

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΕ**

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ

**ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ & ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ**

ΧΡΗΣΤΟΣ ΤΣΩΝΟΣ

ΛΑΜΙΑ 2013

Περιεχόμενα

LabView - Μετρήσεις μη ηλεκτρικών μεγεθών	3
Εισαγωγή στο LabView	3
Μέτρηση σχετικής υγρασίας.....	16
Μέτρηση φωτεινής έντασης	23
Μετρήσεις I-V ηλεκτρονικών εξαρτημάτων	
Αναλογική ανάλυση υπογραφών	32
Μετατροπείς ηλεκτρικών σημάτων	42
Μετατροπέας ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (DAC).....	42
Μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC).....	46
Μέτρηση ηλεκτρικών χαρακτηριστικών τελεστικού ενισχυτή	50
Μέτρηση ρυθμού αιώρησης (Slew rate).....	50
Μέτρηση του λόγου απόρριψης κοινού σήματος (CMRR).....	54
Μέτρηση εύρους ζώνης διέλευσης συχνοτήτων (BW).....	58
Μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών	62
Μετρήσεις με γέφυρα και ισοδύναμα κυκλώματα.....	62
Διηλεκτρικές μετρήσεις εναλλασσόμενου ηλεκτρικού πεδίου.....	77
Μετρήσεις C-V διατάξεων MIS.....	94
Βιβλιογραφία	103

LABVIEW - ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ

Εισαγωγή στο LabView

Το LabVIEW (**L**aboratory **V**irtual **I**nstrument **E**ngineering **W**orkbench - LabVIEW) είναι μια γραφική γλώσσα προγραμματισμού που επιτρέπει : **(α)** τη λήψη και επεξεργασία δεδομένων από συστήματα μετρήσεων, **(β)** τον έλεγχο οργάνων και **(γ)** τον έλεγχο προγραμμάτων προσομοίωσης λειτουργιών. Το LabVIEW στηρίζεται σε γραφικά σύμβολα, και όχι σε κείμενο όπως οι κλασικές γλώσσες προγραμματισμού, για να περιγράψει τις διάφορες ενέργειες ενός προγράμματος. Το LabVIEW χρησιμοποιεί την γραφική γλώσσα προγραμματισμού G για να δημιουργήσει προγράμματα σε μορφή "μπλοκ" διαγραμμάτων. Τα προγράμματα του LabVIEW ονομάζονται εικονικά όργανα (**Virtual Instruments, VIs**) γιατί η εμφάνιση και η λειτουργία τους μοιάζουν με αυτές των πραγματικών οργάνων. Τα VIs αποτελούνται από : **(α)** το τμήμα που αλληλεπιδράει με τον χρήστη και βρίσκεται στο **Front Panel** και **(β)** το τμήμα του διαγράμματος ροής που βρίσκεται στο **Block Diagram** και είναι κατασκευασμένο στη γραφική γλώσσα G. Το διάγραμμα ροής στο Block Diagram αποτελεί επίσης και τον κώδικα πηγής για το VI. Ένα VI μπορεί να χρησιμοποιηθεί από μόνο του σαν πρόγραμμα ή σαν υποπρόγραμμα στο εσωτερικό άλλων προγραμμάτων. Ένα VI μέσα σε ένα άλλο VI καλείται **subVI**.

LabVIEW και κάρτες DAQ

Απόκτηση (acquisition) καλείται ο τρόπος με τον οποίο φυσικά μεγέθη (τάση, ρεύμα, πίεση, θερμοκρασία κλπ) μετατρέπονται σε ψηφιακά δεδομένα και απεικονίζονται στην οθόνη ενός υπολογιστή. Η απόκτηση και η ανάλυση στοιχείων μετασχηματίζει τα ακατέργαστα στοιχεία της πληροφορίας των σημάτων σε σημαντικές πληροφορίες προς επεξεργασία. Το LabVIEW για την απόκτηση δεδομένων (**Data Acquisition**), χρησιμοποιεί συσκευές **DAQ** οι οποίες συμφωνά με την αρχιτεκτονική τους σχεδίαση και τον τομέα των εφαρμογών τους διακρίνονται σε: **(α)** συσκευές DAQ Εργαστηριακών

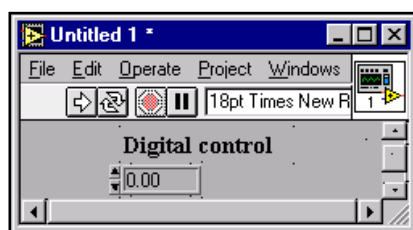
Εφαρμογών, (**β**) συσκευές DAQ Βιομηχανικού Σχεδιασμού και (**γ**) συσκευές DAQ Βιομηχανικού Δικτύου.

Οι συσκευές (**devices**) DAQ εργαστηριακών εφαρμογών είναι κάρτες που συνδέονται με τον υπολογιστή για την απόκτηση δεδομένων από συστήματα μετρήσεων και για τον έλεγχο οργάνων. Η λήψη σωστών αποτελεσμάτων από ένα σύστημα DAQ, εξαρτάται από τα ακόλουθα στοιχεία της σύνθεσής του: Η/Υ, Αισθητήρες – Μετατροπείς, Κάρτες DAQ, Λογισμικό, Βελτίωση Σήματος. Για τη συλλογή μετρήσεων και τον έλεγχο οργάνων το LabVIEW, εκτός από τις παραπάνω συσκευές DAQ, υποστηρίζει και τα ευρέως διαδεδομένα πρωτόκολλα **RS-232/422/485** και **IEEE488 (GPIB)**.

