε η λειτουργία του αισθητήρα στην πρώτη περιοχή είναι σαφώς αναξιόπιστη. Αντίθετα στην δεύτερη περιοχή η θέση του υλικού επηρεάζει ελάχιστα την έξοδο και το σύστημα δίνει αξιόπιστες μετρήσεις. Στην σχεδίαση του συστήματος πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψιν η θέση της μεταβατικής περιοχής όπου ταυτίζονται οι καμπύλες απόκρισης του συστήματος. Η απόσταση του αισθητήρα πρέπει υλικού πρέπει να είναι τέτοια ώστε ο αισθητήρας να εργάζεται αποκλειστικά εντός της πρώτης ή δεύτερης περιοχής.

Εξετάζοντας την επίδραση της θέσης του επιπέδου γείωσης από τα αντίστοιχα θεωρητικά αποτελέσματα βλέπουμε ότι η θέση του επηρεάζει σημαντικά όχι τόσο την μορφή των καμπυλών αλλά κυρίως την απόσταση μεταξύ τους ιδιαίτερα στην δεύτερη περιοχή. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η ύπαρξη στην γραμμή παραγωγής μεταλλικών αντικειμένων μπροστά από τον αισθητήρα είναι καθοριστική για τις μετρούμενες μεταβολές. Η σχετική τους θέση ως προς τον αισθητήρα πρέπει να μένει όσο το δυνατόν πιο σταθερή αλλιώς αναμένονται σημαντικά σφάλματα μέτρησης.

IV. Κάμερα Χωρητικότητας

IV.1 Παρουσίαση

IV.1.1 Το πρόβλημα

Όπως έχουμε αναφέρει ήδη όταν παρουσιάσαμε την μεθοδο η ECT βρίσκει ποικίλες χρήσεις στην βιομηχανία για την απεικόνιση διεργασιών. Από την παρουσίαση αυτή δύο κύρια συμπεράσματα ήταν. Πρώτον ο αριθμός ηλεκτροδίων του αισθητήρα χωρητικότητας που χρησιμοποιούν τα υπάρχοντα συστήματα είναι περιορισμένος άρα και οι διαθέσιμες ανεξάρτητες μετρήσεις χωρητικότητας συνεπώς η ποιότητα της λαμβανόμενης εικόνας μετά από την ανακατασκευή από τις μετρήσεις χωρητικότητας είναι εξαιρετικά φτωχή. Η εξίσωση που περιγράφει την σχέση μεταξύ χωρητικότητας και κατανομής διηλεκτρικών σταθερών έχει ασθενή αντίστροφη λύση γεγονός που καθιστά την όποια λύση εξαιρετικά ευαίσθητη σε σφάλματα μέτρησης χωρητικότητας.

Για την κατασκευή ενός συστήματος με πολλά pixels απεικόνισης απαιτείται αύξηση του αριθμού των ηλεκτροδίων του αισθητήρα χωρητικότητας χωρίς ωστόσο να μειώνεται η ακρίβεια μέτρησης. Επιπλέον πρέπει το βασικό κύκλωμα μέτρησης να είναι εξαιρετικά απλό άρα και φθηνό. Αυτό θα επιτρέψει την ευκολή ολοκλήρωση σε ψηφίδα πυριτίου και το συνολικό κόστος του τελικού συστήματος να παραμένει σε λογικά όρια.

Το κύκλωμα επιλογής της χωρητικότητας που μετράμε, από το σύνολο των δυνατών συνδιασμών που επιτρέπει η διάταξη ηλεκτροδίων του ενός τέτοιου αισθητήρα θα πρέπει να επιτρέπει την γρήγορη μεταγωγή με απλό τρόπο. Έτσι ο χρόνος που θα απαιτείται για την ανάγνωση όλων των διαθέσιμων χωρητικοτήτων θα είναι μικρός. Ακόμη αυτό σημαίνει ότι η σταθερά χρόνου απόκρισης του κυκλώματος μέτρησης θα πρέπει να είναι αρκετά μικρή ώστε να προλαβαίνει η έξοδος του να φτάσει στην τελική τιμή στον περιορισμένο χρόνο μεταγωγής.

Στόχος μας είναι η σχεδίαση ενός συστήματος με δυνατότητα ολοκλήρωσης σε ψηφίδα πυριτίου που θα ικανοποιεί τις παραπάνω απαιτήσεις και θα είναι εύκολα και φθηνά υλοποιήσιμο για επίπεδη γεωμετρία ηλεκτροδίων. Επιπλέον θα ήταν δυνατόν

οι ίδιες βασικές αρχές της σχεδίασης του να εφαρμοστούν και σε κυλινδρικές γεωμετρίες που αφορούν την πλειοψηφία σήμερα, συστημάτων ECT.

IV.1.2 Επίπεδες γεωμετρίες και ολοκλήρωση

Για την ολοκλήρωση συστημάτων αισθητήρων χωρητικότητας πάνω σε πυρίτιο υπάρχουν πάρα πολλές αναφορές. Για παράδειγμα στην αναφορά [8] υπάρχει ολόκληρος πίνακας με σχετικές δημοσιεύσεις. Αισθητήρες χωρητικότητας χρησιμοποιούνται ως βασικά στοιχεία για την μέτρηση μετατόπισης, πίεσης και επιτάχυνσης σε αντίστοιχες εφαρμογές ολοκληρωμένων μικροσυστημάτων. Θα περιοριστούμε εδώ όμως μόνο σε βασικές παρατηρήσεις από ολοκληρωμένες εφαρμογές για «απεικόνιση» με χρήση ηλεκτροστατικού πεδίου

Η χρήση επιπέδων ηλεκτροδίων σε τετράγωνη γεωμετρία [50] έχει αναφερθεί στην ECT όπως και κάποια πλεονεκτήματα της ολοκλήρωσης σε πυρίτιο[51]. Από προκαταρκτική έρευνα για επίπεδη γεωμετρία [52] καταδείχθηκε ότι λόγω της τρισδιάστατης κατανομής του πεδίου η ευασθησία των αισθητήρων με ομοεπίπεδα ηλεκτρόδια μειώνεται ακόμη περισσότερο.

Η χωρητικότητα μεταξύ ολοκληρωμένων πάνω σε πυρίτιο ηλεκτροδίων είναι της τάξης μερικών δεκάδων το πολύ fF , [53],[54]. Απαιτούνται επομένως, για αξιόπιστες μέτρησεις τροποποιημένα κυκλώματα μεγαλύτερης ακρίβειας μέτρησης .

Ισως την πλέον εντυπωσιακή εφαρμογή ολοκληρωμένων σε ψηφίδα, αισθητήρων χωρητικότητας για «απεικόνιση» αποτελούν οι αισθητήρες δακτυλικών αποτυπωμάτων. [55],[56]. Παρόλλο που παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα εναντι αντίστοιχων οπτικών γενικά θεωρούνται ευθραυστοι..

Σε όλες σχεδόν τις υλοποιήσεις τα αντίστοιχα ηλεκτρονικά τοποθετούνται κάτω από από τα ηλεκτρόδια. Αυτό περιορίζει την δυνατότητα περαταίτω μείωσης της απόστασης μεταξύ των θέσεων μέτρησης χωρητικότητας.

IV.2 Βασικές Αρχές - 'Διαφορική' Χωρητικότητα

IV.2.1 Αρχή Λειτουργίας

Από την ενότητα που αναφέρθηκε σε κυκλώματα μέτρησης χωρητικότητας δύο κυκλώματα διαθέτουν τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά ακρίβειας και αναισθησίας σε παρεμβολές. Αυτά είναι και τα κυκλώματα που χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά σε συστήματα ECT. Το πρώτο είναι το κύκλωμα φόρτισης εκφόρτισης που παρόλο που είναι φθινό πάσχει από προβλήματα έγχυσης φορτίου κατά την μεταγωγή των διακοπών CMOS. Επιπλέον λόγω της ενίσχυσης DC οι τάσεις αποκλίσης των τελεστικών ενισχυτών ενισχύονται και εμφανίζονται στην έξοδο ως σφάλμα μετρησης.

Το δεύτερο κύκλωμα ακριβότερο σε κόστος και πιο πολύπλοκο από το πρώτο επιτρέπει μεγαλύτερη ακρίβεια μετρησης από το πρώτο καθώς λόγω της ενίσχυσης AC δεν επηρεάζεται από τις τάσεις απόκλισης των ενισχυτών. Λόγω της πολυπλοκότητας του κυκλώματος αυτού η ολοκλήρωσή του απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή. Επιπλέον το κόστος του είναι απαγορευτικό για υλοποίηση σε μεγάλο αριθμό ηλεκτροδίων. Τέλος επειδή για την αποδιαμόρφωση χρησιμοποιεί ένα κατωπερατό φίλτρο χαμηλής συχνότητας ο χρόνος απόκρισης του είναι αργός.

Στην σύγχρονη βιβλιογραφία των αισθητήρων χωρητικότητας πολλά κυκλώματα με επιτυχία χρησιμοποιούν ένα πυκνωτή αναφοράς παρόμοιας κατασκευής με τον πυκνωτή μέτρησης. Εφόσον και οι δύο βρίσκονται στον ίδιο χώρο υφίστανται τις ίδιες επιδράσεις και η διαφορά των τιμών τους παραμένει αμετάβλητη σε αλλαγές για παράδειγμα της υγρασίας του αέρα και της θερμοκρασίας.

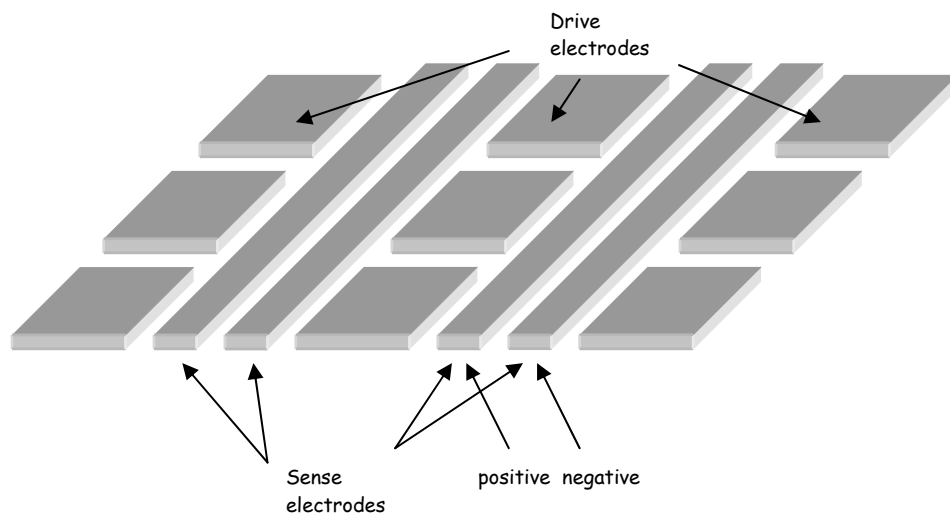
Είναι ευρέως γνωστό ότι συνεστραμένα ζεύγη καλωδίων ή ακόμη και καλώδια με μικρό εμβαδό κλειστού βρόγχου μεταξύ τους παρουσιάζουν αρκετά καλή συμπεριφορά σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Γι αυτό άλλωστε και χρησιμοποιούνται ευρέως στα αναλογικά κυκλώματα και τα τηλεπικοινωνιακά καλώδια.

Ενας αισθητήρας χωρητικότητας που θα συνδύαζε χαρακτηριστικά από αμφότερες τις δύο παραπάνω παρατηρήσεις θα είχε συγκριτικά βελτιωμένα χαρακτηριστικά. Μία τέτοια διάταξη ηλεκτροδίων που δανείζεται στοιχεία και από τις δύο παραπάνω παρατηρήσεις φαίνεται στο Σχ. 65 . Πριν όμως αναλύσουμε πως ακριβώς η παρατιθέμενη διάταξη επιτυγχάνει αυτό θα προβούμε σε μία σύντομη περιγραφή της διάταξης του αισθητήρα και των ηλεκτρονικών που τον συνοδεύουν

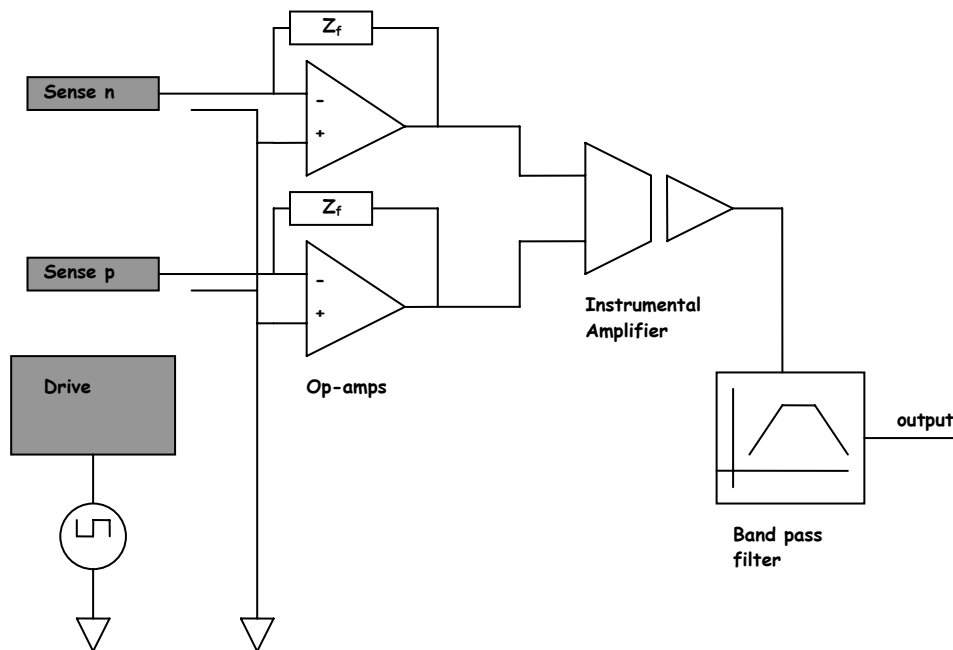
Όπως βλέπουμε αποτελείται από ζεύγη λεπτών ηλεκτροδίων που ονομάζουμε ηλεκτρόδια μέτρησης (**Sense**) Οι αγωγοί κάθε τέτοιου ζεύγους βρίσκονται σε στενή επαφή και διατρέχουν όλο το πλάτος του αισθητήρα. Τα ζεύγη περιβάλλονται από

μεγάλα τετράγωνα ηλεκτρόδια που ονομάζουμε ηλεκτρόδια οδήγησης (**Drive**) Το ηλεκτρόδιο κάθε ζευγους που βρίσκεται πιο κοντά σε ένα ηλεκτρόδιο οδήγησης το ονομάζουμε **Sp** ως προς αυτό ενώ το πιο απομακρυσμένο **Sn**. Η δομή επαναλαμβάνεται καταμήκος του αισθητήρα ώστε να δημιουργηθεί μια διαδιάστατη διάταξη.

Η στοιχειώδης μονάδα του αισθητήρα αποτελείται από την περιοχή ενός ηλεκτροδίου **D** και ενός γειτονικού ζεύγος **S**. Εάν εφαρμόσουμε μία εναλλασόμενη τάση διέγερσης σε ένα ηλεκτρόδιο οδήγησης κρατώντας γειωμένα τα γειτονικά ζεύγη ηλεκτροδίων μέτρησης άνισου πλάτους ρεύματα θα περάσουν μέσα απο τα ηλεκτόδια των ζευγών μέτρησης. Αυτό συμβαίνει διότι οι αμοιβαίες χωρητικότητες μεταξύ του ηλεκτροδίου οδήγησης και των ηλεκτροδίων μέτρησης είναι άνισες και όσο πιο κοντά βρίσκονται τόσο μεγαλύτερη αυτή. Επιπλέον εάν υποθέσουμε ότι το διηλεκτρικό υλικό που καλύπτει τον χώρο υφίσταται μία ομοιόμοφη αλλαγή στην τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς η αλλαγή στα ρεύματα θα είναι αναλογική όπως θα δείξουμε παρακάτω.



Σχ. 65 Προτεινόμενη διάταξη ηλεκτροδίων του αισθητήρα.



Σχ. 66 Μπλοκ διάγραμμα του προτεινόμενου κυκλώματος μέτρησης χωρητικότητας για κάμερα χωρητικότητας

Στο Σχ. 66 φαίνεται το κύκλωμα που θα συνεργάζεται με τον αισθητήρα για την μέτρηση των δημιουργούμενων χωρητικοτήτων. Βασικά συνίσταται από ζεύγος ενισχυτών διαγωγιμότητας που ενισχύουν τα ρεύματα διαρέουν τα ηλεκτρόδια του ζεύγους μέτρησης. Τα σήματα τάσης που προκύπτουν στην έξοδό τους οδηγούνται σε έναν διαφορικό ενισχυτή οπότε λαμβάνεται η διαφορά τους που φιλτράρεται από ένα ζωνοπερατό φίλτρο για να απομαρυνθούν οι όποιες ανεπιθύμητες συχνότητες στην έξοδο του συστήματος. Αρα η τελική έξοδος είναι ανάλογη της διαφοράς των ρευμάτων που διαρέουν τα ηλεκτρόδια κάθε ζεύγους μέτρησης.

IV.2.2 Μαθηματική περιγραφή

Με βάση την αντίστοιχη παράγραφο για την μαθηματική περιγραφή του αισθητήρα «περιεχομένου ύδατος» εύκολα προκύπτει ότι η έξοδος του συστήματος μέτρησης στο μπλοκ διάγραμμα του Σχ. 66 γράφεται για ημιτονοειδή διέγερση

$$V_o(t) = A \cdot G \cdot C_{diff} \cdot Z_f \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (105)$$

Όπου A το πλάτος της διέγερσης που εφαρμόζεται στο ηλεκτρόδιο οδήγησης, ω η γωνική συχνότητα της διέγερσης, C_{diff} η διαφορά των αμοιβαίων χωρητικότητων των ηλεκτροδίων μέτρησης ως προς το εκάστοτε ηλεκτρόδιο οδήγησης, Z_f η

σύνθετη αντίσταση ανάδρασης των τελεστικών και G το συνολικό κέρδος του διαφορικού ενισχυτή.

IV.2.3 Πλεονεκτήματα

Ο παραπάνω συνδυασμός διάταξης ηλεκτροδίων του αισθητήρα και ηλεκτρικού κυκλώματος μέτρησης επιτυγχάνει μεταξύ άλλων τα ακόλουθα.

- Μείωση ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών
- Επίδρασης απομακρυσμένων αντικειμένων
- Αύξηση της δυναμικής περιοχής του αισθητήρα.
- Δεν απαιτεί κυκλώματα πολυπλεξίας για την μέτρηση.
- Αύξηση διαθέσιμων μετρήσεων χωρητικότητας

Μείωση ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών

Λόγω της διαφορεική δομής του κυκλώματος μέτρησης που χρησιμοποιεί ο αισθητήρας η εξοδος του είναι ανάλογη της διαφοράς των επαγόμενων ρευμάτων πάνω στα δύο ηλεκτρόδια μέτρησης. Οποιαδήποτε παρεμβολή ηλεκτρομαγνητικής φύσης εφόσον η πηγής της βρίσκεται σε ικανή απόσταση απο τα δύο ηλεκτρόδια επηρεάζει αμφότερα στον ίδιο βαθμό. Συνεπώς η διαφορά τους θα είναι μηδενική και δεν θα εμφανίζεται στην έξοδο ή τουλαχιστον θα είναι σαφώς μικρότερη από το μέγεθος που θα επηρέαζε κάθε ηλεκτρόδιο ξεχωριστά. Επιπλέον εφόσον η διαδικασία κατασκευής του αισθητήρα το επιτρέπει μπορούμε να εναλλάσουμε την θέση των ηλεκτροδίων μέτρησης S με βήμα που καθορίζεται από το μήκος καθενός από τα ηλεκτρόδια οδήγησης. Αυτό θα επιφέρει ακόμη καλύτερη συμπεριφορά του αισθητήρα σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Αυτό διότι η διάταξη των ηλεκτροδίων μέτρησης στον χώρο θα μοιάζει ακόμη περισσότερο με συνεστραμμένο ζεύγος.

Επίδραση απομακρυσμένων αντικειμένων.

Οπως έχουμε ήδη πεί κάθε αντικείμενο που γειτονεύει με έναν αισθητήρα μέτρησης χωρητικότητας ανεξάρτητα από την μεταλλική ή την διηλεκτρική φύση του επηρεάζει το ηλεκτροστατικό πεδίου που δημιουργεί αυτός. Αυτό σε πολλούς τύπους αισθητήρων χωρητικότητας το φαινόμενο αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα και μπορεί να αντιμετωπιστεί με κατάλληλη θωράκιση τους.

Στην συγκεκριμένη εφαρμογή είναι αρκετά δύσκολο να θωρακιστεί ο αισθητήρας. Ενας λόγος είναι η σχετικά μεγάλη έκταση που καταλαμβάνει. Επίσης η εκάστοτε πιθανή εφαρμογή του σε βιομηχανικό χώρο μπορεί να επιβάλλει την χρήση του σε

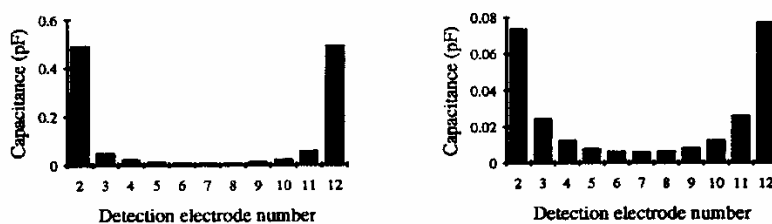
ανοικτό πεδίο. Έτσι ο χώρος πάνω από τα ηλεκτρόδια που βρίσκεται το υλικό που θέλουμε να παρατηρήσουμε δεν θα διαθέτει κατάλληλο κλωβό θωράκισης.

Εστω ένα πιθανό αντικείμενο αρκετά μακριά από τον αισθητήρα. Αυτό μπορεί να είναι μεταλλικής ή διηλεκτρικής φύσεως. Επίσης η θέση του μπορεί να μεταβάλλεται χρονικά. Εάν η απόσταση του είναι αρκετά μακριά από τα δύο ηλεκτρόδια μέτρησης τότε αμφότερα θα επηρεάζονται κατα τον ίδιο τρόπο καθώς από την θέση του αγνώστου αντικειμένου φαίνονται κατα προσέγγιση ακριβώς ίδια. Και σε αυτή την περίπτωση επομένως η διαφορά των επαγόμενων φορτίων λόγω του αγνώστου αντικειμένου, στα δύο ηλεκτρόδια θα είναι πολύ μικρή.

Δυναμική περιοχή λειτουργίας

Ένα από τα προβλήματα που χαρακτηρίζουν τα συστήματα ECT είναι και το μεγάλο εύρος τιμών χωρητικότητας που πρέπει να μετρηθεί με ακρίβεια. Στο Σχ. 67 φαίνεται μία τυπική καμπύλη τιμών αμοιβαίας χωρητικότητας μεταξύ των ηλεκτροδίων ενός ECT συστήματος βάσει της αναφοράς [25]. Το μεγάλο αυτό εύρος είναι ιδιότητα καθαρά της διάταξης των ηλεκτροδίων του αισθητήρα. Όσο πιο μακριά σε απόσταση είναι τα ηλεκτρόδια μεταξύ των οποίων θέλουμε να μετρήσουμε την αμοιβαία χωρητικότητα η τελευταία μειώνεται εκθετικά με την απόστασή τους.