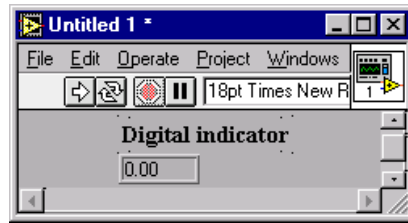
Το περιβάλλον του LabVIEW

Το περιβάλλον του LabVIEW αποτελείται από δύο βασικά παράθυρα, το **Front Panel** και το **Block Diagram**. Το Front Panel είναι ο κεντρικός πίνακας επιλογών μέσω του οποίου ο χρήστης αλληλεπιδρά με το πρόγραμμα. Όταν εκτελείται ένα VI, το Front Panel πρέπει να είναι ανοικτό έτσι ώστε όχι μόνο να μπορούμε να εισάγουμε δεδομένα εισόδου στο πρόγραμμα εκτέλεσης αλλά και να βλέπουμε το αποτέλεσμα του προγράμματος. Το Front Panel είναι βασικά ένας συνδυασμός αναλογικών και ψηφιακών αντικειμένων ελέγχου και δεικτών.

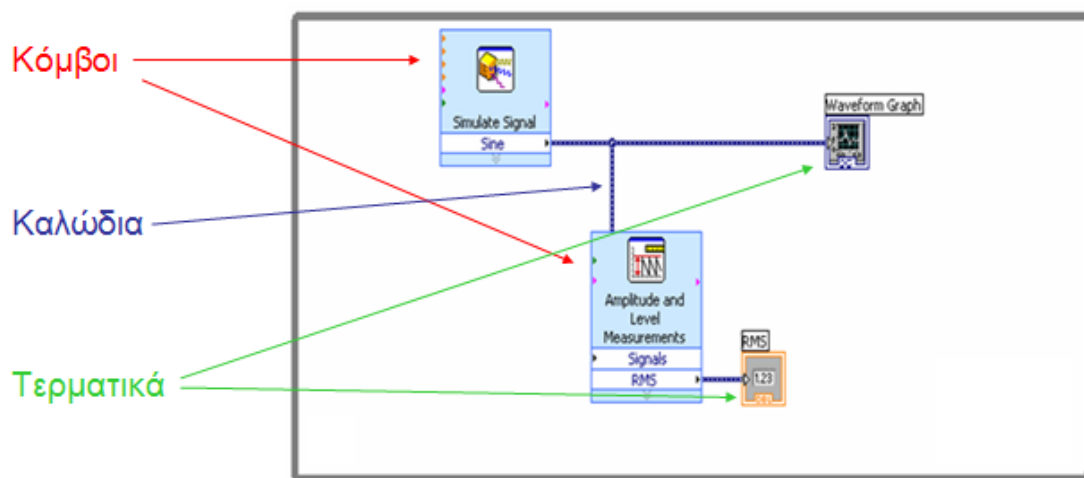
Στα **αντικείμενα ελέγχου** (ελεγκτές) εισάγονται δεδομένα από τους χρήστες και λέγονται τερματικά εισόδου. Με δεξί κλικ σε έναν ελεγκτή δίνεται η δυνατότητα αλλαγής του ελεγκτή σε δείκτη, και επίσης αλλαγής της μηχανικής του δράση.



Τα **αντικείμενα δεικτών** δίνουν αποτελέσματα στους χρήστες και λέγονται τερματικά εξόδου. Με δεξί κλικ σε έναν δείκτη δίνεται η δυνατότητα αλλαγής του δείκτη σε ελεγκτή, και επίσης αλλαγής του σχήματος και της ακρίβειάς του.

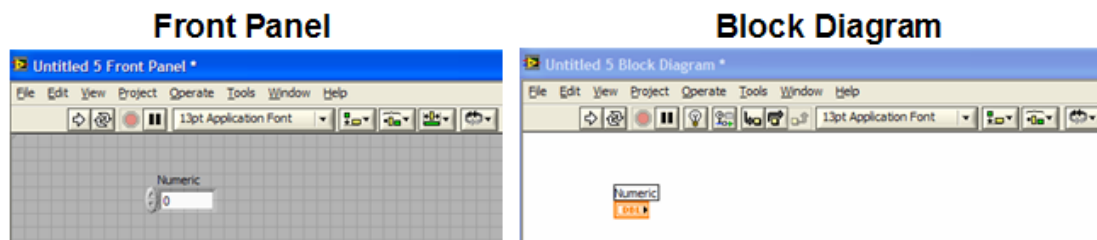


Το **Block Diagram** περιέχει το γραφικό πρωτογενή κώδικα ενός VI. Τα επιμέρους στοιχεία του κώδικα ενός VI στο Block Diagram είναι τα τερματικά, οι κόμβοι και τα καλώδια.



Τερματικά

Όταν τοποθετείται ένας ελεγκτής (ή δείκτης) στο Front Panel τότε το LabVIEW δημιουργεί αυτόματα ένα αντίστοιχο τερματικό ελεγκτή (ή δείκτη) στο Block Diagram. Ένα τερματικό εξαφανίζεται μόνο όταν διαγραφεί ο αντίστοιχος ελεγκτής (ή δείκτης) από το (Control Panel).



Κόμβοι

Οι κόμβοι είναι στοιχεία εκτέλεσης ενός προγράμματος. Είναι ανάλογοι με τις δηλώσεις, τους τελεστές, τις λειτουργίες και τις υπορουτίνες σε μια κλασική γλώσσα προγραμματισμού. Οι συναρτήσεις πρόσθεσης και αφαίρεσης

αντιπροσωπεύουν έναν τύπο κόμβου. Μια δομή είναι ένας άλλος τύπος κόμβου. Οι δομές μπορούν να εκτελέσουν τον κώδικα επανειλημμένα ή υπό όρους, παρόμοια με τους βρόχους και τις δηλώσεις περίπτωσης στις κλασικές γλώσσες προγραμματισμού. Το LabVIEW περιέχει επίσης ειδικούς κόμβους όπως τους κόμβους τύπου, οι οποίοι είναι χρήσιμοι στην αποτίμηση μαθηματικών τύπων ή συναρτήσεων.

Καλώδια

Ένα VI διατηρεί τη συνοχή από τα **καλώδια** που συνδέουν τους κόμβους και τα τερματικά. Τα καλώδια μεταφέρουν τα δεδομένα από ένα τερματικό εισόδου σε ένα ή και περισσότερα τερματικά εξόδου. Αν πραγματοποιηθεί μια λανθασμένη σύνδεση με ένα καλώδιο τότε το LabVIEW θα εμφανίσει τη σύνδεση με ένα σπασμένο καλώδιο.

Εικονίδια και συνδέσεις

Τα εικονίδια και οι συνδέσεις τους διευκρινίζουν τις διαδρομές των στοιχείων που ρέουν κατά την εκτέλεση του προγράμματος από κάποια VIs σε κάποια άλλα VIs. Το εικονίδιο είναι η γραφική απεικόνιση του VI στο Block Diagram. Οι συνδέσεις αντιπροσωπεύουν τις εισόδους και τις εξόδους ενός VI. Ένας κόμβος εκτελεί μόνο όταν φθάσουν δεδομένα σε όλα τα τερματικά εισόδου του. Οι κόμβοι παρέχουν δεδομένα σε όλες τις εξόδους τους όταν ολοκληρώσουν την εργασία τους. Τα δεδομένα περνούν αμέσως από τις εξόδους στα τερματικά εξόδου, δηλαδή στους δείκτες.



Δομές

Οι δομές είναι ο πιο σημαντικός τύπος εκτέλεσης ροής σε ένα VI όπως οι δομές ελέγχου σε μια γλώσσα προγραμματισμού. Χρησιμοποιούνται όταν

θέλουμε να επαναληφθεί μια λειτουργία μέχρι μια συνθήκη χαρακτηριστεί αληθής, ή ψευδής, ή για έναν προκαθορισμένο αριθμό επαναλήψεων εντολών. Οι δομές του LabView είναι : η **While Loop**, η **For Loop**, η **Case**, η **Sequence** και η **Event Structure**.

Η **While loop** πραγματοποιεί έναν συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων μέχρι μια συνθήκη που εμείς ορίζουμε γίνει ψευδής ή αληθής. Η **While Loop** έχει δύο ακροδέκτες :

I. iteration terminal (ακροδέκτης απαρίθμησης) που περιέχει τον αριθμό επαναλήψεων,

II. conditional terminal (ακροδέκτης συνθήκης) που αποτελεί είσοδο της δομής.

Στο ακροδέκτη απαρίθμησης μπορούμε να συνδέουμε έναν **indicator** για να βλέπουμε τον αριθμό επαναλήψεων. Στον ακροδέκτη συνθήκης μπορούμε να συνδέουμε την έξοδο ενός λογικού **control**. Το **While loop** εκτελεί τον κώδικα που είναι γραμμένος μέσα στα όριά του. Στο τέλος το **LabVIEW** ελέγχει την τιμή στον ακροδέκτη συνθήκης και εάν είναι αληθής (ή ψευδής) τότε επαναλαμβάνει την εκτέλεση, διαφορετικά τη σταματάει. Όσα αντικείμενα θέλουμε να ελέγχονται ή να ενημερώνονται από το **While loop** πρέπει να βρίσκονται μέσα στο πλαίσιο που ορίζει η δομή.

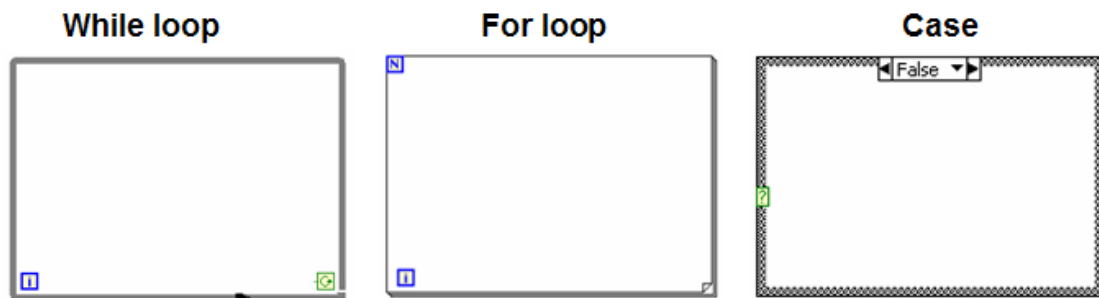
Η δομή **For Loop** εκτελεί τον κώδικα που βρίσκεται μέσα στο πλαίσιο που ορίζει και τον επαναλαμβάνει τόσες φορές όσες ορίζουν οι ακροδέκτες της. Η δομή έχει δύο ακροδέκτες :