Στο σύστημα μας όμως μετράμε πάντα την διαφορά μεταξύ των αμοιβαίων χωρητικότητων των δύο ηλεκτροδίων μέτρησης ως προς το ηλεκτρόδιο οδήγησης. Επειδή τα πρώτα βρίσκονται κοντά μεταξύ του η διαφορά τους θα είναι πάντα μικρότερη από την απόλυτη τιμή τους. Αρά το μεγάλο εύρος περιορίζεται και η δυναμική περιοχή λειτουργίας του συστήματος βελτιώνεται.



Σχ. 67 Τυπικές χωρητικότητες μεταξύ διαφορετικών ηλεκτροδίων σε ένα σύστημα ECT με η χωρίς διηλεκτρικό υλικό πλήρωσης του χώρου μεταξύ των ηλεκτροδίων.

Δεν απαιτεί κυκλώματα πολυπλεξίας για την μέτρηση

Το κύκλωμα μέτρησης που συνδέεται σε καθένα από τα ζεύγη ηλεκτροδίων μέτρησης S είναι πολύ απλό και μπορεί να υλοποιηθεί μόνο με χρήση τριών τελεστικών ενυσχυτών. Αρα στο τελικό σύστημα μπορούν εύκολα και φθηνά να υλοποιηθούν τόσα κυκλώματα μέτρησης όσα και ζεύγη ηλεκτροδίων μέτρησης. Δεν

απαιτείται δηλαδή πολυπλεξία μεταξύ των ζευγών ηλεκτροδίων μέτρησης και των αντιστοιχών κυκλωμάτων μέτρησης. Επιπλέον εφόσον κάθε ένα από τα ζεύγη ηλεκτροδίων μέτρησης εξυπηρετεί πολύ περισσότερα ζεύγη ηλεκτροδίων οδήγησης ο συνολικός αριθμός των κυκλωμάτων μέτρησης είναι πολύ μικρότερος του συνολικού αριθμού ηλεκτροδίων οδήγησης.

Κάθε ένα από τα ηλεκτρόδια οδήγησης επιτρέπει ανεξάρτητες μετρήσεις χωρητικότητας όσες και ο αριθμός των διαθέσιμων ζευγών ηλεκτροδίων μέτρησης. Η μόνη απαίτηση για το κύκλωμα οδήγησης καθενός από τα ηλεκτρόδια οδήγησης είναι η έξοδος του αντίστοιχου κυκλώματος να συμπεριφέρεται επιλεκτικά είτε ως γείωση ή ως πηγή τάσης χαμηλής αντίστασης εξόδου. Αυτό μπορεί να υλοποιηθεί ευκολα με χρήση δύο διακοπών CMOS ενός για την γείωση και ενός για την σύνδεση με το κοινό για όλα τα ηλεκτρόδια κύκλωμα παραγωγής της τάσης διέγερσης τους.

Αύξηση διαθέσιμων μετρήσεων χωρητικότητας

Εστω δώδεκα ζεύγη ηλεκτροδίων μέτρησης που απαιτούν αντίστοιχα δώδεκα κυκλώματα μέτρησης. Ο αριθμός των κυκλωμάτων αυτών είναι και ένας τυπικός αριθμός ηλεκτροδίων σε ένα σύστημα ECT. Εστω ακόμη ότι κάθε ένα από τα ζεύγη ηλεκτροδίων μέτρησης συνοδεύεται αντίστοιχα από δώδεκα ηλεκτρόδια οδήγησης. Ο συνολικός αριθμός των διαθέσιμων μετρήσεων χωρητικότητας από το σύστημα προκύπτει πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό των ηλεκτροδίων οδήγησης δηλαδή $12 \times 12 = 144$ με τα ζεύγη ηλεκτροδίων μέτρησης δηλαδή 12 συνολικά δηλαδή 1728 ανεξάρτητες μετρήσεις χωρητικότητας για την επίπεδη γεωμετρία.

Αν χρησιμοποιώντας την βασική δομή του αισθητήρα για επίπεδη γεωμετρία κατασκευάζαμε ένα σύστημα ECT σε κυλινδρική γεωμετρία θα είχαμε την διάταξη στο . Εδώ βλέπουμε ότι μόνο ένα ηλεκτρόδιο οδήγησης παρεμβάλεται με κάθε ζεύγος ηλεκτροδίων μέτρησης. Ο συνολικός αριθμός διαθέσιμων μετρήσεων χωρητικότητας θα ήταν $12 \times 12 = 144$.

Το αντίστοιχο σύστημα ECT μας δίνει μόνο 66 ανεξάρτητες μετρήσεις. Παρατηρούμε δηλαδή ότι υπερδιπλασιάσαμε τον αριθμό διαθέσιμων μετρήσεων με μόνο επιπλέον κόστος από κυκλωματική άποψη τα κυκλώματα διακοπών CMOS για την μεταγωγή του σήματος οδήγησης στα ηλεκτρόδια οδήγησης. Επειδή το σήμα οδήγησης δεν επηρεάζεται από τις πιθανές παρασιτικές χωρητικότητες των διακοπών οι διακόπτες αυτοί μπορεί να είναι χαμηλού κόστους.

Εδώ βρίσκεται και μια βασική φιλοσοφία του συστήματος. Για δεδομένο αριθμό κυκλωμάτων μέτρησης που είναι και τα πιο πολύπλοκα συνεπώς και καθορίζουν και το τελικό κόστος του συστήματος αύξηση των διαθέσιμων μετρήσεων με προσθηκη επιπλέον ηλεκτροδίων οδήγησης με πρόσθετο κόστος μόνο τα κυκλώματα μεταγωγής του σήματος οδήγησης σε αυτά.

IV.3 Υλοποίηση

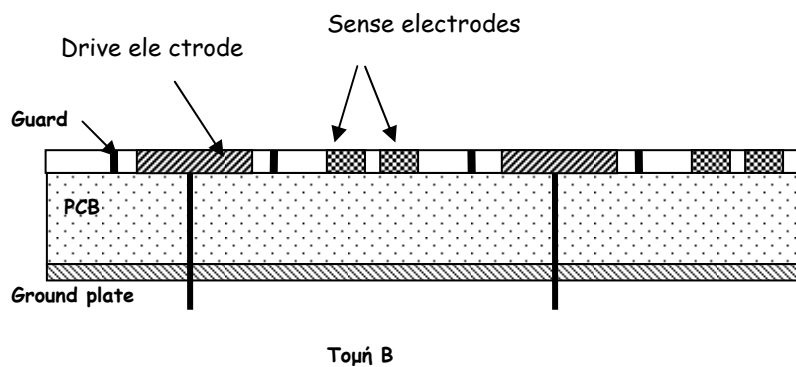
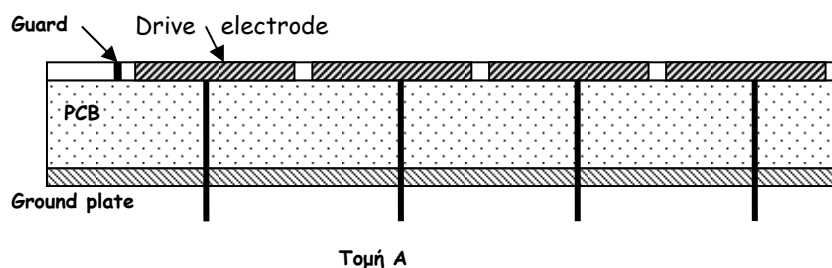
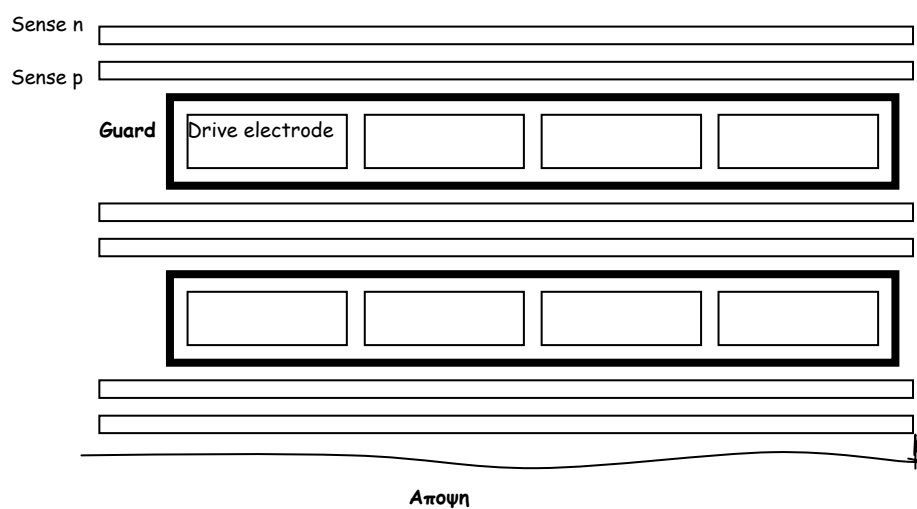
IV.3.1 Κατασκευή αισθητήρα

Στο Σχ. 68 φαίνεται η βασική δομή του αισθητήρα για υλοποίηση πάνω σε πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (PCB). Στο σχήμα φαίνεται η άποψη και η τομή του αισθητήρα. Όπως βλέπουμε αποτελείται από νησίδες χαλκού που χρησιμεύουν ως ηλεκτρόδια οδήγησης. Εκατέρωθεν αυτών βρίσκονται τα ηλεκτόδια μέτρησης. Για να περιορίσουμε την επίδραση πιθανών ρευμάτων διαρροής μεταξύ των ηλεκτροδίων οδήγησης και των ηλεκτροδίων μέτρησης τα πρώτα περιβάλλονται από ένα δακτύλιο συλλογής τους που είναι γειωμένος. Από την τομή φαίνεται ότι η πίσω πλευρά του αισθητήρα αποτελείται από ένα ηλεκτρόδιο γείωσης που καλύπτει όλη την επιφάνειά του και απομονώνει το ηλεκτρικό πεδίο του από την πίσω πλευρά. Μέσω οπών καθένα από τα ηλεκτρόδια οδήγησης συνδέεται με το κύκλωμα οδήγησης. Η σύνδεση των ζευγών ηλεκτροδίων μέτρησης γίνεται στην περίμετρο του αισθητήρα.

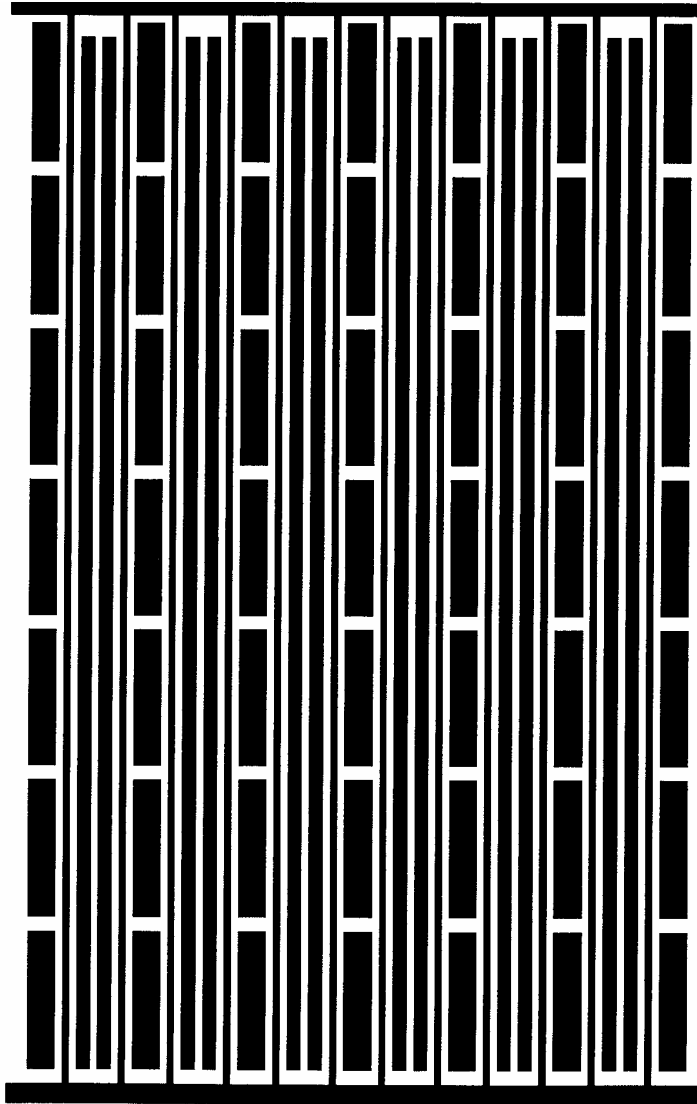
Η κατασκευή του αισθητήρα που προτείνεται είναι πλήρως συμβατή με την τεχνολογία τυπωμένων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί πάνω σε πολυστρωματικές πλακέτες για χαμηλό κόστος. Επίσης ο αισθητήρας μπορεί ευκολα να υλοποιηθεί σε ποικίλα υποστρώματα ή ακόμη και σε ψηφίδα πυριτίου με χρήση υπάρχουσας τεχνολογίας.

Ο αισθητήρας αποτελείται από τρία βασικά επίπεδα επιμετάλλωσης. Το πρώτο ορίζει την γεωμετρία των ηλεκτροδίων οδήγησης και μέτρησης. 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 ηλεκτόδια οδήγησης.

Για την αξιολόγηση του αισθητήρα κατασκευάστηκαν δύο πλακέτες τυπωμένου κυκλώματος. Η πρώτη περιελάμβανε διαφορετικές διαστάσεις ηλεκτροδίων οδήγησης και μέτρησης. Επιπλέον κατασκευάστηκε μία τελική μορφή του αισθητήρα για αξιολόγηση των δυνατοτήτων του στην απεικόνιση του οποίου η γεωμετρία προέκυψε από την μελέτη των πειραματικών αποτελέσματα που έδωσε η πρώτη κατασκευή. Αυτή φαίνεται στο Σχ. 69 .



Σχ. 68 Βασική δομή του αισθητήρα για υλοποίηση πάνω σε πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (PCB). Αποψη και τομές.

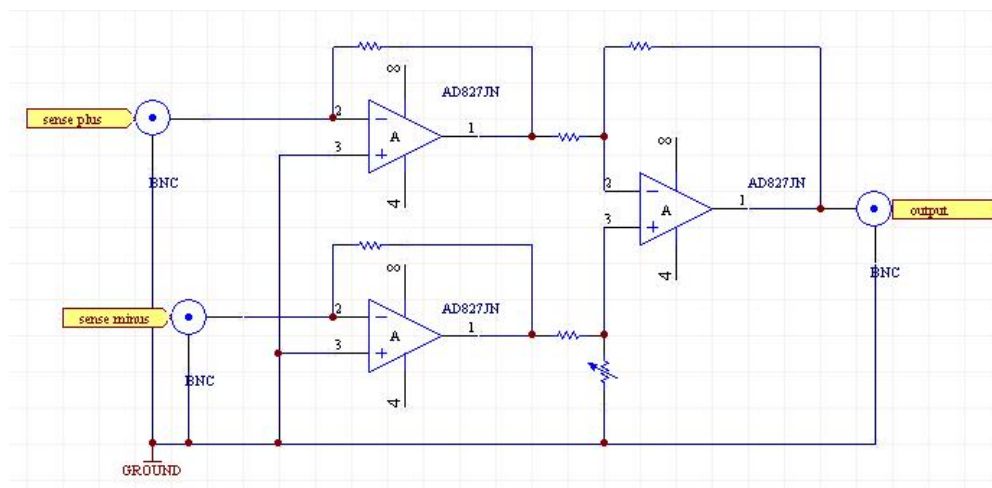


Σχ. 69 Η γεωμετρία του τελικού αισθητήρα σε κλίμακα 1:1.

IV.3.2 Κατασκευή κυκλώματος

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η υλοποίηση του κυκλώματος μέτρησης χωρητικότητας από το μπλόκ διάγραμμα του Σχ. 66 . Όπως βλέπουμε ο τελεστικός ενισχυτής AD827 χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση τόσο των δύο ενισχυτών διαντίστασης στην είσοδο αλλά και του διαφορικού σταδίου.

Ομοαξονικά καλώδια χρησιμοποιήθηκαν για την σύνδεση της εισόδου των δύο ενισχυτών με το αντίστοιχο ζεύγος ηλεκτροδίων μέτρησης του αισθητήρα. Η έξοδος του διαφορικού ενισχυτή οδηγήθηκε σε ψηφιακό παλμογράφο.



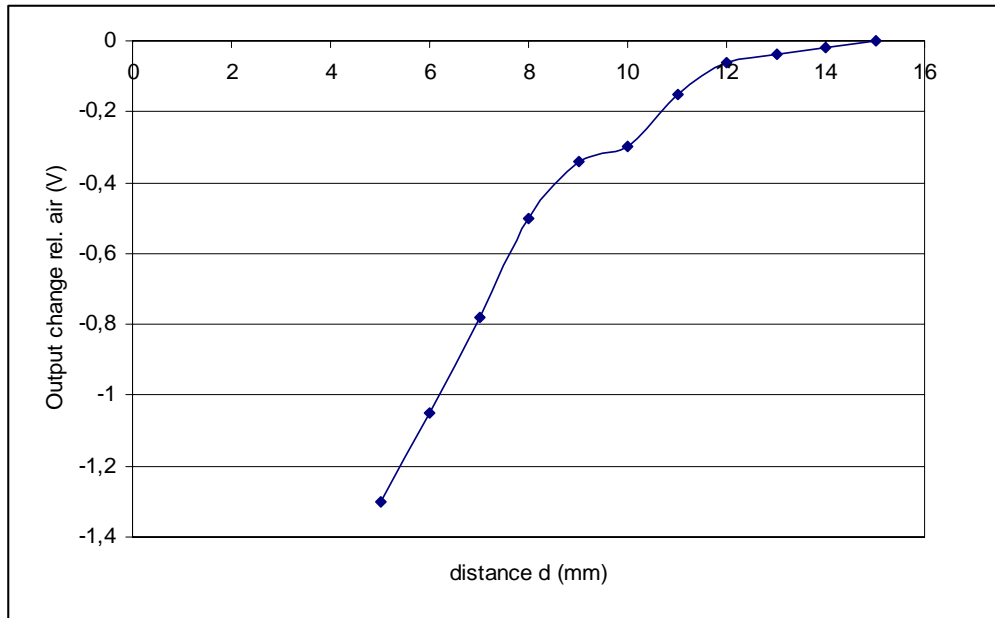
Σχ. 70 Η υλοποίηση του κυκλώματος μέτρησης με διακριτά στοιχεία.

IV.3.3 Πειραματικά αποτελέσματα

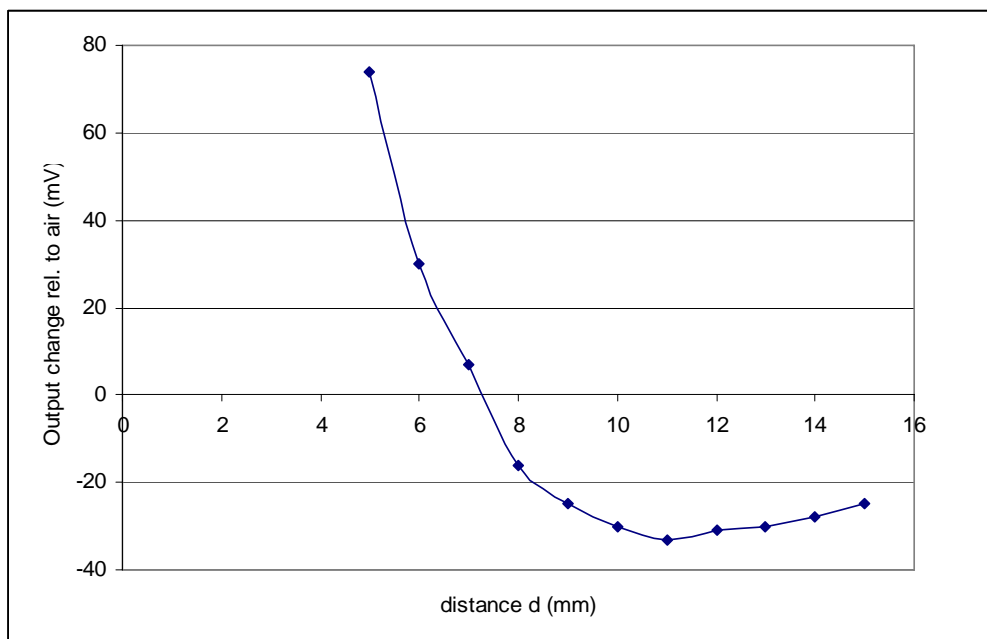
Για την διεξαγωγή των μετρήσεων χρησιμοποιήσαμε τον τελικό αισθητήρα του οποίου οι διαστάσεις μπορούν να μετρηθούν απευθείας στο Σχ. 69 εφόσον είναι σε κλίμακα 1:1. Ο αισθητήρας κατασκευάστηκε πάνω σε κοινή πλακέτα τυπωμένου FR-4. Ως διηλεκτρικό χρησιμοποιήσαμε πλάκα από Teflon με $\epsilon_r \approx 2.1$ και πάχος $12mm$. Το εμβαδόν της πλάκας ήταν αρκετά μεγάλο ώστε να καλύπτει πλήρως τον αισθητήρα.

Οι μετρήσεις γίνονταν στο κέντρο του αισθητήρα, δηλαδή στα μεσαία ηλεκτρόδια οδήγησης και μέτρησης. Για να μελετήσουμε την επίδραση της απόστασης μεταξύ ηλεκτροδίων μέτρησης και οδήγησης, διαλέγαμε διαρκώς πιο απομακρυσμένα ηλεκτρόδια οδήγησης για κάθε ομάδα μετρήσεων από το ζεύγος των ηλεκτροδίων μέτρησης που παρέμεινε το ίδιο σε όλες τις μετρήσεις που πραγματοποιήσαμε. Στα επόμενα σχήματα δίνεται γραφικά η μεταβολή της εξόδου του συστήματος από την τιμή της απουσία διηλεκτικού. Ανεξαρτητη μεταβλητή σε όλες τις γραφικές παραστάσεις είναι η απόσταση της πλάκας από Teflon πάνω από τον αισθητήρα. Κάθε μία γραφική παρασάση αφορά όλο και πιο απομακρυσμένο ηλεκτρόδιο οδήγησης από το ζεύγος ηλεκτροδίων μέτρησης με πρώτο (#1) το πιο κοντινό.