I. τον συντελεστή επανάληψης (Count Terminal) N (είσοδος) με τον οποίο ορίζουμε πόσες φορές θα επαναληφθεί η εκτέλεση,

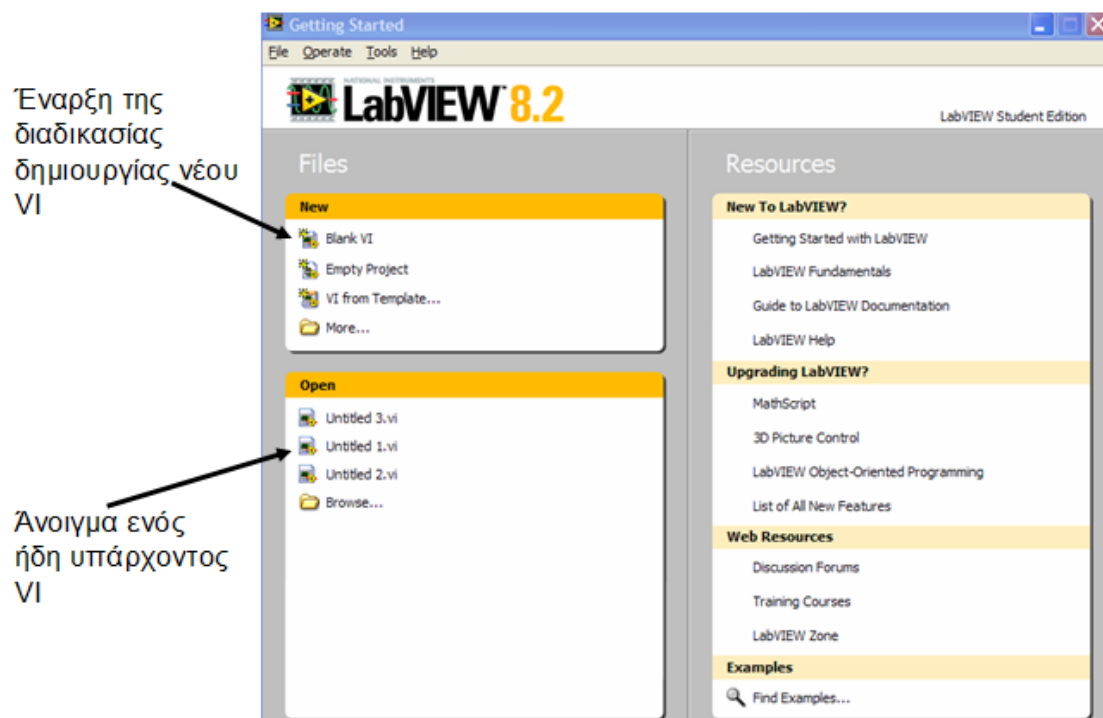
II. τον απαριθμητή (iteration terminal) i (έξοδος) ο οποίος περιέχει τον αριθμό επαναλήψεων που έχουν γίνει.

Θέτουμε τιμή στο συντελεστή **N** εξωτερικά του πλαισίου ενώνοντάς τον καλώδιακά με το **N**. Για να θέσουμε εξωτερικές τιμές χρησιμοποιούμε αριθμητική σταθερά ή στοιχείο **control** από την παλέτα αντικειμένων ή επιλέγεται το **Create Constant** από το **Pop-Up** μενού του **For Loop**. Ο απαριθμητής **i** στην πρώτη εκτέλεση παίρνει την τιμή 0 και στην τελευταία **N-1**. Οι δύο ακροδέκτες είναι ακέραιοι αριθμοί και παίρνουν τιμές από 0 έως $2^{31} - 1$.

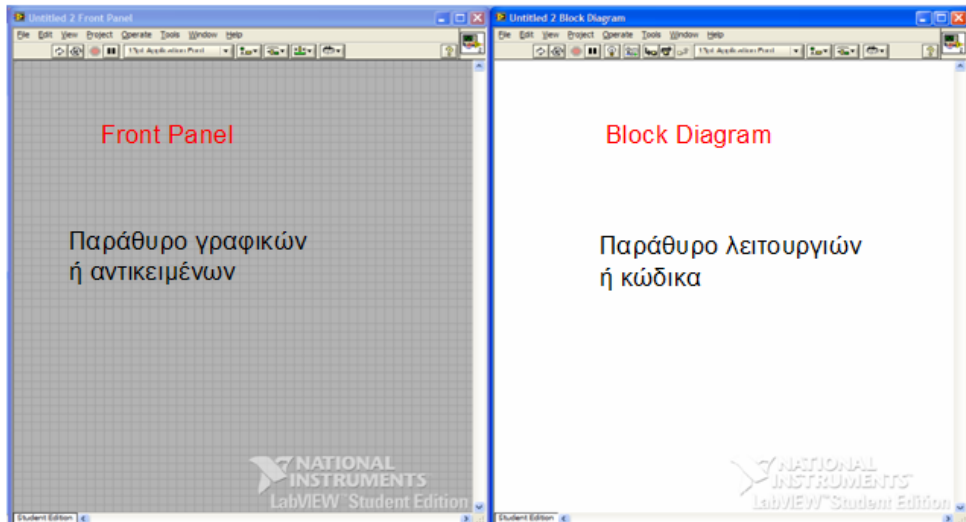
Με τη δομή **Case** εκτελείται μια συγκεκριμένη συνθήκη, όπως η συνθήκη **αν τότε, αλλιώς (if – then – else)**. Η δομή case έχει έναν ακροδέκτη επιλογής (selector) και έναν δείκτη. Ανάλογα με το είδος των δεδομένων που θέτουμε στον ακροδέκτη επιλογή, αλλάζει και ο αριθμός των περιπτώσεων (cases). Σε περίπτωση που ο ακροδέκτης δεχτεί λογική τιμή, τότε οι cases θα είναι αληθής (true) ή ψευδής (false).



Ξεκινώντας το LabView

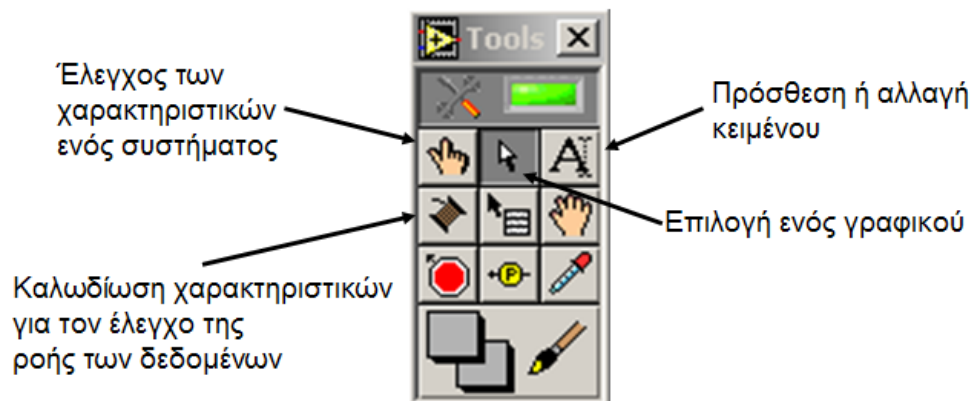


Επιλέγοντας **Windows – Tile Left and Right** εμφανίζονται στο ίδιο παράθυρο το Front panel και το Block Diagram. Μόνο ένα από τα δύο παράθυρα είναι ενεργό κάθε χρονική στιγμή. Η ενεργοποίηση ενός παραθύρου γίνεται με “κλικ” στον αντίστοιχο χώρο.

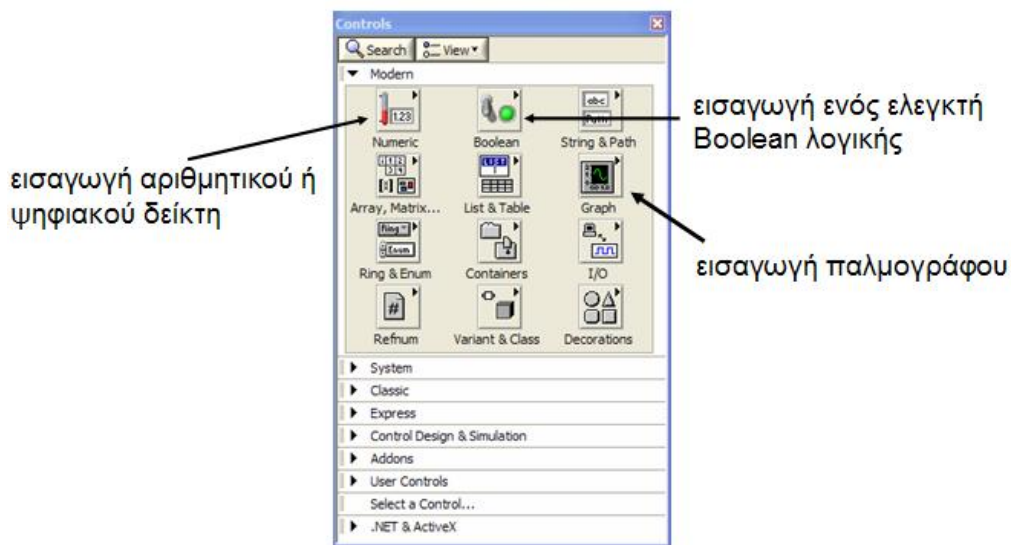


Η προβολή οποιουδήποτε toolbars (εργαλείων, αντικειμένων, ή λειτουργιών) πραγματοποιείται από τα menus των παραθύρων ή με δεξί κλικ στο χώρο των αντίστοιχων παραθύρων.