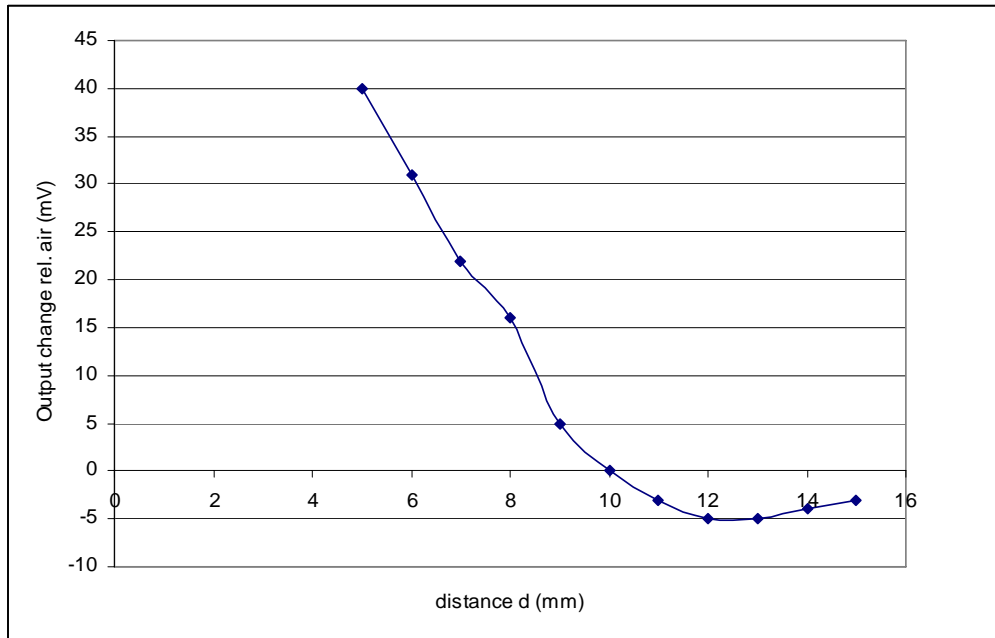
Τέλος, όλα τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια πλην του εκάστοτε ηλεκτροδίου οδήγησης ήταν γειωμένα.



Σχ. 71 Μεταβολή της εξόδου από την τιμή χωρίς διηλεκτρικό συναρτήσει της θέσης της διηλεκτρικής πλάκας για οδήγηση από το #1 ηλεκτρόδιο .



Σχ. 72 Μεταβολή της εξόδου από την τιμή χωρίς διηλεκτρικό συναρτήσει της θέσης της διηλεκτρικής πλάκας οδήγηση από το #2 ηλεκτρόδιο.

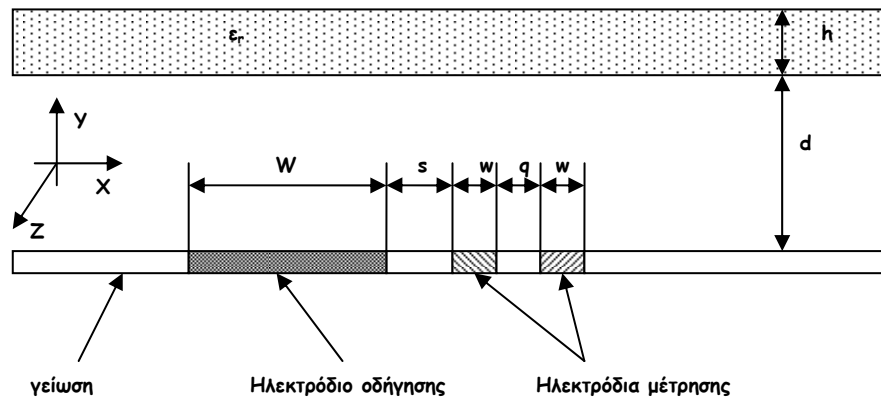


Σχ. 73 Μεταβολή της εξόδου από την τιμή χωρίς διηλεκτρικό συναρτήσει της θέσης της διηλεκτρικής πλάκας για οδήγηση από το #3 ηλεκτρόδιο.

IV.4 Θεωρητική μελέτη

IV.4.1 Αναλυτικές σχέσεις

Για την μαθηματική περιγραφή του αισθητήρα θα βασιστούμε στο ολοκλήρωμα Poisson. Η γεωμετρία που θα αναλύσουμε είναι αυτή που δίνεται στο Σχ. 74 . Οπως βλέπουμε θεωρούμε ότι έχουμε ένα άπειρο επίπεδο γής πάνω από το οποίο βρίσκεται μία διηλεκτρική πλάκα πάχους h και σε απόσταση d από το επίπεδο. Ένα μικρό κομμάτι του επιπέδου γείωσης καταλαμβάνουν το ηλεκτρόδιο οδήγησης πλάτους W και σε απόσταση s και με πλάτος w βρίσκονται τα δύο ηλεκτρόδια μέτρησης που διαχωρίζονται από μία λωρίδα γής πλάτους q . Το δυναμικό του ηλεκτροδίου οδήγησης είναι V_o ενώ τα δύο ηλεκτρόδια μέτρησης θεωρούνται γειωμένα. Η γεωμετρία αυτή επεκτείνεται στο άπειρο κατά μήκος του άξονα Z



Σχ. 74 Γεωμετρία για την μοντελοποίηση του αισθητήρα «κάμερας χωρητικότητας».

Για να μπορεί να εφαρμοστεί το ολοκλήρωμα Poisson θεωρούμε ότι η διηλεκτρική πλάκα καλύπτει όλο τον χώρο άνω του επιπέδου του αισθητήρα αρα όλος ο χώρος θα έχει ομοιόμορφη διηλεκτρική σταθερά ϵ_r . Παρόλο που στην πράξη ο αισθητήρας θα καλύπτεται από πεπερασμένων διαστάσεων διηλεκτρικό υλικό με ανομοιογενή κατανομή σχετική διηλεκτρικής σταθεράς η ανάλυση που θα ακολουθήσει με βάση το ολοκλήρωμα Poisson θα μας επιτρέψει να έχουμε μία πρώτη εικόνα της συμπεριφοράς του αισθητήρα για διαφορετικές γεωμετρίες των ηλεκτροδίων που τον απαρτίζουν.

Από το ολοκλήρωμα Poisson εφόσον είναι γνωστή τη τιμή του δυναμικού σε όλο το μήκος του άξονα X θα έχουμε για την τιμή του δυναμικού σε όλο τον χώρο $V(x, y)$ άνω του επιπέδου του αισθητήρα θα είναι βάση της

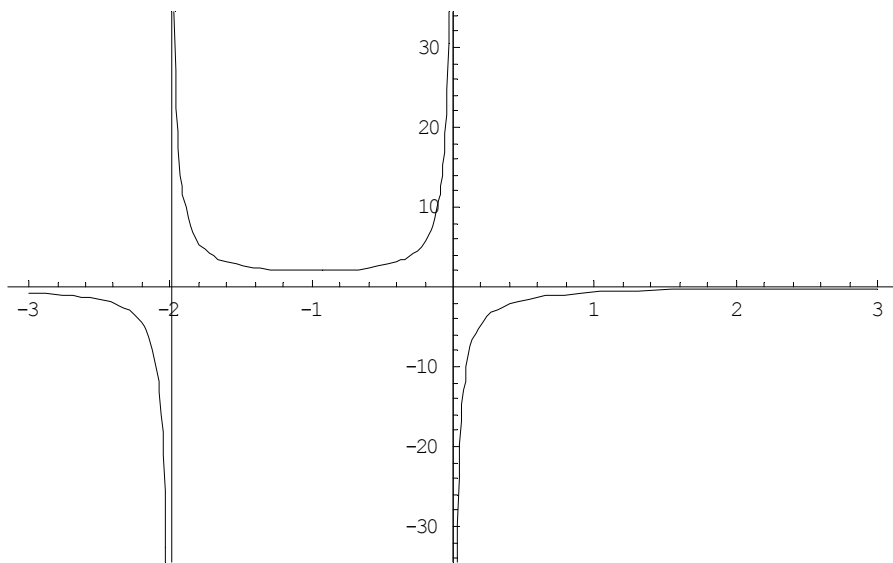
$$\begin{aligned}
 V(x, y) &= \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{y}{(x-t)^2 + y^2} V(t, 0) dt = \\
 &= \frac{V_o}{\pi} \int_{-W}^0 \frac{y}{(x-t)^2 + y^2} dt = \quad (106) \\
 &= \frac{V_o}{\pi} \left(\text{ArcTan} \left(\frac{W+x}{y} \right) - \text{ArcTan} \left(\frac{x}{y} \right) \right)
 \end{aligned}$$

όπου θεωρούμε ότι το ηλεκτρόδιο οδήγησης που είναι και το μόνο που φέρει δυναμικό καταλαμβάνει το διάστημα $(-W, 0)$ πάνω στον άξονα X.

Η συγκέντρωση επιφανειακού φορτίου σε κάθε σημείο του επιπέδου γείωσης θα δίνεται από την επόμενη σχέση

$$\begin{aligned}
\sigma(x) &= -\varepsilon_r \lim_{y \rightarrow 0} \left(\frac{\partial V(x, y)}{\partial y} \right) = \\
&= -\varepsilon_r \lim_{y \rightarrow 0} \left(\frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{V_o}{\pi} \left(\text{ArcTan} \left(\frac{W+x}{y} \right) - \text{ArcTan} \left(\frac{x}{y} \right) \right) \right] \right) = \\
&= -\varepsilon_r \frac{V_o W}{\pi x(W+x)}
\end{aligned} \tag{107}$$

Στο Σχ. 75 φαίνεται μία τυπική κατανομή φορτίου όπως προκύπτει από την προηγούμενη εξίσωση.



Σχ. 75 Τυπική κατανομή επιφανειακού φορτίου όπως προκύπτει από την Εξ. 111.

Για τον υπολογισμό τώρα της χωρητικότητας πάντα ανά μονάδα μήκους μεταξύ ενός τμήματος του άξονα X που ορίζεται από το διάστημα (a,b) και του ηλεκτροδίου οδήγησης αρκεί να ολοκληρώσουμε την προηγούμενη έκφραση οπότε έχουμε

$$\begin{aligned}
C_{a,b} &= \frac{-Q_{ab}}{V_o} = \frac{-\int_a^b \sigma(x) dx}{V_o} = \frac{-\int_a^b -\varepsilon_r \frac{V_o W}{\pi x(W+x)} dx}{V_o} = \\
&= \frac{\varepsilon_r}{\pi} \left[\text{Log} \frac{b}{a} - \text{Log} \frac{W+b}{W+a} \right]
\end{aligned} \tag{108}$$

Καταλήξαμε σε μία απλή σχέση για την χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους μεταξύ του ηλεκτροδίου οδήγησης και τυχαίου τμήματος του άξονα X. Παρατηρούμε όπως άλλωστε αναμενόταν ότι η χωρητικότητα αυτή εξαρτάται μόνο από λόγους

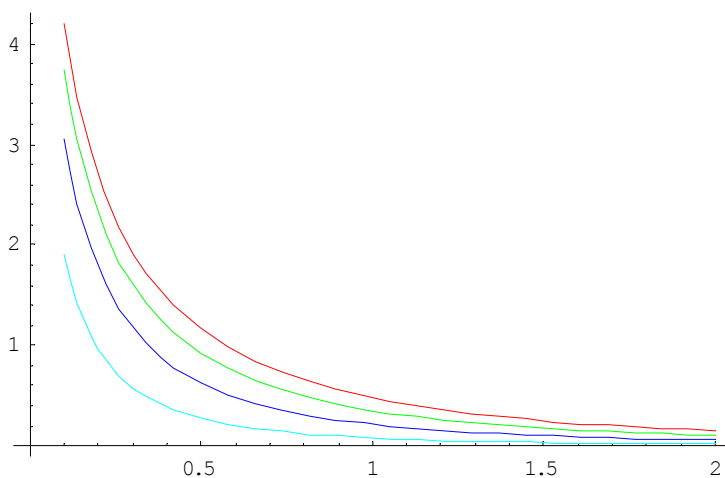
αποστάσεων. Άρα είναι ανεξάρτητη της μονάδας μέτρησης μήκους και εξαρτάται μόνο από την γεωμετρία ηλεκτροδίων που επιλέγουμε.

Με βάση την γεωμετρία του Σχ. 74 και για απλότητα θέτοντας $q = 0$ έχουμε την παρακάτω σχέση για την διαφορική χωρητικότητα C_{diff} μεταξύ των ηλεκτροδίων μέτρησης για δεδομένο ηλεκτρόδιο οδήγησης και σε απόσταση s από αυτό

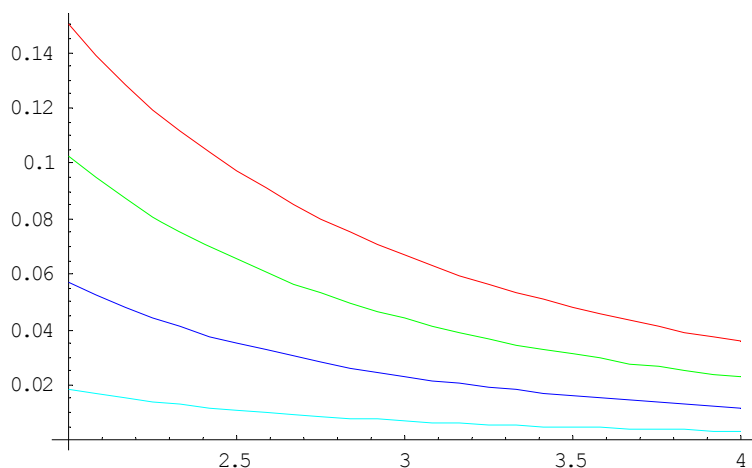
$$C_{diff} = C_{s,s+w} - C_{s+w,s+2w} = \frac{\epsilon_r}{\pi} \left[\text{Log} \frac{s+w}{s} - \text{Log} \frac{s+w+W}{s+W} - \text{Log} \frac{s+w+w}{s+w} + \text{Log} \frac{s+w+w+W}{s+w+W} \right] \quad (109)$$

Παρατηρούμε ότι η διαφορική χωρητικότητα είναι ευθέως ανάλογη της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς του μέσου άνωθεν των ηλεκτροδίων. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι ο αισθητήρας είναι ικανός παρά την διαφορική φύση του να καταγράφει ομοιόμορφες μεταβολές της διηλεκτρικής σταθεράς.

Στα επόμενα σχήματα δίνονται γραφικές παραστάσεις της παραπάνω σχέσης για διαφορές γεωμετρίας των ηλεκτροδίων.



Σχ. 76 Διαφορική Χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους (pF/m) για $W=1$ συναρτήσει του s και για $w=0.25, 0.50, 0.75$ και 1.00 αντίστοιχα.



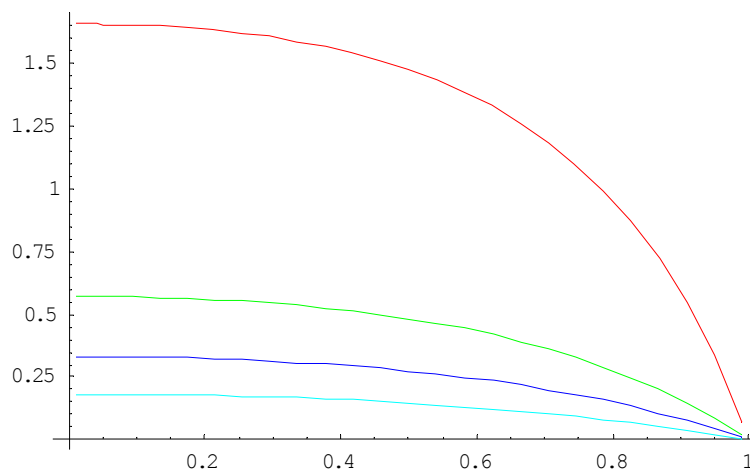
Σχ. 77 Διαφορική Χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους (pF/m) για $W=1$ συναρτήσεως του s σε πιο μεγάλη απόσταση και για $w=0.25, 0.50, 0.75$ και 1.00 αντίστοιχα.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 76 καθαρά ότι η διαφορική χωρητικότητα πέφτει πολύ γρήγορα με την απόσταση ανεξάρτητα του πλάτους των ηλεκτροδίων μέτρησης και για δεδομένο πάντα ηλεκτρόδιο διέγερσης. Για ηλεκτρόδια μέτρησης σε απόσταση τουλάχιστον ίση με το πλάτος του ηλεκτροδίου οδήγησης η καμπύλες παρουσιάζουν πολύ πιο ομαλή συμπεριφορά άν και η τιμή της διαφορικής χωρητικότητας έχει μειωθεί δραστικά. Αυτό φαίνεται καλύτερα στο Σχ. 77. Όπως θα δούμε η μικρή τιμή της χωρητικότητας δεν αποτελεί τόσο σημαντικό πρόβλημα εφόσον το κύκλωμα μέτρησης μπορεί να μετρήσει με ακρίβεια μικρές μεταβολές της.

Παρατηρούμε επίσης από τα δύο αυτά σχήματα ότι όσο πιο μικρού πλάτους είναι τα ηλεκτρόδια μέτρησης τόσο πιο ομαλή και ανεξάρτητη της απόστασης από το ηλεκτρόδιο οδήγησης γίνεται η διαφορική χωρητικότητα. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό. Με μικρό πλάτος ηλεκτροδίων μέτρησης βελτιώνεται η συμπεριφορά του αισθητήρα σε εξωτερικές παρεμβολές καθώς προσεγγίζουμε το μοντέλο του συνεστραμένου ζεύγους καλύτερα. Ταυτόχρονα μπορούμε εκτός των ηλεκτροδίων μέτρησης που βρίσκονται σε άμεση γειτνίαση με το ηλεκτρόδιο οδήγησης να μετράμε και πιο απομακρυσμένα ζεύγη ηλεκτροδίων μέτρησης αυξάνοντας τους διαθέσιμους όρους χωρητικότητας. Βέβαια η τιμή της χωρητικότητας που πρέπει να μετρηθεί θα είναι ιδιαίτερα μικρή αλλά αυτό όπως φαίνεται δεν αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα καθώς αυτό που παίζει ρόλο είναι η ποσοστιαία μεταβολή της και όχι το απόλυτο μεγεθός της και τα σύγχρονα ηλεκτρονικά κυκλώματα μπορούν να διακρίνουν με ακρίβεια μεταβολές της τάξης των fF .

Ιδιαίτερα σημαντικές είναι οι καμπύλες για την διαφορική χωρητικότητα που εμφανίζονται στο Σχ. 78. Εδώ θεωρούμε ότι το συνολικό πλάτος που καταλαμβάνει το βασικό δομικό στοιχείο του αισθητήρα και είναι ίσο με $s + 2w + W$ αποτελεί την μονάδα μέτρησης των αποστάσεων είναι δηλαδή ίσο με την μονάδα. Στο σχήμα απεικονίζεται η μεταβολή της χωρητικότητας για διάφορες γεωμετρίες των ηλεκτροδίων μέσα στο μοναδιαίο πλάτος. Οι καμπύλες προκύπτουν για διάφορα s

κρατώντας τον λόγο s/w σταθερό και για πλάτος W τέτοιο ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη μοναδιαίου συνολικού πλάτους. Με άλλα λόγια οι καμπύλες μας επιτρέπουν να διαλέξουμε την βέλτιστη γεωμετρία ηλεκτροδίων για δεδομένο πλάτος του βασικού δομικού στοιχείου του αισθητήρα. Όπως βλέπουμε η διαφορική χωρητικότητα μεγαλώνει για μεγάλο πλάτος των ηλεκτροδίων μέτρησης. Επίσης παρατηρούμε ότι για μεγάλο ευρος τιμών της απόστασης από το ηλεκτρόδιο οδήγησης αυτή παραμένει σχετικά σταθερή υπό την παρουσία της υπόθεσης ότι το πλάτος των ηλεκτροδίων μέτρησης μειώνεται αντιστόφως ανάλογα της απόστασης που τοποθετούμε αυτά από το ηλεκτρόδιο οδήγησης.



Σχ. 78 Διαφορική Χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους (pF/m) για $s+2w+W=1$ συναρτήσει του s και για $s/w=0.2, 4/3, 3$ αντίστοιχα.

Στην ειδική περίπτωση όπου $W = w = s$ έχουμε την παρακάτω τιμή για την χωρητικότητα

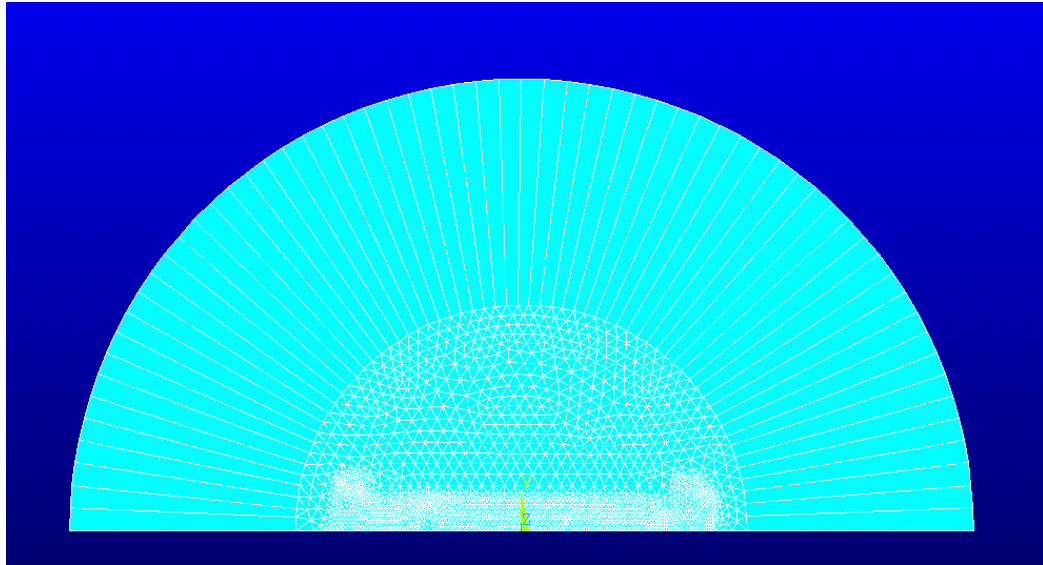
$$C_{diff, W=w=s} = 0.478839 \frac{pF}{m} \quad (110)$$

IV.4.2 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Για την ανάλυση της συμπεριφοράς του νέου αισθητήρα παρουσία ποικίλων διηλεκτρικών υλικών και σε διαφορετικές αποστάσεις πάνω από τα ηλεκτρόδια η χρήση πεπερασμένων στοιχείων είναι επιβεβλημένη καθώς η αναλυτική του περιγραφή πέραν των σχέσεων που δόθηκαν στην προηγούμενη ενότητα είναι εξαιρετικά δύσκολη.

Στο Σχ. 74 φαίνεται η γεωμετρία πάνω στη οποία βασίστηκε η μοντελοποίηση του αισθητήρα «κάμερας χωρητικότητας».

Στο Σχ. 79 φαίνεται ο χώρος προσομοίωσης μετά από διαμέριση του σε πεπερασμένα στοιχεία. Για μεγαλύτερη ακρίβεια χρησιμοποιήθηκε λεπτότερη διαμέριση κάτω από την διηλεκτρική πλάκα. Τα εξωτερικά στοιχεία μοντελοποιούν συνοριακές συνθήκες για άπειρο χώρο άνωθεν των ηλεκτροδίων του αισθητήρα. Τα ηλεκτρόδια του αισθητήρα μοντελοποιούνται επιβάλλοντας κατάλληλες συνοριακές συνθήκες στους κόμβους του δικτύωματος πάνω στον άξονα X.



Σχ. 79 Ο χώρος προσομοίωσης μετά από διαμέριση σε πεπερασμένα στοιχεία.

Ο Πίνακας 5 περιέχει συγκεντρωτικά διάφορες γεωμετρίες για τις οποίες έγινε προσομοίωση. Όπως βλέπουμε οι προσομοιώσεις έχουν ως ανεξάρτητη μεταβλητή την θέση της διηλεκτρικής πλάκας d άνωθεν των ηλεκτροδίων. Παράμετρος σε όλες ήταν η τιμή της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς της πλάκας ϵ_r .

Λόγω της αλλαγής της θέσης της διηλεκτρικής πλάκας άλλαζε κάθε φορά και η τοπολογία του διαμερισμού του χώρου προσομοίωσης σε πεπερασμένα στοιχεία. Αυτό εμφανιζόταν σε όλες τις προσομοιώσεις ως μία ταλάντωση των υπολογιζόμενων χωρητικότητων γύρω από την πραγματική τιμή. Για να αντιμετωπίσουμε τέτοια σφάλματα περιλαμβάνονταν στις προσομοιώσεις πάντα μία όπου η σχετική διηλεκτρική σταθερά την διηλεκτρική πλάκας θεωρούνταν ίση με αυτή του αέρα. Επιπλέον σε όλες τις λαμβανόμενες τιμές χωρητικότητας θεωρούσαμε ως αναφορά την τιμή της χωρητικότητας που προέκυπτε από την πρώτη δηλαδή για $\epsilon_r = 1$.

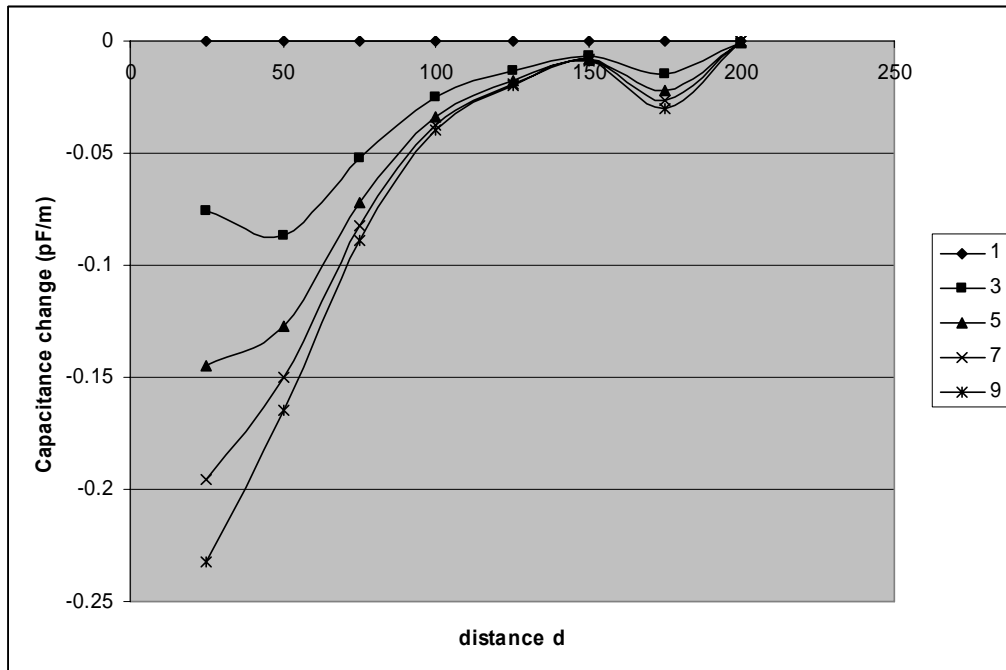
Στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που παραθέτουμε αυτό που απεικονίζεται είναι η μεταβολή της χωρητικότητας από την τιμή της για $\epsilon_r = 1$ όπως προκύπτει από την επόμενη σχέση.

$$\Delta C_{diff} = C_{diff, \epsilon_r} - C_{diff, \epsilon_r=1} \quad (111)$$

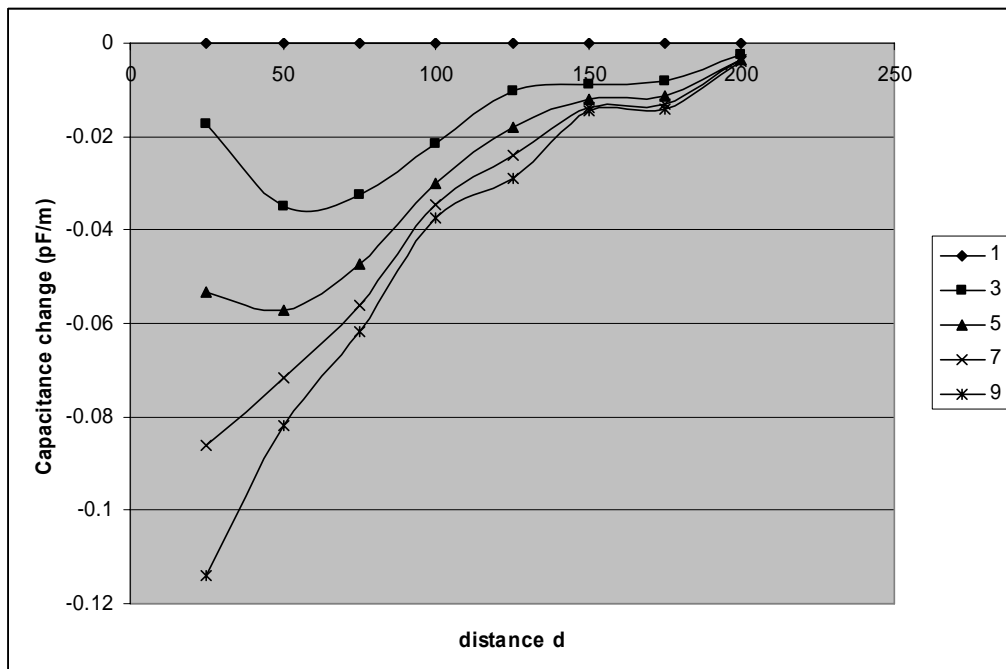
όπου C_{diff} η υπολογιζόμενη διαφορική χωρητικότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων μέτρησης για ϵ_r και $C_{diff, \epsilon_r=1}$ η υπολογιζόμενη χωρητικότητα στο αντίστοιχο πρόβλημα για μοναδιαία σχετική διηλεκτρική σταθερά της πλάκας.

Πίνακας 5. Συγκεντρωτικός πίνακας γεωμετριών που μοντελοποιήθηκαν

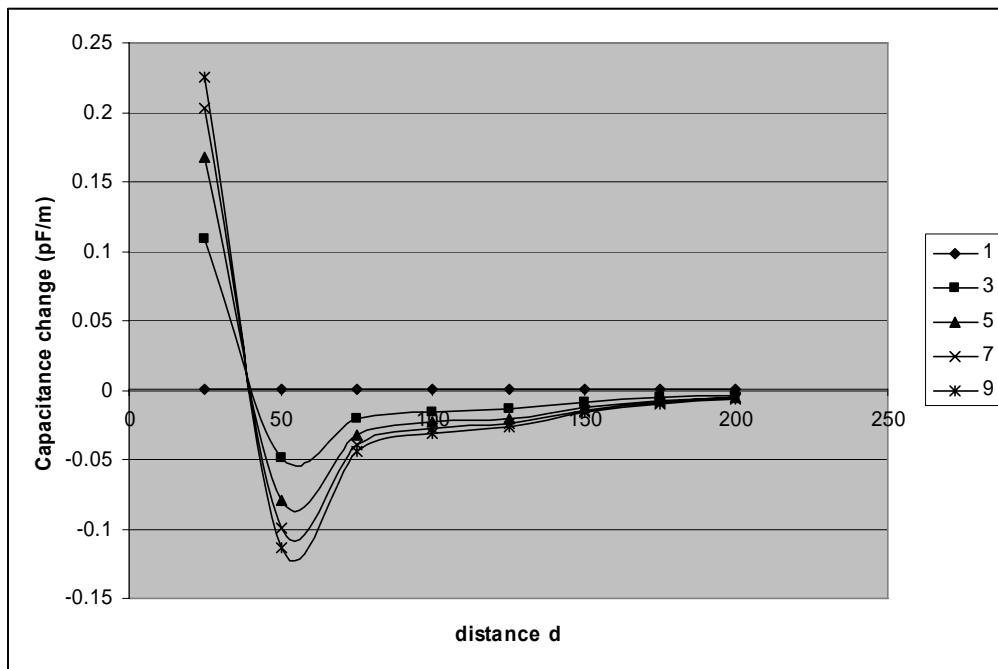
W	s	w	d	h	ϵ_r	Σχήμα
100	50	25		100	1,2,5,7,9	Σχ. 80
100	100	25		100	1,2,5,7,9	Σχ. 81
100	150	25		100	1,2,5,7,9	Σχ. 82
100	200	25		100	1,2,5,7,9	Σχ. 83
100	50	50		100	1,2,5,7,9	Σχ. 84
100	100	50		100	1,2,5,7,9	Σχ. 85
100	150	50		100	1,2,5,7,9	Σχ. 86
100	200	50		100	1,2,5,7,9	Σχ. 87



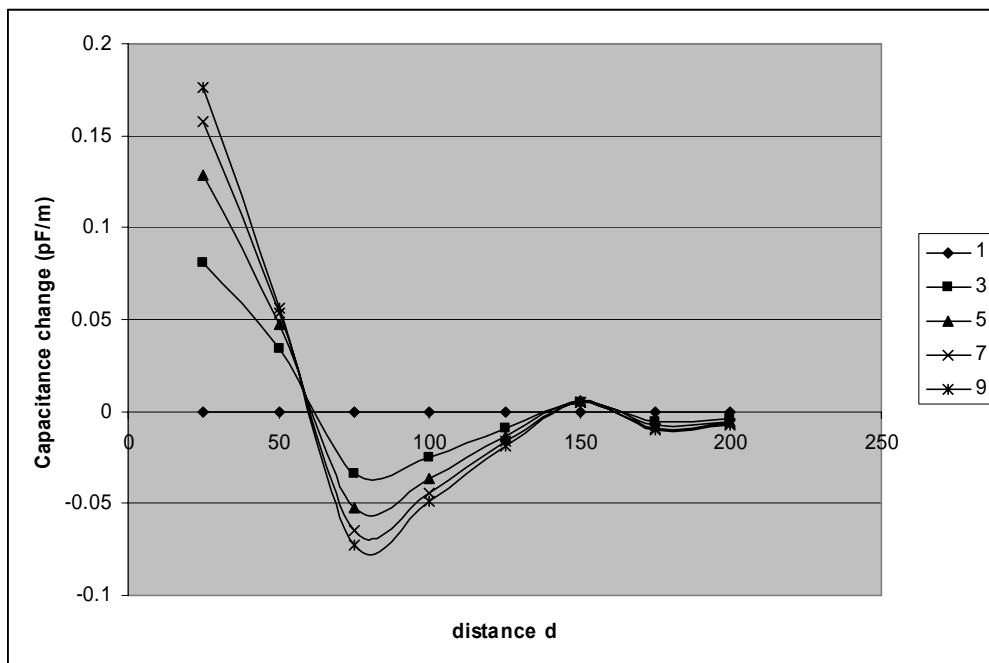
Σχ. 80 Η μεταβολή της χωρητικότητας για $W=100$, $s=50$, $w=25$, $h=100$ συναρτήσει του d και με παράμετρο το ϵ_r



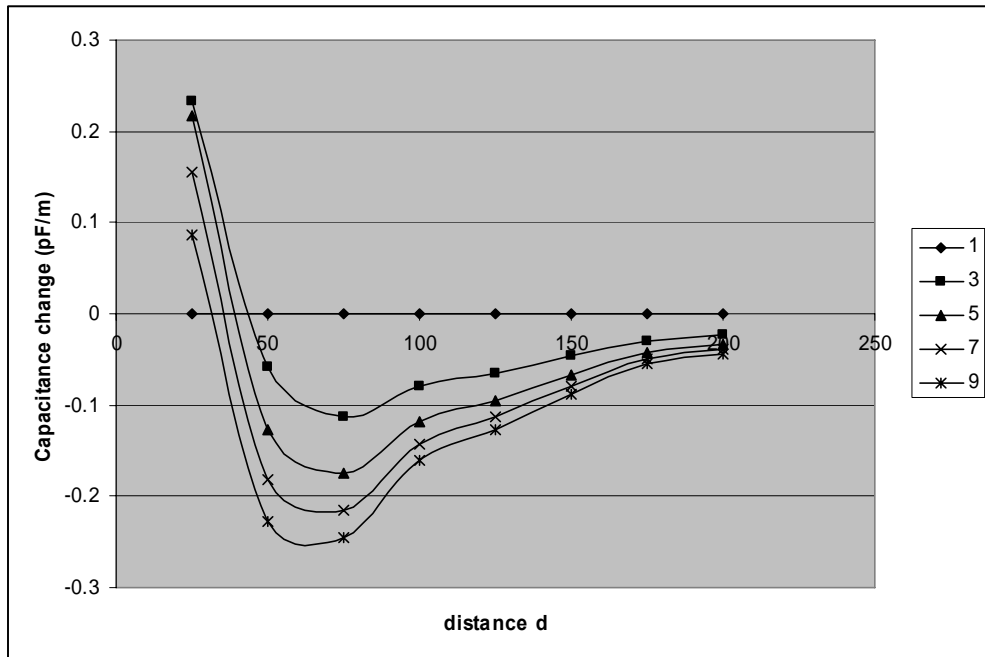
Σχ. 81 Η μεταβολή της χωρητικότητας για $W=100$, $s=100$, $w=25$, $h=100$ συναρτήσει του d και με παράμετρο το ϵ_r



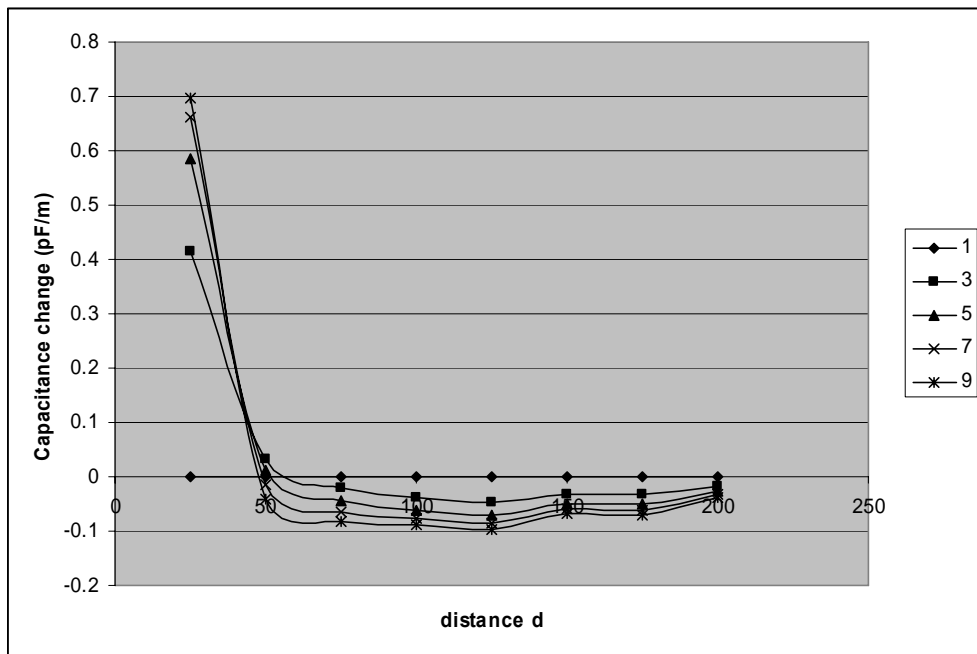
Σχ. 82 Η μεταβολή της χωρητικότητας για $W=100$, $s=150$, $w=25$, $h=100$ συναρτῆσει του d και με παράμετρο το ϵ_r



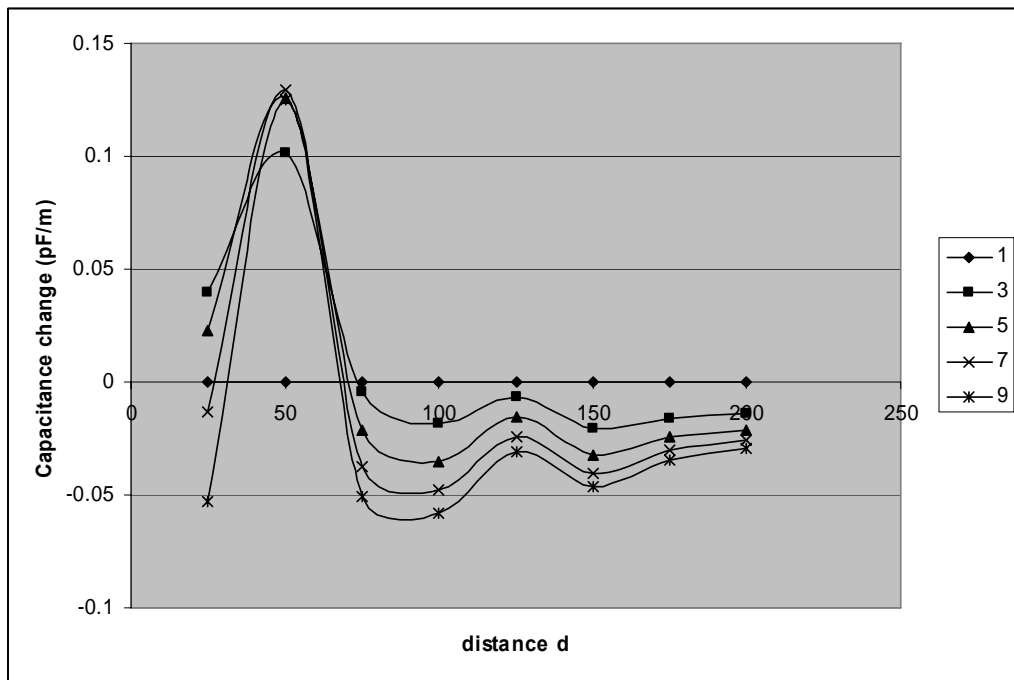
Σχ. 83 Η μεταβολή της χωρητικότητας για $W=100$, $s=200$, $w=25$, $h=100$ συναρτῆσει του d και με παράμετρο το ϵ_r



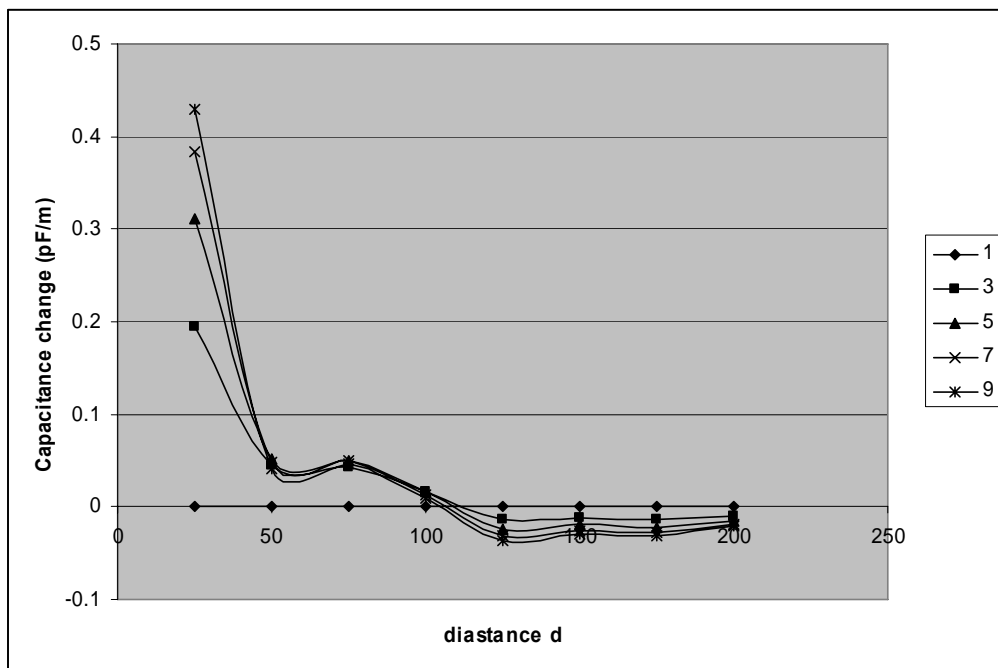
Σχ. 84 Η μεταβολή της χωρητικότητας για $W=100$, $s=500$, $w=50$, $h=100$ συναρτήσει του d και με παράμετρο το ϵ_r



Σχ. 85 Η μεταβολή της χωρητικότητας για $W=100$, $s=100$, $w=50$, $h=100$ συναρτήσει του d και με παράμετρο το ϵ_r



Σχ. 86 Η μεταβολή της χωρητικότητας για $W=100$, $s=150$, $w=50$, $h=100$ συναρτήσει του d και με παράμετρο το ϵ_r



Σχ. 87 Η μεταβολή της χωρητικότητας για $W=100$, $s=200$, $w=50$, $h=100$ συναρτήσει του d και με παράμετρο το ϵ_r

IV.5 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

IV.5.1 Μελέτη Θεωρητικών - πειραματικών δεδομένων

Η σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τα αντίστοιχα θεωρητικά μπορεί να γίνει μόνο ποιοτικά. Αυτό διότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν θεωρητικά ή με με χρήση πεπερασμένων στοιχείων βασίζονται στην υπόθεση απείρου μήκους ηλεκτροδίων ώστε το αντίστοιχο πρόβλημα να γίνεται διδιάστατο. Δεδομένου του πεπερασμένου μήκους του εκάστοτε ηλεκτροδίου οδήγησης η υπόθεση αυτή ικανοποιείται μόνο για σχετικά μεγάλο μήκος ηλεκτροδίων οδήγησης ως προς την απόσταση από τα ηλεκτρόδια μέτρησης.

Είναι προφανής η εκθετική αύξηση της χωρητικότητας με μείωση της απόστασης όπως φαίνεται στο Σχ. 76 και το πλάτος της απόκρισης του συστήματος στα πειραματικά αποτελέσματα για διαφορετικό ηλεκτρόδιο οδήγησης.

Τα πειραματικά δεδομένα παρουσιάζουν περίπου την ίδια περίπου συμπεριφορά, αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Και εδώ όπως και στον αισθητήρα μέτρησης «περιεχομένου ύδατος» υπάρχουν περιοχές όπου η απόκριση είναι μικρότερη της αντίστοιχης απουσίας διηλεκτρικού.

Αυτό είναι εμφανές στην περίπτωση που των πεπερασμένων στοιχείων με $w = 25$ που πραγματικά ακολουθούν πιστά τα πειραματικά καθώς ο κατασκευασμένος αισθητήρας διέθεται λεπτότερα ηλεκτρόδια μέτρησης από ότι οδήγησης.

IV.6 Ολοκλήρωση σε Πυρίτιο

Το σύστημα σχεδιάστηκε με στόχο την τελική ολοκλήρωσή του σε ψηφίδα πυριτίου. Όπως είδαμε για την υλοποίηση απαιτούνται μόνο κυκλώματα διακοπών CMOS χαμηλής ποιότητας και τελεστικοί ενυσχυτές σχετικά μεγάλου εύρους ζώνης. Και τα δύο είναι διαθέσιμα σε πολλές βιβλιοθήκες σχεδίασης αναλογικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Τα ζητούμενα χαρακτηριστικά των κυκλωμάτων δεν παρουσιάζουν κάποια ιδιαιτερότητα. Είναι μέσα στις προδιαγραφές και επιδόσεις πολλών διαδικασιών κατασκευής ολοκληρωμένων.