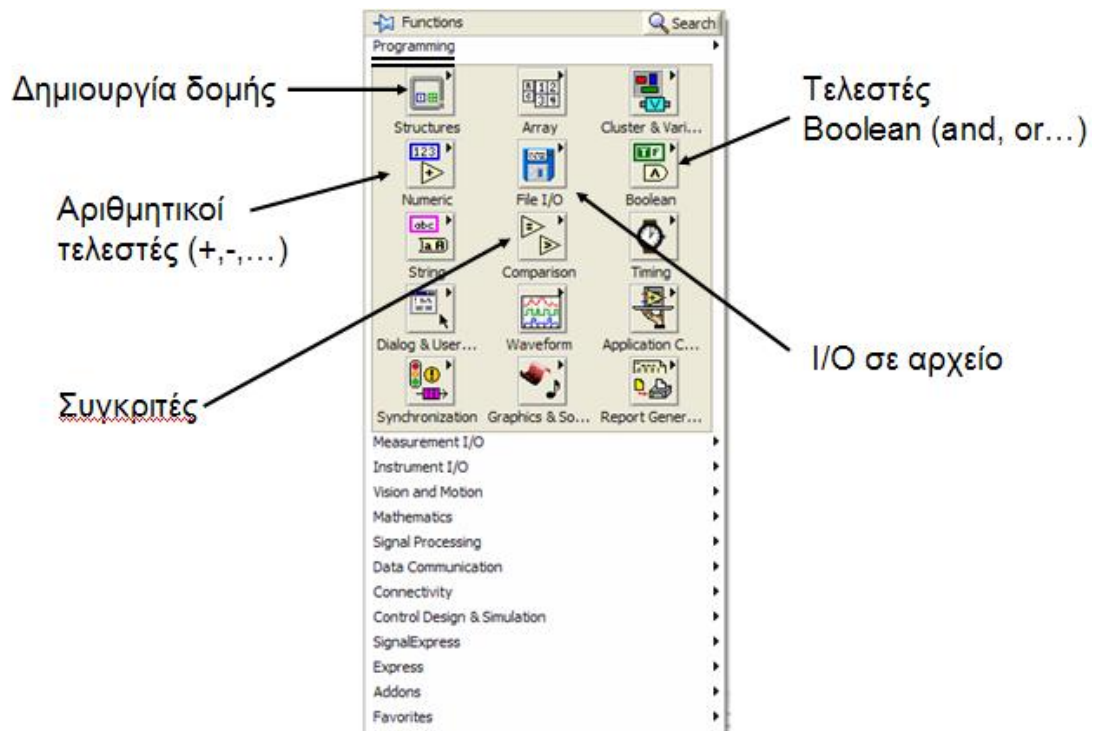
Tools-Palette (παλέτα εργαλείων)



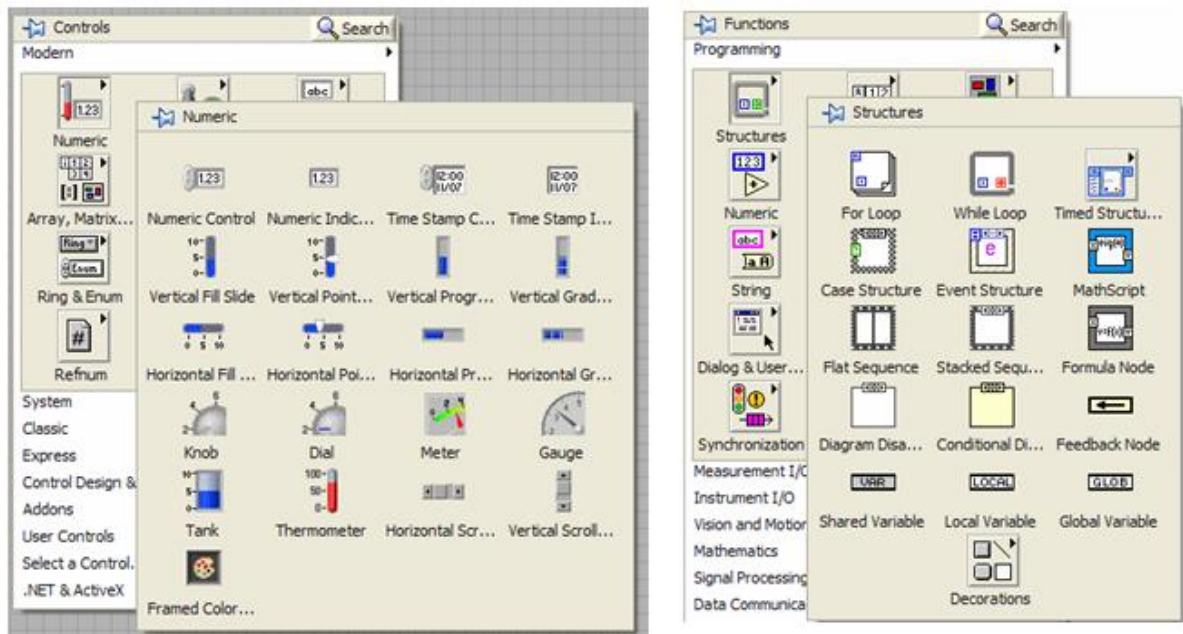
Control-Button Toolbar (παλέτα αντικειμένων)



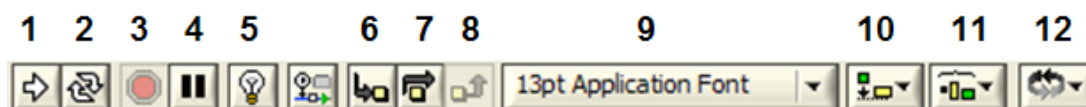
Functions Toolbar (παλέτα λειτουργιών)



Sub-Toolbars



Basic Toolbar



1. Έναρξη λειτουργίας
2. Συνεχή λειτουργία ή προσωρινή παύση
3. Τερματισμός
4. Επαναφορά του VI στην κανονική του λειτουργία
5. Αργή κίνηση (παρακολούθηση της ροής δεδομένων μεταξύ των κόμβων σε αργή κίνηση)
6. Βήμα μετάβασης (εισχώρηση σε κόμβο και παρακολούθηση της λειτουργίας του)
7. Πλήκτρο εκτροπής (εκτροπή από το τρέξιμο ενός κόμβου)
8. Βήμα υπέρβασης (επιτρέπει την έξοδο από ένα κόμβο έχοντας εισχωρήσει σε αυτόν)
9. Επιλογή τύπου, μεγέθους, στυλ και χρώματος γραμματοσειράς
10. Επιλογή ευθυγράμμισης αντικειμένων
11. Επιλογή στοίχισης αντικειμένων
12. Επιλογή τοποθέτησης αντικειμένων σε επίπεδα χώρου

Δραστηριότητες

Ξεκινάμε το LabVIEW, επιλέγουμε ένα blank VI και στη συνέχεια **Window – Tile Left and Right**.

Με δεξί “κλικ” στο Front Panel επιλεγούμε **Numeric --- Numeric Control**. Πατώντας μια φορά αριστερό “κλικ” και μετά άλλη μια για να το αφήσουμε στο χώρο του παραθύρου του Front Panel (εμφανίζεται σε κάθε παράθυρο το αντικείμενο **Numeric**).

Επαναλαμβάνουμε την προηγούμενη διαδικασία (εμφανίζεται σε κάθε παράθυρο το αντικείμενο Numeric2).

Με δεξί “κλικ” στο Front Panel επιλεγούμε **Boolean --- Round Led** πατώντας μια φορά αριστερό “κλικ” και μετά άλλη μια για να το αφήσουμε στο χώρο του παραθύρου του Front Panel.

Με δεξί “κλικ” στο Block Diagram επιλέγουμε **Comparison --- Greater or Equal**, και με κρατημένο αριστερό “κλικ” το σέρνουμε και το αφήνουμε στο παράθυρο του Block Diagram.

Στη συνέχεια γίνεται η σύνδεση των αντικειμένων του Block Diagram όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1.

Γράφουμε στο Numeric τον αριθμό 7 και στο Numeric2 τον αριθμό 3 (παράθυρο Front Panel) όπως φαίνεται στο Σχήμα1, έτσι ώστε να μην ισχύει $3 \geq 7$.

Πατώντας το **Run** από το παράθυρο Block Diagram τρέχουμε την εφαρμογή και παρατηρούμε το χρώμα του ενδείκτη Boolean στο Front Panel.

Στη συνέχεια γράφουμε στο Numeric2 τον αριθμό 9 όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, έτσι ώστε να ισχύει $9 \geq 7$.

Πατώντας το **Run** από το παράθυρο Block Diagram τρέχουμε την εφαρμογή και παρατηρούμε το χρώμα του ενδείκτη Boolean στο Front Panel.

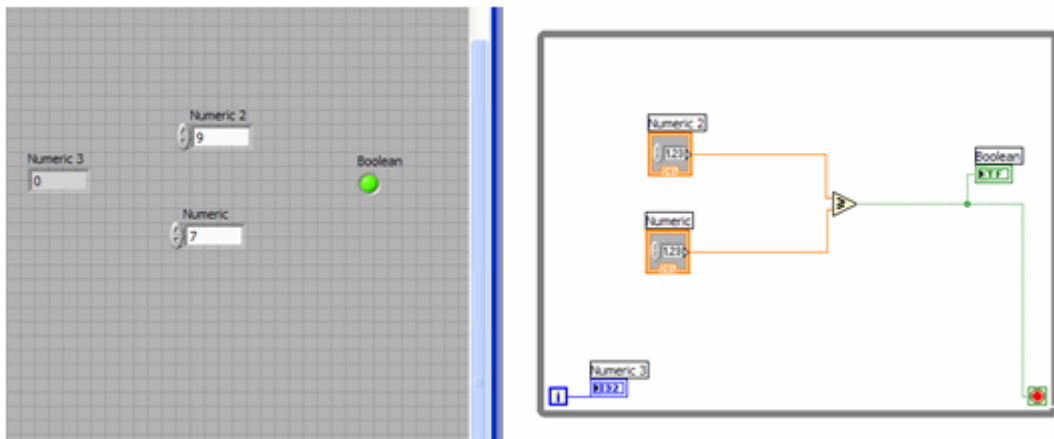
Παρατήρηση : με δεξί “κλικ” πάνω στα εικονίδια Numerics του Block Diagram μπορούμε να απενεργοποιήσουμε την επιλογή View as Icon.

Με δεξί “κλικ” στο Block Diagram επιλέγουμε **Structures --- While Loop** (δημιουργείται έτσι η αντίστοιχη δομή βρόχου). Μεγαλώνουμε αυτή τη δομή ώστε να περιλάβει όλα τα αντικείμενα του Block Diagram όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.

Με δεξί “κλικ” πάνω στο εικονίδιο **Loop Iteration** (κάτω αριστερά της δομής βρόχου) επιλέγουμε **Create Indicator** και παρατηρούμε ότι εμφανίζεται το Numeric3 στο Front Panel.

Καλωδιώνουμε το εικονίδιο **Loop Condition** (κάτω δεξιά της δομής βρόχου) όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.