Η ολοκλήρωση του συστήματος μπορεί να γίνει σε δύο μορφές. Στην πρώτη ολοκληρώνονται μόνο τα ηλεκτρονικά μέρη ενώ ο αισθητήρας με τα ηλεκτρόδια κατασκευάζεται χωριστά με ανεξάρτητο τρόπο και σε διαστάσεις που είναι βέλτιστες για την εκάστοτε εφαρμογή. Ήδη υπάρχουν διαθέσιμα εμπορικά ολοκληρωμένα συστήματα μέτρησης χωρητικότητας για απλές εφαρμογές. [57],[58].

Στην δεύτερη μορφή τόσο τα ηλεκτρονικά αλλά και τα ηλεκτρόδια του αισθητήρα ολοκληρώνονται πάνω στην ίδια ψηφίδα πυριτίου.

Στην πρώτη μορφή επειδή ο αισθητήρας θα πρέπει να αλλάζει ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή υπάρχει πρόβλημα με την ρύθμιση του κέρδους των βαθμίδων ενίσχυσης. Επίσης υπάρχει πιθανό πρόβλημα στην υλοποίηση της σύνθετης αντίστασης αναδρασης στους τελεστικούς ενυσχυτές εισόδου λόγω της μεγάλης τιμής της τάξης $\sim 1\text{M}\Omega$. Αν αφήναμε τις αντιστάσεις αυτές εκτός του ολοκληρωμένου θα χρειαζόμασταν τετραπλάσιο αριθμό ακροδεκτών από τα κυκλώματα μέτρησης. Μία τέτοια επιλογή έχει το επιπλέον πλεονέκτημα ότι ευκολα μπορούμε να ρυθμίσουμε την απόκριση της πρώτης βαθμίδας ώστε το σύστημα να λειτουργεί στην γραμμική περιοχή σε όλο το φάσμα μετρήσεων χωρητικότητας ανάλογα με την αισθητήρια κεφαλή και τα χαρακτηριστικά μεγέθη της εκάστοτε εφαρμογής.

Το επιπλέον κόστος σε ακροδέκτες από μία τέτοια επιλογή δεν είναι ιδιαίτερο. Για παράδειγμα σε ένα σύστημα με 6 κυκλώματα μέτρησης έχουμε $2 \times 6 = 12$ ηλεκτρόδια μέτρησης και απαιτούνται $4 \times 6 = 24$ ακροδέκτες από τα κύκλωμα εισόδου. Αν τώρα κάθε ζεύγος ηλεκτροδίων μέτρησης συνοδεύονταν από 6 ηλεκτρόδια οδήγησης θα χρειαζόνταν επιπλέον $6 \times 6 = 36$ ακροδέκτες στο ολοκληρωμένο για την διασύνδεση με τα ηλεκτρόδια οδήγησης. Ο συνολικά απαιτούμενος αριθμός ακροδεκτών στο ολοκληρωμένο θα ήταν αγνοώντας ηλεκτρόδια τροφοδοσίας, γείωσης και βοηθητικών λειτουργιών $24 + 36 = 60$ ενώ οι διαθέσιμες ανεξάρτητες μετρήσεις από το σύστημα ανέρχονται σε 216.

Ο αριθμός απαιτούμενων ακροδεκτών είναι σχετικά μικρός εφόσον σήμερα τυπικοί αριθμοί ακροδεκτών σε ολοκληρωμένα για επιφανειακή στερέωση (τεχνολογία SMD) ξεπερνούν το διακόσια. Άρα ο αριθμός ηλεκτροδίων αισθητήρα μπορεί να γίνει μεγαλύτερος αυξάνοντας κατά πολύ περισσότερο τις διαθέσιμες αντίστοιχα μετρήσεις.

V. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

V.1 Ανακεφαλαίωση

Στα δύο προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάσαμε δύο διαφορετικούς αισθητήρες χωρητικότητας. Οι αισθητήρες αυτοί προκύπτουν από διαφορετικές απαιτήσεις για μέτρηση των διηλεκτρικών ιδιοτήτων υλικών. Ο πρώτος έχει ως στόχο την μέτρηση του «περιεχομένου ύδατος» προϊόντος πάνω στη γραμμή παραγωγής και σε πραγματικό χρόνο. Το μετρούμενο υλικό θεωρείται σταθερών διαστάσεων και ομοιογενές στην σύνθεσή του.

Ο δεύτερος καλείται να επιτρέψει την συλλογή όσο το δυνατόν περισσότερων ανεξάρτητων μετρήσεων χωρητικότητας από δεδομένο εμβαδό επιφάνειας με ακριβή και φθινό τρόπο. Οι μετρήσεις αυτές χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση της κατανομής της διηλεκτρικής σταθεράς στο εσωτερικό του χώρου που ορίζει ο αισθητήρας. Το υλικό που καλύπτει τον χώρο εδώ θεωρείται γενικά ανομοιογενές και η προκύπτουσα κατανομή της διηλεκτρικής σταθεράς μας αποκαλύπτει τη θέση διαφόρων φάσεων στο υλικό ή τις προσμίξεις του.

Πριν ανακεφαλαιώσουμε πάνω στην έρευνα που πραγματοποιήσαμε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής για κάθε ένα από τα δύο παραπάνω συστήματα δράτουμε την ευκαιρία να αναφερθούμε στο φάσμα εφαρμογών που μπορούν να βρουν αυτά. Ετσι θα μπορεί ο αναγνώστης να εκτιμήσει καλύτερα τα αποτελέσματα και την σημασία της ερευνητικής μας εργασίας..

V.1.1 Εφαρμογές

Και τα δύο συστήματα παρουσιάζουν μεγάλο τεχνολογικό ενδιαφέρον. Η ανάγκη για διαρκή βελτίωση της ποιότητας των παραγομένων προϊόντων ώστε να πληρούν αντίστοιχους κανονισμούς και οδηγίες είναι επιτακτική στις μέρες μας. Με την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο των διηλεκτρικών ιδιοτήτων του προϊόντος μπορούμε να αποκτήσουμε σημαντική πληροφορία για την ποιότητα του και να εγγυηθούμε ότι η παραγωγή του είναι ομοιόμορφη. Μπορούμε να προβούμε ακόμη και σε έλεγχο μέσω συστημάτων αυτομάτου ελέγχου των παραμέτρων της παραγωγής και διόρθωση τους ώστε να έχουμε σταθερή ποιότητα παραγωγής.

Η απεικόνιση της διεργασίας ανάμιξης προϊόντων ή της εξέλιξης χημικών αντιδράσεων είναι πολύ σημαντική για την βιομηχανία. Η παρακολούθηση της κατανομής των διηλεκτρικών σταθερών των υλικών που συμμετέχουν σε συτές μας επιτρέπει να οπτικοποιήσουμε και να καταγράψουμε με «άλλα μάτια» και αισθήσεις φαινόμενα που μέχρι πρότείνως ήταν αδύνατο. Αυτό που μόνο στην φύση υπάρχει όπως είπαμε στην εισαγωγή σιγά σιγά τελειοποιείται και βρίσκει νέες εφαρμογές στην βιομηχανία..

V.1.2 Αισθητήρας μέτρησης «περιεχομένου ύδατος» σε γραμμή παραγωγής

Στο πρώτο μέρος της διατριβής παρουσιάσαμε με λεπτομέρεια έναν αισθητήρα χωρητικότητας για την μέτρηση του «περιεχομένου ύδατος» προϊόντος σε γραμμή παραγωγής. Ο αισθητήρας επιτρέπει την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της περιεχόμενης «υγρασίας» σε αυτό.

Το τελικό σύστημα εγκαταστάθηκε και λειτούργησε επιτυχώς σε πραγματικές γραμμές παραγωγής. Συγκεκριμένα εφαρμόστηκε σε γραμμή παραγωγής μπισκότων και γυψοσανίδων αντίστοιχα.

Η σχεδίαση του κυκλώματος που συνοδεύει τον αισθητήρα έγινε για τις συνθήκες ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, θορύβου και θερμοκρασιακών μεταβολών που επικρατούν σε βιομηχανικό περιβάλλον. Επιπλέον το κύκλωμα επιτρέπει εκτός της μέτρησης χωρητικότητας και ταυτόχρονη μέτρηση της γωνίας απωλειών του υλικού δηλαδή της αγωγιμότητα του προϊόντος.

Η γεωμετρία του αισθητήρα που επιλέξαμε ήταν επίπεδη με επάλληλα ηλεκτρόδια για εύκολη και φθηνή κατασκευή. Επιπλέον επιτρέπει την ευκολη τοποθέτηση σε διαφορετικού τύπου γραμμές παραγωγής.

Η αισθητήρια κεφαλή με τα ηλεκτρόδια συνδέεται μέσω ομοαξονικών καλωδίων με τα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Το μήκος των καλωδίων μπορεί άνετα να είναι αρκετών μέτρων. Επομένως εφόσον κατασκευαστεί από κατάλληλα υλικά μπορεί να τοποθετηθεί ακόμη και μέσα στον φούνο ξήρασης για επιτόπου μέτρηση της υγρασίας.

Η μελέτη του αισθητήρα έγινε με αναλυτικές σχέσεις αλλά και με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν με πειραματικές μετρήσεις.

Συγκεκριμένα με χρήση της μεθόδου των χωριζομένων μεταβλητών, υποθέτοντας περιοδικότητα του προβλήματος και ότι το δυναμικό στο διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων προσεγγίζεται από το γνωστό αναλυτικά δυναμικό στο διάκενο μεταξύ δύο ημιαπίρων πλακών καταλήξαμε σε ένα ανάπτυγμα σε σειρά για το δυναμικό σε

όλο τον χώρο πάνω από τα ηλεκτρόδια όπου βρίσκεται και το υπό μέτρηση υλικό. Στο θεωρητικό μοντέλο για την ανάπτυξη σε σειρά προβλεπόταν υπαρξη ή μη επιπέδου γείωσης σε μεταβλητή απόσταση πίσω από το υλικό. Με βάση την διατήρηση της ενέργειας του ηλεκτροστατικού πεδίου υπολογίσαμε την συνολική χωρητικότητα ανα μονάδα επιφανείας μεταξύ των ηλεκτροδίων.

Η αμοιβαία χωρητικότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων του αισθητήρα είναι αυτή που πραγματικά μετρά το κύκλωμα μέτρησης και προκύπτει αν από την συνολική χωρητικότητα που υπολογίσαμε θεωρητικά αφαιρέσουμε την χωρητικότητα των ηλεκτροδίων ως προς το επίπεδο γείωσης ή το άπειρο. Για τον θεωρητικό υπολογισμό της τελευταίας θεωρήσαμε ότι το σύστημα ηλεκτροδίων διηλεκτρικού και επιπέδου γείωσης προσεγγίζεται από πυκνωτή παραλλήλων πλακών με διηλεκτρικό μεταξύ των οπλισμών

Η γραφική παράσταση των αναλυτικών σχέσεων που καταλήξαμε συμφωνεί αρκετά καλά με τα αριθμητικά αποτελέσματα που προκύπτουν με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Αναμένεται ότι πιο ακριβής υπολογισμός της χωρητικότητας των ηλεκτροδίων ως προς την γή θα βελτιώσει ακόμη περισσότερο τα αποτελέσματα των αναλυτικών σχέσεων που καταλήξαμε.

Τα πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα της ανάλυσης του συστήματος. Δεδομένου ότι ο πραγματικός αισθητήρας έχει πεπερασμένες διαστάσεις ενώ η ανάλυση βασίστηκε στην υπόθεση περιοδικότητας για το πεδίο υπάρχει παντα το σφάλμα της παραμόρφωσης του πεδίου στην περιμετρο του αισθητήρα που είναι εξαιρετικά δύσκολο να μοντελοποιηθεί και υπολογιστεί.

Τόσο η θεωρία αλλά και η πράξη έδειξε ότι ο αισθητήρας που κατασκευάσαμε χαρακτηρίζεται από δύο σαφώς διαχωρισμένες μεταξύ τους ως προς την θέση της πλάκας διηλεκτρικού που μοντελοποιεί το προϊόν στην γραμμή παραγωγής. Όταν βρίσκεται πολύ κοντά στα ηλεκτρόδια η αμοιβαία μεταξύ τους χωρητικότητα αυξάνει εκθετικά με την μείωση της αποστάσεως. Η ευαισθησία του αισθητήρα σε μεταβολές της διηλεκτρικής σταθεράς είναι πολύ μεγάλη. Μεγάλη όμως είναι και η ευαισθησία ως προς την θέση του διηλεκτρικού με αποτέλεσμα σε πραγματικές συνθήκες, να είναι πολύ δύσκολο να διατηρηθεί σταθερή η ευαισθησία του συστήματος. Σε μεγαλύτερες αποστάσεις από την κεφαλή η μετρούμενη μεταβολή γίνεται αρνητική καθώς η αμοιβαία χωρητικότητα παρουσία διηλεκτρικού γίνεται μικρότερη αυτή χωρίς διηλεκτρικό. Στην περιοχή αυτή η έξοδος εξαρτάται μόνο από το διηλεκτρικό υλικό και το πάχος του και είναι πρακτικά ανεξάρτητη της θέσης. Η λειτουργία σε αυτή την περιοχή δίνει πιο αξιόπιστη συμπεριφορά του αισθητήρα.

Κανόνες σχεδίασης δόθηκαν με βάση την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Είναι η πρώτη φορά στην διεθνή βιβλιογραφία που αναλύεται η επίδραση της απόστασης του μετρούμενου προϊόντος από τα επάλληλα ηλεκτροδίων και προσδιορίζεται μία περιοχή βέλτιστης λειτουργίας. Στην περιοχή αυτή η έξοδος του συστήματος δεν επηρεάζεται από μικρές αλλαγές στην θέση του προϊόντος.

V.1.3 Κάμερα χωρητικότητας

Από την επισκόπηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας πάνω σε ήδη υλοποιημένα συστήματα ECT περιγράψαμε τα κυριότερα μειονεκτήματα τους. Επικεντρώσαμε το ενδιαφέρον σε αυτά και αναζητήσαμε διατάξεις ηλεκτροδίων και κυκλώματα μέτρησης χωρητικότητας που να βελτιώνουν αυτά. Στόχος μας ήταν η κατασκευή ενός ολοκληρώσιμου σε ψηφίδα πυριτίου συστήματος επίπεδης γεωμετρίας για την απεικόνιση της κατανομής διηλεκτρικών σταθερών υλικών πάνω από τον αισθητήρα.

Επιγραμματικά το σύστημα που προτείνουμε χαρακτηρίζεται από δύο κύρια σημεία. Το πρώτο αφορά την μείωση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών στην μέτρηση της χωρητικότητας με κατάλληλη διάταξη ηλεκτροδίων και επιλογή διαφορικού κυκλώματος μέτρησης. Έτσι απλούστερα άρα γρηγορότερα και φθηνότερα ηλεκτρονικά απαιτούνται για την μέτρηση. Η επιλογή του κυκλώματος μέτρησης επίσης επιτρέπει την μέτρηση με μεγαλύτερη ακρίβεια καθώς δεν απαιτεί κυκλώματα μεταγωγής.

Το δεύτερο σημείο αφορά την αύξηση των διαθέσιμων ανεξάρτητων μετρήσεων χωρητικότητας από σύστημα. Λόγω της επιλεγμένης διάταξης ηλεκτροδίων σε κάθε ένα από τα κυκλώματα μέτρησης αντιστοιχούν πολύ περισσότερα ηλεκτρόδια οδήγησης άρα αυξάνει και ο αριθμός των διαθέσιμων ανεξάρτητων μετρήσεων με μόνο κόστος τα επιπλέον κυκλώματα μεταγωγής για τα ηλεκτρόδια οδήγησης

Για πρώτη φορά προτείνεται κατά την γνώση μας, στην σύγχρονη βιβλιογραφία, η συγκεκριμένη «διαφορική» διάταξη ηλεκτροδίων και τοπολογία κυκλώματος μέτρησης χωρητικότητας για κατασκευή επίπεδων Capacitive Sensors Array.

Το βασικό δομικό στοιχείο του προτεινόμενου συστήματος κατασκευάστηκε μαζί με το απαιτούμενο ηλεκτρονικό κύκλωμα μέτρησης για αξιολόγηση με διαφορετικές διαστάσεις ηλεκτροδίων και λήψη πειραματικών δεδομένων.

Τα πειραματικά δεδομένα συγκρίθηκαν με αποτελέσματα από θεωρητική ανάλυση του βασικού δομικού στοιχείου καθώς και δεδομένα με χρήση πεπερασμένων στοιχείων.

Δεν προχωρήσαμε στην ανάπτυξη των απαιτούμενων σχέσεων για την λύση του αντιστρόφου προβλήματος και των υπολογισμό της κατανομής διηλεκτρικών σταθερών από τις μετρήσεις χωρητικότητας που δίνει το σύστημα λόγω της πίεσης χρόνου για το πέρας της διατριβής.

Τέλος διερευνήσαμε τα πιθανά προβλήματα για την ολοκλήρωση του συστήματος σε ψηφίδα πυριτίου

Βιβλιογραφία

- [1] "Leyden Jar", Microsoft Encarta '95, Interactive Multimedia Encyclopedia
- [2] Maxwell, J.C. *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Clarendon, Oxford 1873
- [3] Thompson A.M. *A bridge for the measurement of permittivity*, Proc. IEE, Vol.103,Pt.B., pp.704-707, November 1956
- [4] Thompson, A.M. *The precise measurement of small capacitances*, IRE transactions on instrumentation, Vol. I-7, pp.243-253.1958
- [5] Thompson, A.M. and D.G. Lampard, *A new theorem in electrostatics and its application to calculable standards of capacitance*, Nature, Vol. 1117, pp.88, May 1956
- [6] Lampard D.G., *A new theorem in electrostatics and its application to calculable standards of capacitance*, Proc IEE, Vol 104, pt. C, pp. 271-280, September 1957
- [7] Toth, F.N. *A design methodology for low-cost, high-performance capacitive sensors*, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, January 1997.
- [8] L. K. Baxter, *Capacitive Sensors*, IEEE Press, (1997).
- [9] ANSYS®, Finite Element Software Online Help
- [10] K. J. Binns and P. J. Lawrenson, *Analysis and computation of electric and magnetic field problems*, Oxford : Pergamon Press, 1963.
- [11] D. T. Paris and F. K. Hurd, *Basic electromagnetic theory*, McGraw-Hill 1969
- [12] H. H. Woodson and J. R. Melcher Haus *Electromechanical dynamics*, New York, John Wiley & Sons, 1968.

-
- [13] Heerens, W.Chr. *Basic principles in designing highly reliable, multi-terminal capacitor sensors and performance of some laboratory test models*, *Sensor and Actuators A*, 3(1982/83)137-148
- [14] Heerens W.Chr. *Application of capacitance techniques in sensor design*, *J. Phys.E:Sci. Instrum.*, 19(1986), pp.897-906
- [15] *Shielding and guarding*, *Analog Devices Application. Note 347*.
- [16] Toth F.N. and G.C.M. Meijer, *A low-cost, smart capacitive position sensor*, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol 41, No.6, pp.1041-1044, December 1992
- [17] W.Q. Yang, *Hardware design of electrical capacitance tomography systems*, *Meas. Sci. Technol.* 7 (1996) pp. 225-232
- [18] *CMOS Integrated Circuits Databook* RCA Solid State,1983, pp. 226-230
- [19] S. Koroda, *A simple stray-free capacitance meter by using an operational amplifier*, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 32 (1983), 512-513.
- [20] W.Q. Yang, A.L. Stott, M.S. Beck, *High frequency and high resolution capacitance measuring circuit for process tomography*, *IEEE Proc. Circuits Devices Syst.* 141 (1994), 215-219.
- [21] Lea N., *Notes on the stability of LC oscillators*, *J. Inst. Elec. Eng.* Vol. 92, Pt. II, pp.261-267, 1945.
- [22] Bell D.A. and A.M. Bell, *Temperature coefficient of capacitance and of inductance*, *Electronic Technology*, vol. 37, pp. 324-345, 1960.
- [23] Froome K.D. and L. Essen, *The velocity of light and radio waves*, Academic Press, London, 1969.
- [24] Bean, B.R. and E.F. Dutton, *Radio meteorology*, Monograph 92, National Bureau of Standards, March 1996.
- [25] Yang W. Q. and Lihui Peng, *Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography*, *Meas. Sci. Technol.* vol. 14(2003), pp. R1-R13.

-
- [26] G.E. Fasching, N.S. Smith, *A capacitive system for three-dimensional imaging of fluidized beds*, Rev. Sci. Instrum. 62 (1991), 2243-2251.
- [27] Huang S.M. Plaskowsky A.B. Xie C.G. and Beck M.S. *Capacitance-based tomographic flow imaging system*, Electron. Lett. Vol. 24(1988), pp.418-419.
- [28] Huang S.M.,Xie C.G.,Thorn R. Showden D. and Beck M.S. *Design of sensor electronics for electrical capacitance tomography*, IEE Proc. G 139 pp. 83-88, 1992
- [29] Xie C.G. Huang S.M. Hoyle B.S. Thhorn R. Lenn C. Snowden D. and Beck M.S., *Electrical capacitance tomography for flow imaging-system model for development of image reconstructin algoritms and design of primary sensors*, IEE Proc. G 139, pp. 89-98, 1992.
- [30] B. Geeraets, W. Sansen, *A capacitive fringing field moisture sensor for the online moisture content measuring system MOSIS*, in Proc. of Eurosensors X, Leunven, Belgium, September 1996, P5.1-136, pp. 1481-1984.
- [31] Von Hippel A. *Dielectric Materials and Applications*, Technology Press of MIT (1954).
- [32] B. Ruth, *A Capacitance Sensor with Planar sensitivity for Monitoring Soil Water Content*, Soil Soc. Am. J, vil 63, pp48-54,(1990)
- [33] Mamichev V. A. *Interdigital Dielectrometry, Sensor Design and Parameter Estimation. Algorithms for non destructive Material Evaluation*,. Ph.D. Thesis MIT 1999.
- [34] Marioli D. Sardini E. and Taroni A., *High accuracy measurement techniques for capacitance transducers*, Meas. Sci. Technol. Vol. 4,pp. 337-343, (1993).
- [35] Nils Karlsson, *A study of a high-resolution linear circuit for capacitive sensors*, IEEE Trans. Instrum.Meas.,Vol. 48,(Dec 1999), 1122-1124.
- [36] Mamichev V.A. Kishore S-R Yang F. and Du Y. *Interdigital Sensors and Transducers*, Proc. of IEEE, vol. 92, pp. 808-845, May 2004.

-
- [37] Evans I., Somerville A. and York T., *A sensing Circuit for Micro-Capacitance Tomography*, 1st World Congress on Industrial Process Tomography, Manchester April (1999).
- [38] Charles S, Walker, *Capacitance, Inductance and Crosstalk analysis*, Artech House Inc. (1990).
- [39] T. Sakurai, K. Tamaru, *Simple formulas for Two- and Three-Dimensional capacitances*, IEEE Electron Devices Lett. Vol. ED-30 (Feb 1983), 183-185.
- [40] T. Hoffman, K. Schroder, J. Zacheja, J. Binder, *Fluid characterization using sensor elements based on interdigitated electrodes*, Sensors and Actuators B, 37 (1996), 37-47.
- [41] D. M. Spink, *Direct finite element solution for the capacitance, conductance or inductance and force in linear electrostatic and magnetostatic problems*, COMPEL 15,3 (1996), 70-84.
- [42] Bonse W. H. M., Mul C., and Spronck W.J., *Finite-element modeling as a tool for designing capacitive position sensors*, Sensors & Actuators A, vol. 46-47, pp. 266-269, (1995).
- [43] Jin Soo Kim, Dai Gil Lee, *Analysis of dielectric sensors for the cure monitoring of resin composite materials*, Sensors and Actuators B, 30 (1996), 159-164.
- [44] G. Delmon, R. Faure, B. de Gasquet, G. Girauld, J.P. Clerc, *Measurement of voidage in a fluidized bed using a capacitive sensor*, Powder Technology, 86 (1996), 149-153.
- [45] Engan H., *Interdigital electrode transducers for the excitation of elastic surface waves in piezoelectric media*, Internal Report no. TE-91, Instutt for Teoretisk Electrteknikk, Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway.
- [46] Engan H., *Excitiation of elastic surface waves by spatial harmonicw of interdigital transducers*, IEEE Trans. 6, pp. 1014-1017 (1996).
- [47] Igreja R. and Dias J.C., *Analytical evaluation of the interdigital electrodes capacitance for a multi layered structure*, Sensors and Actuators A (2004) In Press.

-
- [48] Matthis W. den Oter, *Approximate expressions for the capacitance and electrostatic potential of interdigitated electrodes*, *Sensors & Actuators A*, vol. 96, pp. 140-144 (2002).
- [49] L.S. Gradstein, I.M. Ryshik, *Tables of series, products and integrals*, Band 2, Verlag Hari Deutch, Frankfurt a. M., Germany 1981.
- [50] Yang W. Q., *Electrical Capacitance Tomography with a Square Sensor*, 1st World Congress on Industrial Process Tomography, Manchester April (1999).
- [51] Williams P. and York T. *Evaluation of Integrated Electrodes for Electrical Capacitance Tomography*, 1st World Congress on Industrial Process Tomography, Manchester April (1999).
- [52] Somerville A. Evans I. and York T. *Preliminary Studies of Planar Capacitance Tomography*, 1st World Congress on Industrial Process Tomography, Manchester April (1999).
- [53] York T.A. Evans I.G. Pokusevski Z. and Dyakowsky T. *Particle detection using an integrated capacitance sensor*, *Sensors & Actuators A* vol.92,pp. 74-79(2001).
- [54] York T., Sun L., Gregory C. and Hatfield J. *Silicon-based miniature sensor for electrical tomography*, *Sensors & Actuators A* vol.110, pp. 213-218 (2003).
- [55] Tartagni M. and Guerrieri R. *A Fingerprint Sensor on the Feedback Capacitive Sensing Scheme*, *IEEE J. Solid State Circ.* vol. 33 no. 1 pp. 113-142 January (1998).
- [56] Young N.D., Harkin G., Bunn R.M., McCulloch D.J., Wilks R.W., and Knapp A.G. *Novel Fingerprint Scanning Arrays using Polysilicon TFT's and Polymer Substrates*, *IEEE El. Dev. Letters*, vol. 18 no. 1, pp. 19-20, January (1997).
- [57] *Electric Field Imaging Device, MC33794 Datasheet*, MOTOROLA (2003)
- [58] Eady F., *E-Field Evaluation Module*, Circuit Celler, online article, www.circuitcellar.com

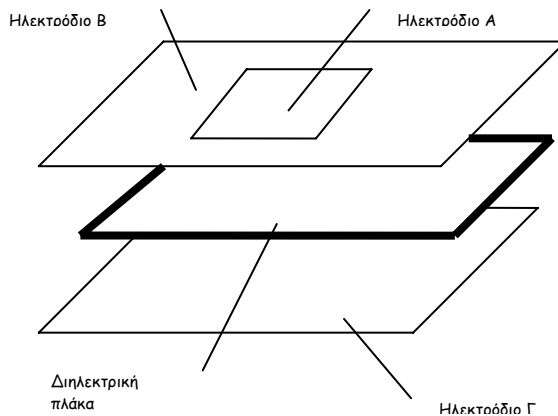


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

A) Απλός υπολογισμός σχ. διηλεκτρικών σταθερών υλικών

Για την εξαγωγή πειραματικών αποτελεσμάτων από τα διάφορα κυκλώματα αισθητήρων χωρητικότητας που παρουσιάσαμε είναι απαραίτητη μία αξιόπιστη μέθοδος για την μέτρηση σχετικών διηλεκτρικών σταθερών διαφόρων υλικών πέρα από τις τιμές αυτών που περιγράφονται σε πίνακες.

Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήσαμε την παρακάτω διάταξη ηλεκτροδίων και το κύκλωμα στο Σχ. 89 .



Σχ. 88 Διάταξη ηλεκτροδίων για τον υπολογισμό σχετικών διηλεκτρικών σταθερών

Όπως βλέπουμε έχουμε τρία ηλεκτρόδια Α, Β και Γ. Μεταξύ των ηλεκτροδίων Α-Γ σχηματίζεται ένας πυκνωτής παραλλήλων πλακών ενώ το ηλεκτρόδιο Β δρά ως ηλεκτρόδιο Κεντρικό ώστε να έχουμε αμελητέα φαινόμενα άκρων και να προσεγγίζεται ο ιδανικός πυκνωτής παραλλήλων πλακών. Εστω τώρα S η επιφάνεια του ηλεκτροδίου Α d η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων και h το πάχος της διηλεκτρικής πλάκας που θέλουμε να μετρήσουμε. Επειδή το πεδίο μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι παντού παράλληλο τα όρια των ηλεκτροδίων καθώς και οι επιφάνειες διηλεκτρικού αέρα είναι ισοδυναμικές. Ευκόλα υπολογίζουμε την χωρητικότητα ως την εν σειρά σύνδεση δύο πυκνωτών παράλληλων πλακών

$$C_1 = \epsilon_0 \frac{A}{d-h}$$

$$C_2 = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{h}$$

για την περιοχή με αέρα και για την περιοχή της διηλεκτρικής πλάκας υπό μέτρηση αντίστοιχα.

Η συνολική χωρητικότητα με ή χωρίς την διηλεκτρική πλάκα δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις

$$C_{air} = \epsilon_o \frac{A}{d}$$

$$C_{diel} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \epsilon_o A \frac{\frac{\epsilon_r}{h} \frac{1}{d-h}}{\frac{\epsilon_r}{h} + \frac{1}{d-h}} = \epsilon_o A \frac{\epsilon_r}{\epsilon_r (d-h) + h}$$

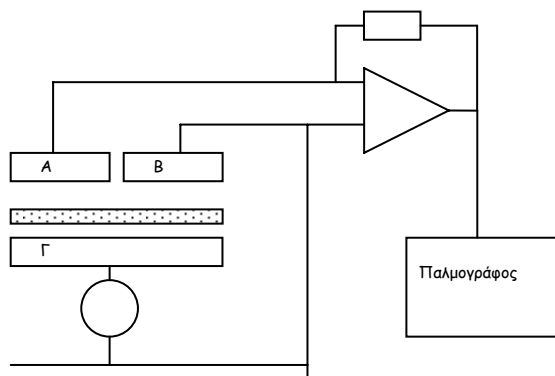
Ο λόγος των δύο χωρητικότητων θα είναι

$$\frac{C_{diel}}{C_{air}} = \frac{d \epsilon_r}{\epsilon_r (d-h) + h} = \frac{\epsilon_r}{\epsilon_r (1-h/d) + h/d}$$

Από την σχέση αυτή για γνωστό λόγο h/d πάχους διηλεκτρικής πλάκας προς απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων και λόγο χωρητικότητων με και χωρίς την διηλεκτρική πλάκα μπορούμε να υπολογίσουμε την σχετική διηλεκτρική σταθερά της πλάκας διηλεκτρικού.

Όπως βλέπουμε το κύκλωμα στο Σχ. 89 αποτελείται από έναν ενισχυτή ρεύματος για το ρεύμα που διαρέει τον πυκνωτή μεταξύ των ηλεκτροδίων Α – Γ. Προσέξτε την γείωση του ηλεκτροδίου Β. Το ηλεκτρόδιο Γ οδηγείται από μία γενήτρια AC χαμηλής αντίστασης εξόδου. Η έξοδος του κυκλώματος απεικονίζεται στην οθόνη του παλμογράφου. Άρα ο λόγος των χωρητικότητων προκύπτει μέσω του κυκλώματος από τον λόγο πλατών στον παλμογράφο με ή χωρίς την διηλεκτρική πλάκα και μπορούμε να υπολογίσουμε από την τελευταία σχέση την άγνωστη διηλεκτρική σταθερά της πλάκας.

Με μικρές τροποποιήσεις η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί και για διηλεκτρικά υλικά με απώλειες για υπολογισμό εκτός της χωρητικότητας και της αντίστοιχης γωνίας απωλειών του διηλεκτρικού.



Σχ. 89 Κύκλωμα για την μέτρηση της χωρητικότητας της διάταξης των ηλεκτροδίων


B) Σχετικές διηλεκτρικές σταθερές υλικών

-A-	<p> ABS Resin, Lump 2.4-4.1 ABS Resin, Pellet 1.5-2.5 Acenaphthene (70° F) 3.0 Acetal (70° F) 3.6 Acetal Bromide 16.5 Acetal Doxime (68° F) 3.4 Acetaldehyde (41° F) 21.8 Acetamide (68° F) 41 Acetamide (180° F) 59.0 Acetanilide (71° F) 2.9 Acetic Acid (68° F) 6.2 Acetic Acid (36° F) 4.1 Acetic Anhydride (66° F) 21.0 Acetone (77° F) 20.7 Acetone (127° F) 17.7 Acetone (32° F) 1.0159 Acetonitrile (70° F) 37.5 Acetophenone (75° F) 17.3 Acetoxime (24° F) 3 Acetyl Acetone (68° F) 23.1 Acetyl Bromide (68° F) 16.5 Acetyl Chloride (68° F) 15.8 Acetylene Acetone (68° F) 25.0 Acetylene (32° F) 1.0217 Acetylmethyl Hexyl Ketone (66° F) 27.9 Acrylic Resin 2.7 - 4.5 Acteal 21.0-3.6 Air 1 Air (Dry) (68° F) 1.000536 Alcohol, Industrial 16-31 Alkyd Resin 3.5-5 Allyl Alcohol (58° F) 22.0 Allyl Bromide (66° F) 7.0 Allyl Chloride (68° F) 8.2 Allyl Iodide (66° F) 6.1 Allyl Isothiocyanate (64° F) 17.2 Allyl Resin (Cast) 3.6 - 4.5 Alumina 9.3-11.5 Alumina 4.5 Alumina China 3.1-3.9 Aluminum Bromide (212° F) 3.4 Aluminum Fluoride 2.2 Aluminum Hydroxide 2.2 Aluminum Oleate (68° F) 2.4 Aluminum Phosphate 6.0 Aluminum Powder 1.6-1.8 Amber 2.8-2.9 Aminoalkyd Resin 3.9-4.2 Ammonia (-74° F) 25 Ammonia (-30° F) 22.0 Ammonia (40° F) 18.9 Ammonia (69° F) 16.5 Ammonia (Gas?) (32° F) .0072 </p>	<p> Ammonium Bromide 7.2 Ammonium Chloride 7.0 Amyl Acetate (68° F) 5.0 Amyl Alcohol (-180° F) 35.5 Amyl Alcohol (68° F) 15.8 Amyl Alcohol (140° F) 11.2 Amyl Benzoate (68° F) 5.1 Amyl Bromide (50° F) 6.3 Amyl Chloride (52° F) 6.6 Amyl Ether (60° F) 3.1 Amyl Formate (66° F) 5.7 Amyl Iodide (62° F) 6.9 Amyl Nitrate (62° F) 9.1 Amyl Thiocyanate (68° F) 17.4 Amylamine (72° F) 4.6 Amylene (70° F) 2.0 Amylene Bromide (58° F) 5.6 Amylenetetrararboxylate (66° F) 4.4 Amylmercaptan (68° F) 4.7 Aniline (32° F) 7.8 Aniline (68° F) 7.3 Aniline (212° F) 5.5 Aniline Formaldehyde Resin 3.5 - 3.6 Aniline Resin 3.4-3.8 Anisaldehyde (68° F) 15.8 Anisaldoxine (145° F) 9.2 Anisole (68° F) 4.3 Antimony Trichloride 5.3 Antimony Pentachloride (68° F) 3.2 Antimony Tribromide (212° F) 20.9 Antimony Trichloride (166° F) 33.0 Antimony Trichloride 5.3 Antimony Tricodide (347° F) 13.9 Apatite 7.4 Argon (-376° F) 1.5 Argon (68° F) 1.000513 Arsenic Tribromide (98° F) 9.0 Arsenic Trichloride (150° F) 7.0 Arsenic Trichloride (70° F) 12.4 Arsenic Triiodide (302° F) 7.0 Arsine (-148° F) 2.5 Asbestos 3.0 - 4.8 Ash (Fly) 1.7 - 2.0 Asphalt (75° F) 2.6 Asphalt, Liquid 2.5-3.2 Azoxyanisole (122° F) 2.3 Azoxybenzene (104° F) 5.1 Azoxyphenitole (302° F) 6.8 </p>
------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------



<p style="text-align: center; font-size: 2em; font-weight: bold; color: green;">-B-</p>	<p>Bakelite 3.5-5.0 Ballast 5.4-5.6 Ballmill Feed (Cement) 4.5 Balm, Refuse 3.1 Barium Chloride 9.4 Barium Chloride (Anhyd) 11.0 Barium Chloride (2h2O) 9.4 Barium Nitrate 5.8 Barium Sulfate (60° F) 11.4 Barley Flour 3.0 - 4.0 Barley Powder 3.0-4.0 Beeswax 2.7 - 3.0 Benzal Chloride (68° F) 6.9 Benzaldehyde (68° F) 17.8 Benzaldoxime (68° F) 3.8 Benzene (68° F) 2.3 Benzene (275° F) 2.1 Benzene (700° F) 1.0028 Benzil (202° F) 13.0 Benzonitrile (68° F) 26.0 Benzophenone (122° F) 11.4 Benzophenone (68° F) 13.0 Benzotrichloride (68° F) 7.4 Benzoyl Chloride (70° F) 22.1 Benzoyl Chloride (32° F) 23.0 Benzoylacetone (68° F) 29.0 Benzyl Acetate (70° F) 5.0 Benzyl Alcohol (68° F) 13.0 Benzyl Benzoate (68° F) 4.8 Benzyl Chloride (68° F) 6.4 Benzyl Cyanide (68° F) 18.3 Benzyl Cyanide (155° F) 6.0 Benzyl Salicylate (68° F) 4.1 Benzylamine (68° F) 4.6 Benzylethylamine (68° F) 4.3 Benzylmethylamine (67° F) 4.4 Beryl 6.0 Biphenyl 20 Biwax 2.5 Bleaching Powder 4.5 Bone Black 5.0-6.0 Bornyl Acetate (70° F) 4.6 Boron Bromide (32° F) 2.6 Boronyl Chloride (202° F) 5.2 Bromaceytal Bromide 12.6 Bromal (70° F) 7.6 Bromine (68° F) 3.1 Bromine (32° F) 1.0128 Bromo-2-Ethoxypentane (76° F) 6.5</p>	<p>Bromoacetyl Bromide (68° F) 12.6 Bromoaniline (68° F) 13 Bromoanisole (86° F) 7.1 Bromobenzene (68° F) 5.4 Bromobutylene (68° F) 5.8 Bromobutyric Acid (68° F) 7.2 Bromoctadecane 3.53 Bromodecane (76° F) 4.4 Bromodeodecane (76° F) 4.1 Bromodocosane (130° F) 3.1 Bromodoeane (75° F) 4.07 Bromoform (68° F) 4.4 Bromoheptane (76° F) 5.3 Bromohexadecane (76° F) 3.7 Bromohexane (76° F) 5.8 Bromoisovaleric Acid (68° F) 6.5 Bromomethane (32° F) 9.8 Bromonaphthalene (66° F) 5.1 Bromooctadecane (86° F) 3.5 Bromopentadecane (68° F) 3.9 Bromophropionic Acid (68° F) 11.0 Bromotoluene (68° F) 5.1 Bromotridecane (50° F) 4.2 Bromoundecane (15° F) 4.7 Bronyl Chloride (94° F) 5.21 Butane (30° F) 1.4 Butanol (1) (68° F) 17.8 Butanone (68° F) 18.5 Butycic Anhydride (20° F) 12.0 Butyl Chloral (64° F) 10.0 Butyl Chloride (68° F) 9.6 Butyl Oleate (77° F) 4.0 Butyl Stearate (80° F) 3.1 Butylacetate (66° F) 5.1 Butylamine (70° F) 5.4 Butyraldehyde (79° F) 13.4 Butyric Acid (68° F) 3.0 Butyric Anhydride (68° F) 12.0 Butyronitrile (70° F) 20.7</p>
<p style="text-align: center; font-size: 2em; font-weight: bold; color: green;">-C-</p>	<p>Cable Oil (80° F) 2.2 Cabondioxide (68° F) 1.000921 Calcim Fluoride 7.4 Calcite 8.0 Calcium 3.0 Calcium Carbonate 6.1-9.1 Calcium Fluoride 7.4 Calcium Oxide, Granule 11.8</p>	<p>Chloroform (68° F) 4.8 Chloroform (212° F) 3.7 Chloroheptane (71° F) 5.5 Chlorohexanone Oxime (192° F) 3.0 Chlorohydrate (68° F) 3.3 Chloromethane -4 12.6 Chloronaphthalene (76° F) 5.0 Chlorooctane (76° F) 5.1</p>

Calcium Sulfate 5.6	Chlorophetane 5.4
Calcium Sulfate (H ₂ O) 5.6	Chlorotoluene (68° F) 4.7
Calcium Superphosphate 14-15	Chlorotoluene, Liquid 4-4.5
Camphanedione (398° F) 16.0	Cholesterin 2.86
Camphene (68° F) 2.7	Cholestral (80° F) 2.9
Camphene (104° F) 2.3	Chorine (170° F) 1.7
Campher, Crystal 10-11	Chrome, Ore 7.7-8.0
Camphoric Imide 4 (80° F) 5.5	Chrome, Pure 12
Camphorpinacone (68° F) 3.6	Chromite 4.0-4.2
Caprylic Acid (18° F) 3.2	Chromyl Chloride (68° F) 2.6
Caproic Acid (160° F) 2.6	Cinnamaldehyde (75° F) 16.9
Caprolactam Monomer 1.7 - 1.9	Cis-3-Hexene (76° F) 2.1
Caprylic Acid (65° F) 3.2	Citraconic Anhydride (68° F) 40.3
Carbide 5.8 - 7.0	Citraconic Nitrile 27
Carbide, Powder 5.8-7.0	Clay 1.8 - 2.8
Carbon Black 2.5 - 3.0	Clinker (Cement) 2.7
Carbon Dioxide (32° F) 1.6	Coal Tar 2.0-3.0
Carbon Dioxide, Liquid 1.6	Coal, Powder, Fine 2-4
Carbon Disulfide, Liquid 2.6	Cocaine (68° F) 3.1
Carbon Disulphide (68° F) 2.6	Coffee Refuse 2.4-2.6
Carbon Disulphide (180° F) 2.2	Coke 1.1 - 2.2
Carbon Tetrachloride (68° F) 2.2	Compound 3.6
Carnauba Wax 2.9	Copper Catalyst 6.0 - 6.2
Carvenone (68° F) 18.4	Copper Oleate (68° F) 2.8
Carvol (64° F) 11.2	Copper Oxide 18.1
Carvone (71° F) 11.0	Corderite 2.5 - 5.4
Casein 6.1 - 6.8	Corn 5-10
Casein Resin 6.7	Corn (Dry Granulars) 1.8
Cassiterite 23.4	Corn, Refuse 2.3-2.6
Castor Oil (60° F) 4.7	Corning Glass 6.5
Castor Oil (80° F) 2.6	Cotton 1.3-1.4
Castor Oil (Hydrogenated) (80° F) 10.3	Cotton Seed Oil 3.1
Cedrene (76° F) 3.2	Co ₂ (32° F) 1.6
Cellophane 3.2-6.4	Creosol (63° F) 10.6
Celluloid 3.3-11	Cresol (75° F) 5.0
Cellulose 3.2-7.5	Cresol, Liquid 9-11
Cellulose Acetate 3.2-7	Crotonic Nitric (68° F) 28.0
Cellulose Acetate (Molding) 3.2 - 7.0	Crystale 3.5-4.7
Cellulose Acetate (Sheet) 4.0 - 5.5	Cumaldehyde (59° F) 11.0
Cellulose Acetate Butyrate 3.2 - 6.2	Cumene (68° F) 2.4
Cellulose Nitrate (Proxylin) 6.4	Cumicaldehyde (58° F) 10.7
Cement 1.5 - 2.1	Cupric Oleate 2.8
Cement (Plain) 1.5 - 2.1	Cupric Oxide (60° F) 18.1
Cement, Portland 2.5-2.6	Cupric Sulfate 10.3
Cement, Powder 5-10	Cupric Sulfate (Anhyd) 10.3
Cereals (Dry) 3.0 - 5.0	Cupric Sulfate (5H ₂ O) 7.8
Cerese Wax 2.4	Cyanoacetic Acid (40° F) 33.0
Cesium Iodine 5.6	Cyanoethyl Acetate (68° F) 19.3
Cetyl Iodide (68° F) 3.3	Cyanogen (73° F) 2.6
Charcoal 1.2-1.81	Cyclohexane (20° F) 2.0
Chinaware, Hard 4-7	Cyclohexanone (68° F) 18.2
Chloracetic Acid (140° F) 12.3	Cycloheptasiloxane (68° F) 2.7
Chloracetone 29.8	Cyclohexane (68° F) 2.0
Chloral (68° F) 4.9	Cyclohexane, Liquid 18.5
Chlorhexanone Oxime 3	Cyclohexanecarboxylic Acid (88° F) 2.6
Chlorine (-50° F) 2.1	Cyclohexanemethanol (140° F) 9.7
Chlorine (32° F) 2.0	Cyclohexanol (77° F) 15.0
Chlorine (142° F) 1.5	Cyclohexanone (68° F) 18.2
Chlorine, Liquid 2	Cyclohexanone Oxime (192° F) 3.0

	<p>Chloroacetic Acid (68° F) 21.0 Chloroacetone (68° F) 29.8 Chlorobenzene (77° F) 5.6 Chlorobenzene (100° F) 4.7 Chlorobenzene (230° F) 4.1 Chlorobenzine, Liquid 5.5-6.3 Chlorocyclohexane (76° F) 7.6 Chloroform (32° F) 5.5</p>	<p>Cyclohexene (68° F) 18.3 Cyclohexylamine-5 5.3 Cyclohexylphenol (130° F) 4.0 Cyclohexyltrifluoromethane-1 (68° F) 11.0 Cyclopentane (68° F) 2.0 Cymene 62 2.3</p>
-D-	<p>D-Cocaine 3.1 D.M.T. (Dacron Powder) 1.33 Decahydronaphtholene (68° F) 2.2 Decamethylcyclopentasiloxane (68° F) 2.5 Decamethyltetrasiloxane (68° F) 2.4 Decanal 8.1 Decane (68° F) 2.0 Decanol (68° F) 8.1 Decylene (62° F) 2.7 Decyne (68° F) 2.2 Deuterium (68° F) 1.3 Deuterium Oxide (77° F) 78.3 Dextrin 2.2-2.4 Diacetoxybutane (76° F) 6.64 Diallyl Sulfide (68° F) 4.9 Diamond 5.5 - 10.0 Diaphenylmethane 2.7 Diaplmitin 3.5 Dibenzofuran (212° F) 3.0 Dibenzyl Sebacate (68° F) 4.6 Dibenzylamine (68° F) 3.6 Dibroheptane (24° F) 5.08 Dibromobenzene (68° F) 8.8 Dibromobutane (68° F) 5.7 Dibromoethylene (Cis-1, 2) (32° F) 7.7 Dibromoheptane (76° F) 5.1 Dibromohexane (76° F) 5.0 Dibromomethane (50° F) 7.8 Dibromopropane (68° F) 4.3 Dibromopropyl Alcohol (70° F) 9.1 Dibutyl Phthalate (86° F) 6.4 Dibutyl Sebacate (86° F) 4.5 Dibutyl Tartrate 109 9.4 Dichloroacetic Acid (20° F) 10.7 Dichloroacetic Acid (72° F) 8.2 Dichloroacetone (68° F) 14.0 Dichlorobenzene (127° F) 2.8 Dichloroethane (68° F) 16.7 Dichloroethane (1,2)(77° F) 10.3 Dichloroethylene (62° F) 4.6 Dichloromethane (68° F) 9.1 Dichlorostyrene (76° F) 2.6 Dichlorotoluene (68° F) 6.9 Dictyl Phthalate 5.1 Dicyclohexyl Adipate (95° F) 4.8 Diebenzylamine (68° F) 3.6 Diethyl Benzalmalonate (32° F) 8.0 Diethyl Disulfide (66° F) 15.9 Diethyl DI-Malate (64° F) 10.2 Diethyl Glutarate (86° F) 6.7</p>	<p>Diethyl Sulfide (68° F) 7.2 Diethyl Sulfite (68° F) 15.9 Diethyl Tartrate (68° F) 4.5 Diethyl Zinc (68° F) 2.6 Diethyl 1-Malate (68° F) 9.5 Diethyl-Dimalate 10.2 Diethylamine (68° F) 3.7 Diethylaniline (66° F) 5.5 Dihydrocaroone (66° F) 8.7 Dihydrocarvone (66° F) 8.5 Diimylamine (64° F) 2.5 Dioamylene (62° F) 2.4 Diiodoethylene 1 (80° F) 4.0 Diiodomethane (77° F) 5.3 Diisoamyl (62° F) 2.0 Diisoamylene 2.4 Diisobutylamine (71° F) 2.7 Dimethoxybenzene (73° F) 4.5 Dimethyl Ethyl (68° F) 11.7 Dimethyl Ethyl Carbinol (68° F) 11.7 Dimethyl Malonate (68° F) 10.4 Dimethyl Oxalate (68° F) 3.0 Dimethyl Pentane (20° F) 1.912 Dimethyl Phthalate (75° F) 8.5 Dimethyl Sulfate (68° F) 55.0 Dimethyl Sulfide (68° F) 6.3 Dimethyl-1-Hydroxybenzene (62° F) 4.8 Dimethyl-2-Hexane (68° F) 2.4 Dimethylamine (32° F) 6.3 Dimethylaniline (68° F) 4.4 Dimethylbromoethylene (68° F) 6.7 Dimethylheptane (68° F) 1.9 Dimethylpentane (68° F) 1.9 Dimethylquinoxaline (76° F) 2.3 Dimethyltoudine (68° F) 3.3 Dinitrogen Oxide (32° F) 1.6 Dinitrogen Tetroxide (58° F) 2.5 Dioctyl Phthalate (76° F) 5.1 Dioxane 1,4 (77° F) 2.2 Dipalmitin (161° F) 3.5 Dipentene (68° F) 2.3 Dipenylamine (125° F) 3.3 Diphemylethane (230° F) 2.4 Diphemylethane (62° F) 12.6 Diphenyl 1(66° F) 2.5 Diphenyl Ether (82° F) 3.9 Diphenylamine (124° F) 3.3 Diphenylethane (110° F) 2.38 Diphenytmethane (62° F) 2.6 Dipropyl Ketone (62° F) 12.6</p>

	Diethyl I-Malate 9.5 Diethyl Ketone (58° F) 17.3 Diethyl L-Malate (68° F) 9.5 Diethyl Malonate (70° F) 7.9 Diethyl Oxalate (70° F) 8.2 Diethyl Oxaloacetate (66° F) 6.1 Diethyl Racemate (68° F) 4.5 Diethyl Sebacate (86° F) 5.0 Diethyl Succinate (86° F) 6.6 Diethyl Succinosuccinate (66° F) 2.5	Dipropylamine (70° F) 2.9 Distearin (172° F) 3.3 Docosane (122° F) 2.0 Dodecamethylcyclohexisiloxane (68° F) 2.6 Dodecamethylpentasiloxane (68° F) 2.5 Dodecane (68° F) 2.0 Dodecanol (76° F) 6.5 Dodecyne (76° F) 2.2 Dolomite 6.8-8.0 Dowtherm (70° F) 3.4
	Ebonite 2.5-2.9 Emery Sand 16.5 Epichlorhydrin (68° F) 22.9 Epoxy Resin (Cast) 3.6 Ethanediamine (68° F) 14.2 Ethanethiol (58° F) 6.9 Ethanethiolic Acid (68° F) 13.0 Ethanol (77° F) 24.3 Ethelene Diamine (18° F) 16.0 Ethelene Oxide -1 13.9 Ethoxy-3-Methylbutane (68° F) 4.0 Ethoxybenzene (68° F) 4.2 Ethoxyethyl Acetate (86° F) 7.6 Ethoxynaphthalone (66° F) 3.3 Ethoxypentane (73° F) 3.6 Ethoxytoluene (68° F) 3.9 Ethyl Acetate (77° F) 6.0 Ethyl Acetoacetate (71° F) 15.9 Ethyl Acetoneoxalate (66° F) 16.1 Ethyl Acetophenoneoxalate (66° F) 3.3 Ethyl Alcohol (77° F) 24.3 Ethyl Alcohol (See Ethanol) Ethyl Amyl Ether (68° F) 4.0 Ethyl Benzene (68° F) 2.5 Ethyl Benzoate (68° F) 6.0 Ethyl Benzoylacetate (68° F) 12.8 Ethyl Benzoylacetate (70° F) 8.6 Ethyl Benzyl Ether (68° F) 3.8 Ethyl Bromide (64° F) 4.9 Ethyl Bromoisobutyrate (68° F) 7.9 Ethyl Bromopropionate (68° F) 9.4 Ethyl Butyrate (66° F) 5.1 Ethyl Carbonate (68° F) 3.1 Ethyl Carbonate (121° F) 14.2 Ethyl Cellulose 2.8 - 3.9 Ethyl Chloracetate (68° F) 11.6 Ethyl Chloroformate (68° F) 11.3 Ethyl Chloropropionate (68° F) 10.1 Ethyl Cinnamate (66° F) 5.3 Ethyl Cyanoacetate (68° F) 27.0 Ethyl Cyclobutane (68° F) 2.0 Ethyl Dodecanoate (68° F) 3.4 Ethyl Ether (-148° F) 8.1 Ethyl Ether (-40° F) 5.7 Ethyl Ether (68° F) 4.3 Ethyl Ethoxybenzoate (70° F) 7.1 Ethyl Formate (77° F) 7.1 Ethyl Formylphenylacetate (68° F) 3.0	Ethyl Fumarate (73° F) 6.5 Ethyl Hydroxy-Tetracarboxylate 5.9 Ethyl Hydroxy-Tetrocarboxylate 2.7 Ethyl Hydroxymethylenephylacet 5.00 Ethyl Hydroxymethylenomalonate 6.6 Ethyl Iodide (68° F) 7.4 Ethyl Isothiocyanate (68° F) 19.7 Ethyl Levulinete (70° F) 12.1 Ethyl Maleate (73° F) 8.5 Ethyl Mercaptan (68° F) 8.0 Ethyl Nitrate (68° F) 19.7 Ethyl Oleate (80° F) 3.2 Ethyl Palmitate (68° F) 3.2 Ethyl Phenylacetate (70° F) 5.4 Ethyl Propionate (68° F) 5.7 Ethyl Salicylate (70° F) 8.6 Ethyl Silicate (68° F) 4.1 Ethyl Stearate (104° F) 3.0 Ethyl Thiocyanate (68° F) 29.6 Ethyl Trichloracetate (68° F) 7.8 Ethyl Undecanoate (68° F) 3.6 Ethyl Valerate (68° F) 4.7 Ethyl 1-Brobutyrate (68° F) 8.0 Ethyl 2-Iodopropionate (68° F) 8.8 Ethylamine (70° F) 6.3 Ethylaniline (68° F) 5.9 Ethylbenzene (76° F) 3.0 Ethylene Chloride (68° F) 10.5 Ethylene Chlorohydrin (77° F) 26.0 Ethylene Cyanide (136° F) 58.3 Ethylene Diamine (64° F) 16.0 Ethylene Glycol (68° F) 37.0 Ethylene Iodide 3.4 Ethylene Oxide 25 14.0 Ethylene Tetraflouride 1.9-2.0 Ethylenechlorohydrin (75° F) 25.0 Ethylenediamine (64° F) 16.0 Ethylic Resin 2.2-2.3 Ethylpentane (68° F) 1.9 Ethyltoluene (76° F) 2.2 Etibine (-58° F) 2.5 Eugenol (64° F) 6.1

<p style="text-align: center; font-size: 2em; font-weight: bold;">-F-</p>	<p>Fab (From Box, 8% Moisture) 1.3 Fenchone (68° F) 12.0 Fermanium Tetrachloride (76° F) 2.4 Ferric Oleate (68° F) 2.6 Ferrochromium 1.5-1.8 Ferromanganese 5.0-5.2 Ferrous Oxide (60° F) 14.2 Ferrous Sulfate (58° F) 14.2 Flour 2.5-3.0 Flourine (-332° F) 1.5 Flourspar 6.8 Fluorotoluene (86° F) 4.2 Fly Ash 1.9 - 2.6 Formalin 23</p>	<p>Formamide (68° F) 84.0 Formic Acid (60° F) 58.0 Forsterite 6.2 Freon 11 (70° F) 3.1 Freon 113 (70° F) 2.6 Freon 12 (70° F) 2.4 Fuller's Earth 1.8 - 2.2 Furan (77° F) 3.0 Furfural (68° F) 42.0 Furfuraldehyde (68° F) 41.9</p>
<p style="text-align: center; font-size: 2em; font-weight: bold;">-G-</p>	<p>Gasoline (70° F) 2.0 Gerber Oatmeal (In Box) 1.5 Germanium Tetrachloride (77° F) 2.4 Glass 3.7-10 Glass (Silica) 3.8 Glass, Bead 3.1 Glass, Granule 6-7 Glass, Raw Material 2.0-2.5 Glucosheptitol (248° F) 27.0 Glycerin, Liquid 47-68 Glycerol (77° F) 42.5 Glycerol (32° F) 47.2</p>	<p>Glycerol Phthalate (Cast Alkyd) 3.7 - 4.0 Glyceryl Triacetate (70° F) 6.0 Glycol (77° F) 37.0 Glycol (122° F) 35.6 Glycolic Nitrile (68° F) 27.0 Grain 3-8 Graphite 12-15 Guaiacol 0 11.0 Gypsum 2.5-6.0</p>
<p style="text-align: center; font-size: 2em; font-weight: bold;">-H-</p>	<p>Hagemann Ester (68° F) 10.6 Halowax 4.5 Heavy Oil 3 Heavy Oil, C 2.6 Helium-3(58° F) 1.055 Helium, Liquid 1.05 Heptadecanone (140° F) 5.3 Heptane (68° F) 1.9 Heptane, Liquid 1.9-2.0 Heptanoic Acid 2.5 Heptanoic Acid (71° F) 2.59 Heptanone (68° F) 11.9 Heptanoic Acid (160° F) 2.6 Heptyl Alcohol (70° F) 6.7 Hexamethyldisiloxane (68° F) 2.2 Hexane (-130° F) 2.0 Hexanol (77° F) 13.3 Hexanone (59° F) 14.6 Hexdecamethylcycloheptasiloxane (68° F) 2.7 Hexyl Iodide (68° F) 6.6 Hexylene (62° F) 2.0 Hexyliodide (68° F) 6.6 Hydrazine (68° F) 52.0 Hydrochloric Acid (68° F) 4.60 Hydrocyanic Acid (70° F) 2.3 Hydrocyanic Acid (32° F) 158.0</p>	<p>Hydrogen (440° F) 1.23 Hydrogen (212° F) 1.000284 Hydrogen Iodide (72° F) 2.9 Hydrogen Bromide (24° F) 3.8 Hydrogen Bromide (-120° F) 7.0 Hydrogen Chloride (82° F) 4.6 Hydrogen Chloride (-188° F) 12.0 Hydrogen Cyanide (70° F) 95.4 Hydrogen Fluoride (32° F) 84.2 Hydrogen Fluoride (-100° F) 17 Hydrogen Iodide(72° F) 2.9 Hydrogen Peroxide (32° F) 84.2 Hydrogen Peroxide 100% 70.7 Hydrogen Peroxide 35% 121.0 Hydrogen Sulfide (-84° F) 9.3 Hydrogen Sulfide (48° F) 5.8 Hydrofluoric Acid (32° F) 83.6 Hydroxy-4-Methy-2-Pentanone (76° F) 18.2 Hydroxymethylene Camphor (86° F) 5.2 Hydroxymethylenehydroxymethyleneacetate 7.8 Hydroxymethylenebenzyl Cyanide (68° F) 6.0 Hydrozine (68° F) 52.9</p>

	<p> Ido-Iodoheptadecane (68° F) 3.5 Idoheptane (71° F) 4.9 Idohexane (68° F) 5.4 Idomethane (68° F) 7.0 Idopoctane (76° F) 4.6 Idotoluene (68° F) 6.1 Ilmenite 6.0 - 7.0 Inadol (140° F) 7.8 Indonol (60° F) 7.8 Iodine (107° F) 118.0 Iodine 11 Iodine (250° F) 118.0 Iodine (Granular) 4.0 Iodioctane 4.6 Iodoctane (24° F) 4.62 Iodobenzene (68° F) 4.6 Iodoheptane (22° F) 4.92 Idohexane (20° F) 5.37 Iodomethane (20° F) 7.0 Idotoluene (20° F) 6.1 Iron Oxide 14.2 Iso Butyl Alcohol 18.7-31.7 Iso Butyl Iodide 5.8 Iso Butyl Nitrate 11.9 Iso Butylamine 4.5 Iso Butyric Acid 2.7 Iso Butyronitrile 20.8 Iso Valeric Acid (68° F) 2.6 Iso-Butyl Alcohol (-112° F) 31.7 Iso-Butyl Alcohol (32° F) 20 .5 Iso-Butyl Alcohol (68° F) 18.7 Iso-Butyl Iodide (68° F) 5.8 Iso-Butyl Nitrate (66° F) 11.9 Iso-Butylacetate (68° F) 5.6 Iso-Butylamine (70° F) 4.5 Iso-Butyric Acid (68° F) 2.7 Iso-Butyronitrile 23.9- 20.8 Iso-Butyronitrile (75° F) 20.8 Iso-Iodoheptadecane 3.5 Iso-Propyl Alcohol (68° F) 18.3 Iso-Propyl Nitrate (66° F) 11.5 Iso-Valeric Acid (68° F) 2.7 Isoamyl Valerate (19° F) 3.6 Isoamyl Acetate (68° F) 5.6 Isoamyl Alcohol (74° F) 15.3 Isoamyl Bromide (76° F) 6.1 Isoamyl Butyrate (68° F) 3.9 Isoamyl Chloracetate (68 F) 7.8 Isoamyl Chloride (64° F) 6.4 Isoamyl Chloroacetate 7.8 </p>	<p> Isoamyl Chloroformate (68° F) 7.8 Isoamyl Iodide (65° F) 5.6 Isoamyl Propionate (68° F) 4.2 Isoamyl Salicylate (68° F) 5.4 Isoamyl Valerate (66° F) 3.6 Isoamylpropionate 4.2 Isobuthyl Resin 1.4-2.1 Isobutyl Acetate (68° F) 5.6 Isobutyl Alcohol (68° F) 18.7 Isobutyl Benzoate (68° F) 5.9 Isobutyl Bromide (20° F) 4.0 Isobutyl Bromide (68° F) 6.6 Isobutyl Butyrate (68° F) 4.0 Isobutyl Chloride (68° F) 7.1 Isobutyl Chloroformate (68° F) 9.2 Isobutyl Cyanide (74° F) 13.3 Isobutyl Formate (66° F) 6.5 Isobutyl Iodide (68° F) 5.8 Isobutyl Nitrate (66° F) 11.9 Isobutyl Rinoleate (70° F) 4.7 Isobutyl Valerate (66° F) 3.8 Isobutylamine (70° F) 4.5 Isobutylbenzene (62° F) 2.3 Isobutylbenzoate (68° F) 5.9 Isobutylene Bromide (68° F) 4.0 Isobutyric Acid (68° F) 2.6 Isobutyric Acid (122° F) 2.7 Isobutyric Anhydride (68° F) 13.9 Isobutyronitrile (77° F) 20.8 Isocapronitrile (68° F) 15.7 Isooctane 2.1-2.3 Isophthalic Acid 1.4 Isoprene (77° F) 2.1 Isopropyl Alcohol 18.3 Isopropyl Benzene (68° F) 2.4 Isopropyl Nitrate 11.5 Isopropylamine (68° F) 5.5 Isopropylether (77° F) 3.9 Isoquinoline (76° F) 10.7 Isosafrol (70° F) 3.4 </p>
	<p> Jet Fuel (Jp4) (70° F) 1.7 Jet Fuel (Military Jp4) 1.7 </p>	

<p style="text-align: center; font-size: 2em; font-weight: bold; color: green;">-K-</p>	<p>Kent Wax 6.5-7.5 Kerosene (70° F) 1.8 Kynar 2.0</p>	
<p style="text-align: center; font-size: 2em; font-weight: bold; color: green;">-L-</p>	<p>Lactic Acid (61° F) 22.0 Lactronitrile (68° F) 38.4 Lad Oxide 25.9 Lead Acetate 2.5 Lead Carbonate (60° F) 18.1 Lead Chloride 4.2 Lead Nitrate 37.7 Lead Nomoxide (60° F) 25.9 Lead Oleate (64° F) 3.2 Lead Oxide 25.9 Lead Sulfate 14.3 Lead Sulfite 17.9</p>	<p>Lead Tetrachloride (68° F) 2.8 Lime 2.2 - 2.5 Limonene (68° F) 2.3 Linde 5a Molecular Sieve, Dry 1.8 Linoleic Acid (32° F) 2.6 - 2.9 Linseed Oil 3.2-3.5 Liquified Air 1.5 Liquified Hydrogen 1.2 Lityium Chloride 11.1 Lonone (65° F) 10.0 LPG 1.6-1.9</p>
<p style="text-align: center; font-size: 2em; font-weight: bold; color: green;">-M-</p>	<p>M-Bromoaniline (66° F) 13.0 M-Bromotoluene (137° F) 5.4 M-Chloroaniline (66° F) 13.4 M-Chlorotoluene (68° F) 5.6 M-Creosol 5 P-Cresol (24° F) 5.0 O-Cresol (77° F) 11.5 M-Dichlorobenzene (77° F) 5.0 M-Dinitro Benzene (68° F) 2.8 M-Nitrotoluene (68° F) 23.8 M-Sylene 2.4 M-Toluidine (64° F) 6.0 M-Xylene (68° F) 2.4 Maganese Dioxide 5-5.2 Magnesium Oxide 9.7 Magnesium Sulfate 8.2 Malachite 7.2 Maleic Anhydride (140° F) 51.0 Malolic Anhydride 51 Malonic Nitrile (97° F) 47.0 Mandelic Nitrile (73° F) 18.1 Mandelitrile (73° F) 17.0 Mannitol (71° F) 3.0 Margarine, Liquid 2.8-3.2 Melamine Formaldehyde (MF) (MF) Molding Resin 5.5 - 6.0 (MF) With Alpha Cellulose Filler 7.2 - 8.2 (MF) With Asbestos Filler 6.1 - 6.7 (MF) With Cellulose Filler 4.7 - 7.0 (MF) With Flock Filler 5.0 - 6.0 (MF) With Macerated Fabric Fille 6.5 - 6.9 Melamine Resin 4.7-10.9 Menthol (42° F) 3.95 Menthol (107° F) 4.0 Menthonol (43° F) 2.1 Menthonol (110° F) 2.1 Mercuric Chloride 3.2 Mercurous Chloride 9.4 Mercury (298° F) 1.00074</p>	<p>Methyl Butane (68° F) 1.8 Methyl Butyl Ketone (62° F) 12.4 Methyl Butyrate (68° F) 5.6 Methyl Chloride (77° F) 12.9 Methyl Chloroacetate (68° F) 12.9 Methyl Ether (78° F) 5.0 Methyl Ethyl Ketone (72 ° F) 18.4 Methyl Ethyl Ketoxime (68° F) 3.4 Methyl Formate (68° F) 8.5 Methyl Heptanol (68° F) 5.3 Methyl Iodide (68° F) 7.1 Methyl Kexyl Ketone (62° F) 10.7 Methyl Methacrylate (Cast) 2.7 - 3.2 Methyl Nitrobenzoate (80° F) 27.0 Methyl O-Methoxybenzoate (70° F) 7.8 Methyl P-Toluate (91° F) 4.3 Methyl Propionate (66° F) 5.4 Methyl Propyl Ketone (58° F) 16.8 Methyl Salicylate (68° F) 9.0 Methyl Thiocyanate (68° F) 35.9 Methyl Valerate (66° F) 4.3 Methyl 5 Ketocyclohexylene (68° F) 24.0 Methyl-1-Cyclopentanol (35° F) 6.9 Methyl-2 4-Pentandiol (86° F) 24.4 Methyl-2-Pentanone (68° F) 13.1 Methylal (68° F) 2.7 Methylaniline (68° F) 6.0 Methylbenzylamine (65° F) 4.4 Methylcyclohexanol (68° C) 13.0 Methylcyclohexanone (192° F) 18.0 Methylcyclopentane (68° F) 2.0 Methylene Iodide (70° F) 5.1 Methyleneaceloacetate (70° F) 7.8 Methylenemalonate (72° F) 6.6 Methylenephenylacetate (68° F) 5.0 Methylether, Liquid 5 Methylhexane (68° F) 1.9 Methylisocyanate (69° F) 29.4 Methyloctane (69° F) 30.0</p>

	<p>Mercury Chloride 7-14 Mercury Diethyl (68° F) 2.3 Mesityl Oxide (68° F) 15.4 Mesitylene (68° F) 2.4 Mesitylene 3.4 Methal Cyanoacetate (69° F) 29.4 Methallmine (77° F) 9.4 Methane (-280° F) 1.7 Methane, Liquid 1.7 Methanol (77° F) 32.6 Methylene Idide 5.1 Methoxy-4-Methylphenol (60° F) 11.0 Methoxybenzene (76° F) 4.3 Methoxyethyl Stearate (140° F) 3.4 Methoxyphenol (82° F) 11.0 Methoxytoluene (68° F) 3.5 Methyl Acetate (77° F) 6.7 Methyl Acetophenoneoxalate (64° F) 2.8 Methyl Alcohol (-112° F) 56.6 Methyl Alcohol (32° F) 37.5 Methyl Alcohol (68° F) 33.1 Methyl Benzoate (68° F) 6.6</p>	<p>Methylomine (21° F) 10.5 Methylphenyl Hydrazin (66° F) 7.3 Methylpyridine (2) (68° F) 9.8 Metnoxy-Four-Methyl Phenol 11 Mica 2.6-3.2 Mica 7.0 Mica (Glass Bonded) 6.9 - 9.2 Micanite 1.8-2.6 Mills (Dry Powder) 1.8 Mineral Oil (80° F) 2.1 Monomyristin (158° F) 6.1 Monopalmitin (152° F) 5.3 Monostearin (170° F) 4.9 Morpholine (77° F) 7.3</p>
-N-	<p>N-Butyl Alcohol (66° F) 7.8 N-Butyl Bromide (68° F) 6.6 N-Butyl Formate (-317° F) 2.4 N-Butyl Iodide (77° F) 6.1 N-Butylacetate (19° F) 5.1 N-Butyricacid (68° F) 2.9 N-Hexane (68° F) 1.9 N-Methylaniline (68° F) 6.0 N-Pentane (68° F) 1.8 Naphthy Ethyl Ether (67° F) 3.2 Naphthalene (185° F) 2.3 Naphthalene (68° F) 2.5 Naphthonitrile (70° F) 6.4 Naphthyl Ethyl Ether (67° F) 3.2 Neon (68° F) 1.000127 Neoprene 6-9 Nitric Acid (14° C) 50.0 +/- 10.0 Nitroanisoole (68° F) 24.0 Nitrobenzal Doxime (248° F) 48.1 Nitrobenzene (68° F) 35.7 Nitrobenzene (77° F) 34.8 Nitrobenzene (176° F) 26.3</p>	<p>Nitrobenzyl Alcohol (68° F) 22.0 Nitrocellulose 6.2-7.5 Nitroethane (68° F) 19.7 Nitrogen (336° F) 1.454 Nitrogen (68° F) 1.000580 Nitroglycerin (68° F) 19.0 Nitromethane 22.7-39.4 Nitromethane (68° F) 39.4 Nitrosodimethylamine (68° F) 54.0 Nitrosyl Bromide (4° F) 13.0 Nitrosyl Chloride (10° F) 18.0 Nitrotoluene (68° F) 1.96 Nitrous Oxide (32° F) 1.6 Nonane (68° F) 2.0 Nylon 4.0 - 5.0 Nylon Resin 3.0 - 5.0</p>
-O-	<p>O-Bromotoluene (137° F) 4.3 O-Chlorophenol (66° F) 8.2 O-Chlorotoluene (68° F) 4.5 O-Cresol (77° F) 11.5 O-Dichlorobenzene (77° F) 7.5 O-Nitro Analine (194° F) 34.5 O-Nitrotoluene (68° F) 27.4 O-Toluidine (64° F) 6.3 O-Xylene (68° F) 2.6 Octadecanol 3.42 Octadecanol (136° F) 3.4 Octamethylcyclotetrasiloxane (68° F) 2.4</p>	<p>Oil, Almond (68° F) 2.8 Oil, Cotton Seed (57° F) 3.1 Oil, Grapeseed (61° F) 2.9 Oil, Lemon (70° F) 2.3 Oil, Linseed 3.4 Oil, Olive (68° F) 3.1 Oil, Paraffin (68° F) 2.2 - 4.7 Oil, Petroleum (68° F) 2.1 Oil, Pyranol (68° F) 5.3 Oil, Sesame (55° F) 3.0 Oil, Sperm (68° F) 3.2 Oil, Turpentine (68° F) 2.2</p>

	<p>Octamethyltrisiloxane (68° F) 2.3 Octane (24° F) 1.061 Octane (68° F) 2.0 Octanone (68° F) 10.3 Octene (76° F) 2.1 Octyl Alcohol (64° F) 3.4 Octyl Iodide (68° F) 4.9 Octylene (65° F) 4.1 Oil, Peanut (52° F) 3.0</p>	<p>Oil, Transformer (68° F) 2.2 Oleic Acid (68° F) 2.5 Oleric Acid 2.4-2.5 One-Dichloroethane 10.7 One-Diethoxyethane 3.8 Opal Wax 3.1 Organic Cold Molding Compound 6.0 Oxygen (-315° F) 1.51 Oxygen (68° F) 1.000494</p>
-P-	<p>P-Bromotoluene (137° F) 5.5 P-Chlorophenol (130° F) 9.5 P-Chlorotoluene (68° F) 6.1 P-Cresol (70° F) 5.6 P-Cresol (137° F) 9.9 P-Cymene (63° F) 2.3 P-Dibromobenzene (190° F) 4.5 P-Dichlorobenzine (68° F) 2.86 P-Dichlorobenzine (120° F) 2.4 P-Nitro Aniline (320° F) 56.3 P-Nitrotoluene (137° F) 22.2 P-Toludine 3.0 P-Toluidine (130° F) 5.0 P-Xylene (68° F) 2.3 Paint 5-8 Palmitic Acid (160° F) 2.3 Paper (Dry) 2.0 Paraffin 1.9-2.5 Paraffin Wax 2.1-2.5 Paraldehyde (68° F) 14.5 Paraldehyde (77° F) 13.9 Parawax 2.3 Parrafin Chloride 2.0-2.3 Penanthiene (68° F) 2.8 Pentachlorgethane (60° F) 3.7 Pentadiene 1,3 (77° F) 2.3 Pentane (68° F) 1.8 Pentanol (77° F) 13.9 Pentanone (2) (68° F) 15.4 Pentene (1) (68° F) 2.1 Pentochlorethane 3.7 Perlite 1.3 - 1.4 Petroleum 2.0-2.2 Phenanthrene (230° F) 2.7 Phenathiene (68° F) 2.8 Phenathrene (110° F) 2.72 Phenetole (70° F) 4.5 Phenol (118° F) 9.9 Phenol (104° F) 15.0 Phenol (50° F) 4.3 Phenol Ether (85° F) 9.8 Phenol Formaldehyde Resin (PFR) 4.5 - 5.0 (PFR) With Asbestos Filler 5.0 - 7.0 (PFR) With Glass Fiber Filler 6.6 - 7.0 (PFR) With Mica Filler 4.2 - 5.2 (PFR) With Mineral Filler (Cast) 9.0 - 15.0 (PFR) With Sisal Fiber 3.0 - 5.0 (PFR) With Wood Flour Filler 4.0 - 7.0 Phenol Resin 4.9</p>	<p>Pine Tree Resin, Powder 1.5-1.8 Pinene (68° F) 2.7 Piperidine (68° F) 5.9 Plaster 2.5 - 6.0 Plastic Grain 65-75 Plastic Pellets 1.1-3.2 Plastic Sulphur, Unground 1.5 Platinum Catalyst 6.5 - 7.5 Poly Propylene 1.5 Polyacetal 3.6-3.7 Polyacetal Resin 2.6-3.7 Polyacrylic Ester 3.5 Polyamide 2.5-2.6 Polybutylene 2.2-2.3 Polycaprolactam 2.0 - 2.5 Polycarbonate 2.9-3.0 Polycarbonate Resin 2.9 - 3.0 Polyester Resin 2.8 - 4.5 Polyester Resin (Flexible) 4.1 - 5.2 Polyester Resin (Glass Fiber Filled) 4.0 - 4.5 Polyester Resin (Ridgid Cast) 2.8 - 4.1 Polyether Chloride 2.9 Polyether Resin 2.8-8.1 Polyether Resin, Unsaturated 2.8-5.2 Polyethylene 2.2-2.4 Polyethylene, Pellet 1.5 Polymide 2.8 Polymonochloro Pifluoroethylene 2.5 Polypropylene 1.5 Polypropylene Powder 1.25 Polypropylene, Pellet 1.5-1.8 Polystyrene Resin 2.4 - 2.6 Polystyrol 2.0-2,6 Polysulphonic Acid 2.8 Polytetra Fluoroethylene 2.0 Polyvinyl Alcohol 1.9-2.0 Polyvinyl Chloride 3.4 Polyvinylchloride Resin 5.8 - 6.8 Porcelain 5.0-7.0 Porcelain With Zircon 7.1 - 10.5 Potassium Aluminum Sulphate 3.8 Potassium Carbonate (60° F) 5.6 Potassium Chlorate 5.1 Potassium Chloride 4.6 Potassium Chloronate 7.3 Potassium Iodide 5.6 Potassium Nitrate 5.0 Potassium Sulfate 5.9 Potssium Chloromate 7.3</p>

	Phenol Resin, Cumulated 4.6-5.5 Phenoxyacetylene (76° F) 4.8 Phentidine (70° F) 7.3 Phenyl Acetate (68° F) 6.9 Phenyl Ether (86° F) 3.7 Phenyl Iso Thiocyanate (68° F) 10.7 Phenyl Isocyanate (68° F) 8.9 Phenyl Urethane 2.7 Phenyl-L-Lropane (68° F) 2.7 Phenyl-One-Iropane 2.7 Phenyl-1-Propane (68° F) 1.7 Phenylacetaldehyde (68° F) 4.8 Phenylacetic (68° F) 3.0 Phenylacetone (80° F) 18.0 Phenylethanol (68° F) 13.0 Phenylethyl Acetate (58° F) 4.5 Phenylethylene (77° F) 2.4 Phenylhydrazine (72° F) 7.2 Phenylsalicylate (122° F) 6.3 Phosgene (32° F) 4.7 Phosphine (-76° F) 2.5 Phosphorus (93° F) 4.1 Phosphorus Oxychloride (72° F) 14.0 Phosphorus Pentachloride (320° F) 2.8 Phosphorus Tribromide 3.9 Phosphorus Tribromide (68° F) 3.9 Phosphorus Trichloride (77° F) 3.4 Phosphorus, Red 4.1 Phosphorus, Yellow 3.6 Phosphoryl Chloride (70° F) 13.0 Phosphrous 4.1 Phtalide (166° F) 36.0 Phthalic Acid 5.1-6.3 Phthalide (74° F) 36.0 Pinacolin (62° F) 12.8 Pinacone (75° F) 7.4	Pottasium Chloride 5.0 Propane (Liquid) (32° F) 1.6 Propanediol (68° F) 32 .0 Propanol (177° F) 20.1 Propene (68° F) 1.9 Propionaldehyde (62° F) 18.9 Propionic Acid (58° F) 3.1 Propionic Anhydride (60° F) 18.0 Propionitrile (68° F) 27.7 Propyl Butyrate (68° F) 4.3 Propyl Acetate (68° F) 6.3 Propyl Alcohol (68° F) 21.8 Propyl Benzene (68° F) 2.4 Propyl Bromide (68° F) 7.2 Propyl Butyrate (68° F) 4.3 Propyl Chloroformate (68° F) 11.2 Propyl Ether (78° F) 3.4 Propyl Formate (66° F) 7.9 Propyl Nitrate (64° F) 14.2 Propyl Propionate (68° F) 4.7 Propyl Valerate (65° F) 4.0 Propylene Liquid 11.9 Psuedocumene (60° F) 2.4 Pulegone (68° F) 9.5 Pulezone (66° F) 9.7 PVC, Powder 1.4 Pyrex 4.8 Pyrex Glass 4.3 - 5.0 Pyridine (68° F) 12.5 Pyroceram 3.5-4.5 Pyrrole (63° F) 7.5
-Q-	Quartz 4.2 Quinoline (77° F) 9.0 Quinoline (-292° F) 2.6	
-R-	Reburned Lime 2.2 Refractory (Cast) 6.7 Refractory (For Casting) 1.8 - 2.1 Resorcinol 3.2 Rice (Dry) 3.5 Rice Bran 1.4-2.0 Rouge 1.5 Rouge (Jewelers) 1.5 - 1.6 Rubber 3.0	Rubber (Chlorinated) 3.0 Rubber (Hard) 2.8 Rubber (Isomerized) 2.4 - 3.7 Rubber Cement 2.7-2.9 Rubber Chloride 2.1-2.7 Rubber, Raw 2.1-2.7 Rubber, Sulphurized 2.5-4.6 Ruby 11.3 Rutile 6.7
-S-	Safrol (70° F) 3.1 Salicylaldehyde (68° F) 13.9 Salt 3.0 - 15.0 Sand (Dry) 5.0	Sorbitol (176° F) 33.5 Soy Beans 2.8 Stannec Chloride (72° F) 3.2 Starch 3-5

	<p>Sand (Silicon Dioxide) 3 - 5.0 Santowax (70° F) 2.3 Selenium 6.1-7.4 Selenium 11 Selenium (482° F) 5.4 Selevium (249° F) 5.4 Sesame 1.8-2.0 Shellac 2.0-3.8 Silica Aluminate 2 Silica Sand 2.5-3.5 Silicon 11.0 - 12.0 Silicon Dioxide 4.5 Silicon Tetrachloride (60° F) 2.4 Silicone Molding Compound (SMC) (SMC) (Glass Fiber Filled) 3.7 Silicone Oil 2.2-2.9 Silicone Resin, Liquid 3.5-5.0 Silicone Rubber 3.2-9.8 Silicone Varnish 2.8-3.3 Silk 2.5-3.5 Silver Bromide 12.2 Silver Chloride 11.2 Silver Cyanide 5.6 Slaked Lime, Powder 2.0-3.5 Slate 6.0-7.5 Smithsonite 9.3 Soap Powders 1.2 - 1.7 Sodium Carbonate 5.3 - 8.4 Sodium Carbonate (Anhyd) 8.4 Sodium Carbonate (10h₂O) 5.3 Sodium Chloride 5.9 Sodium Chloride (Salt) 6.1 Sodium Cyanide 7.55 Sodium Dichromate 2.9 Sodium Nitrate 5.2 Sodium Oleate (68° F) 2.7 Sodium Perchlorate 5.4 Sodium Phosphate 1.6-1.9 Sodium Porchlorate 5.4 Sodium Sulphide 5</p>	<p>Starch, Paste 1.7-1.8 Stearic Acid (160° F) 2.3 Stearine 2.3 Steatite 5.5 - 7.5 Styrene (77° F) 2.4 Styrene (Modified) 2.4 - 3.8 Styrene (Phenylethane) (77° F) 2.4 Styrene Resin 2.3-3.4 Succinamide (72° F) 2.9 Succinic Acid (78° F) 2.4 Sucrose 3.3 Sucrose (Mean) 3.3 Sugar 3.0 Sugar, Granulated 1.5-2.2 Sulfur 1.6 - 1.7 Sulfur Dioxide (-4° F) 17.6 Sulfur Dioxide (32° F) 15.0 Sulfur Monochloride (58° F) 4.8 Sulfur Trioxide (64° F) 3.1 Sulfurous Oxychloride (72° F) 9.1 Sulfuryl Chloride (72° F) 10.0 Sulphur(244° F) 3.5 Sulphur (450° F) 3.5 Sulphur Dioxide (32° F) 15.6 Sulphur Trioxide (70° F) 3.6 Sulphur, Liquid 3.5 Sulphur, Powder 3.6 Sulphuric Acid (68° F) 84.0 Sulfuric Acid (25° C) 100.0 Supphuric Oxychloride (72° F) 9.2 Syrup 50-80 Syrup Wax 2.5-2.9</p>
<p style="text-align: center;">T</p>	<p>Tantalum Oxide 11.6 Tartaric Acid (68°F) 6.0 Tartaric Acid (14° F) 35.9 Teflon 2.0 Teflon (4f) 2.0 Teflon, FEP 2.1 Teflon, PCTFE 2.3-2.8 Teflon, PTFE 2 Tepineol 2.8 Terpinene (70° F) 2.7 Terpineol (72° F) 2.8 Tetrabromoethane (72° F) 7.0 Tetrachloroethylene (70° F) 2.5 Tetradecamethyltetradecamethylcycloheptasiloxan 2.7 Tetradecamethylhexosiloxane (68° F) 2.5 Tetradecanol (100° F) 4.7 Tetraethyl Amylenetetra-carboxylate 4.40</p>	<p>Totane (111° F) 5.5 Tourmaline 6.3 Trans-3-Hexene (76° F) 2.0 Transmission Oil (80° F) 2.2 Tribromopropane (68° F) 6.4 Tributylphosphate (86° F) 8.0 Trichlorethylene 3.4 Trichloroacetic Acid (140° F) 4.6 Trichloroethane 7.5 Trichloroethylene (61° F) 3.4 Trichlorololuene (70° F) 6.9 Trichloropropane (76° F) 2.4 Trichlorotoluene (69° F) 6.9 Trichloroxoluene 6.9 Tricosanone (176° F) 4.0 Tricresyl Phosphate (104° F) 6.9 Triethyl Aconitate (68° F) 6.4 Triethyl Aluminum (68° F) 2.9</p>

	<p>Tetraethyl Hexane-1-Phenyl Tetracarboxylate (66° F) 5.9</p> <p>Tetraethyl Pentane Diphenyl Tetracarboxylate (68° F) 2.7</p> <p>Tetraethyl Propane Tetracarboxylate (66° F) 5.2</p> <p>Tetraethyl Propylene Tetracarboxylate (66° F) 6.0</p> <p>Tetraethyl Silicate (68° F) 4.1</p> <p>Tetrafluoroethylene 2.0</p> <p>Tetrahydro-B-Naphthol (68° F) 11.0</p> <p>Tetranitromethane (68° F) 2.2</p> <p>Tetratriacontadiene (76° F) 2.8</p> <p>Thallium Chloride 46.9</p> <p>Thinner 3.7</p> <p>Thioacetic Acid (68° F) 13.0</p> <p>Thionyl Bromide (68° F) 9.1</p> <p>Thionyl Chloride (68° F) 9.3</p> <p>Thiophene (60° F) 2.8</p> <p>Thiophosphoryl Chloride (70° F) 5.8</p> <p>Thorium Oxide 10.6</p> <p>Thrichloroethylene (61° F) 3.4</p> <p>Thujone (32° F) 10.0</p> <p>Tide (Loose From Box) 1.6</p> <p>Tin Tetrachloride (68° F) 2.9</p> <p>Titanium Tetrachloride (68° F) 2.8</p> <p>Titanium Dioxide 110.00</p> <p>Titanium Oxide 40-50</p> <p>Titanium Tetrachloride (68 Degrees F) 2.8</p> <p>Tobacco 1.6 - 1.7</p> <p>Tobacco Dust (6% Moisture) 1.7</p> <p>Toluene (68° F) 2.4</p> <p>Toluene, Liquid 2.0-2.4</p> <p>Toluidine (68° F) 6.0</p> <p>Tolunitrile (73° F) 18.8</p> <p>Tolyl Methyl Ether (68° F) 3.5</p>	<p>Triethyl Ethanetricarboxylate (66° F) 6.5</p> <p>Triethyl Isoaconitate (68° F) 7.2</p> <p>Triethylamine (21° F) 3.2</p> <p>Triethylamine (77° F) 2.4</p> <p>Trifluoroactic Acid (68° F) 39.0</p> <p>Trifluorotoluene (86° F) 9.2</p> <p>Trimethyl Borate (68° F) 8.2</p> <p>Trimethyl-3-Heptene (68° F) 2.2</p> <p>Trimethylamine (77° F) 2.5</p> <p>Trimethylbenzene (68° F) 2.3</p> <p>Trimethylbutane (68° F) 1.9</p> <p>Trimethylpentane 1.9</p> <p>Trimethylpentane (68° F) 2.9</p> <p>Trimethylsulfanilic Acid (64° F) 89.0</p> <p>Trinitrobenzene (68° F) 2.2</p> <p>Trinitrotoluene (69° F) 22.0</p> <p>Triolein (76° F) 3.2</p> <p>Triphenylmethane (212° F) 2.3</p> <p>Tripolmitin (140° F) 2.9</p> <p>Tristearin (158° F) 2.8</p> <p>Turpentine (Wood) (68° F) 2.2</p> <p>Two-Dichloroethane 10.7</p>
-U-	<p>Undecane (68° F) 2.0</p> <p>Undecanone (58° F) 8.4</p> <p>Urea 5-8</p> <p>Urea (71° F) 3.5</p> <p>Urea Formaldehyde (Uf Degrees F)</p> <p>Urea Formaldehyde (Cellulose Filler) 6.4 - 6.9</p> <p>Urea Resin 6.2-9.5</p> <p>Urethan (121° F) 14.2</p> <p>Urethane (74° F) 3.2</p> <p>Urethane Resin 6.5 - 7.1</p>	
-V-	<p>Valeraldehyde (58° F) 11.8</p> <p>Valeric Acid (68° F) 2.6</p> <p>Valeronitrile (70° F) 17.7</p> <p>Vanadium Oxybromide (78° F) 3.6</p> <p>Vanadium Oxychloride (78° F) 3.4</p> <p>Vanadium Sulfide 3.1</p> <p>Vanadium Tetrachloride (78° F) 3.0</p> <p>Vaseline 2.2-2.9</p> <p>Veratrol (73° F) 4.5</p> <p>Vinyl Alcohol Resin 2.6-3.5</p>	<p>Vinyl Butyral 3.3 - 3.9</p> <p>Vinyl Chloride (Acetate) 3.0 - 3.1</p> <p>Vinyl Chloride (Flexible) 3.5 - 4.5</p> <p>Vinyl Chloride (Ridgig) 2.8 - 3.0</p> <p>Vinyl Chloride Resin, Hard 5.8-6.4</p> <p>Vinyl Chloride Resin, Soft 2.8-4.0</p> <p>Vinyl Ether (68° F) 3.9</p> <p>Vinyl Formal 3.0</p> <p>Vinylidene Chloride 3.0 - 4.0</p> <p>Vycor Glass 3.8</p>

<p style="text-align: center;">-W-</p>	<p>Water 4-88 Water (32° F) 88.0 Water (68° F) 80.4 Water (212° F) 55.3 Water (390° F) 34.5 Water (80° F) 80.0 Water (Steam) 1.00785</p>	<p>Wax 2.4-6.5 Wheat Flour 3.0 - 5.0 Wheat Flour (Dry Powder) 1.6 White Mica 4.5-9.6 Wood, Dry 2-6 Wood, Pressed Board 2.0-2.6 Wood, Wet 10-30</p>
<p style="text-align: center;">-X-</p>	<p>Xylene (68° F) 2.4 Xylene, Liquid 2.2-2.6 Xylenol 17 Xylenol (62° F) 3.9 Xylidine (68° F) 5.0</p>	
<p style="text-align: center;">-Y-</p>		
<p style="text-align: center;">-Z-</p>	<p>Zinc Oxide 1.7-2.5 Zinc Sulfide 8.2 Zircon 12.0 Zirconium Oxide 12.5 Zirconium Silicate 5.0</p>	
<p style="text-align: center;">-1-</p>	<p>1, 2-Dichloroethane (77° F) 10.7 1-Diethoxyethane (75° F) 3.8 1-Heptene (68° F) 2.1 1-Octanol (68° F) 10.3 2-Methyl-1-Propanol (77° F) 17.7 3 Dimethyl-2-Butanone 13.1 3-Chloro-1, Dihydroxyprone (68° F) 31.0 3-Dimethyl-2-Butanone (293° F) 13.1</p>	

Γ) Synchronous Demodulation