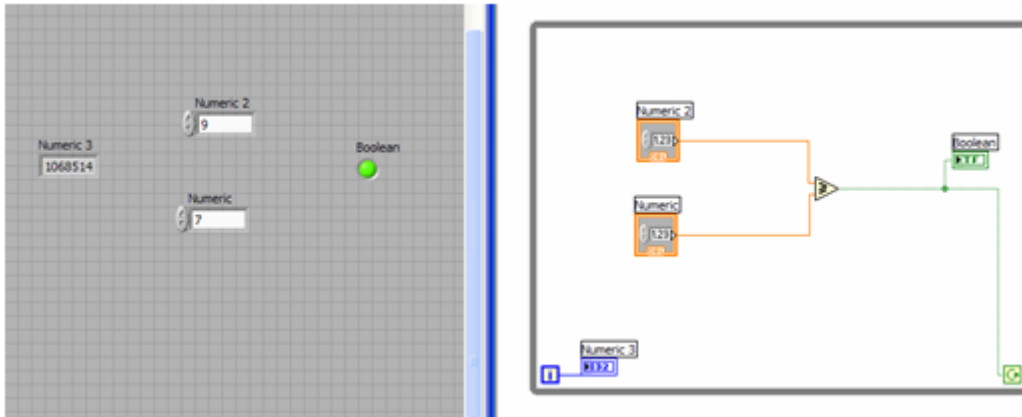
Πατώντας το **Run** από το παράθυρο Block Diagram τρέχουμε την εφαρμογή και παρατηρούμε το χρώμα του ενδείκτη **Boolean** στο Front Panel και τον αριθμό του Numeric3.



Σχήμα 2.

Με δεξί “κλικ” πάνω στο εικονίδιο **Loop Condition** (κάτω δεξιά της δομής βρόχου) απενεργοποιούμε την επιλογή “**Stop if True**” επιλέγοντας “**Continue if True**”. Παρατηρούμε ότι το εικονίδιο αλλάζει χρώμα, από κόκκινο γίνεται πράσινο (Σχήμα 3).

Πατώντας το **Run** από το παράθυρο Block Diagram τρέχουμε την εφαρμογή και αμέσως μετά τη σταματάμε επιλέγοντας από το ίδιο παράθυρο **Abort Execution**. Παρατηρούμε το χρώμα του ενδείκτη Boolean στο Front Panel και τον αριθμό του **Numeric3** (Σχήμα 3).

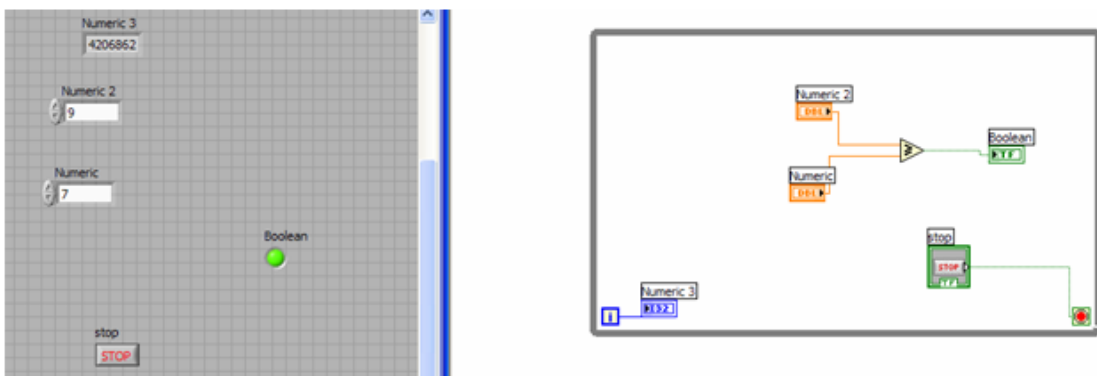


Σχήμα 3.

Με δεξί “κλικ” στο Front Panel επιλέγουμε **Boolean --- Stop Button**. Εμφανίζονται τα αντίστοιχα εικονίδια και στα δύο παράθυρα.

Με δεξί “κλικ” πάνω στο εικονίδιο **Loop Condition** (κάτω δεξιά της δομής βρόχου) επιλέγουμε “**Stop if True**”. Καλωδιώνουμε τα εικονίδια Loop Condition και Stop (button), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.

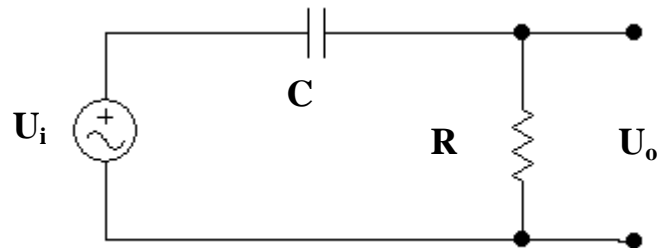
Πατώντας το **Run** από το παράθυρο Block Diagram τρέχουμε την εφαρμογή και αμέσως πατάμε το εικονίδιο **STOP** από το παράθυρο του Front Panel, για να σταματήσουμε την εφαρμογή. Παρατηρούμε το χρώμα του ενδείκτη Boolean στο Front Panel και τον αριθμό του **Numeric3** (Σχήμα 4).



Σχήμα 4.

Εργαστηριακή δραστηριότητα

Η συχνότητα αποκοπής, f_c , ενός υψηλοπερατού φίλτρου R-C δίνεται από τη σχέση $f_c=1/2\pi RC$. Να δημιουργήσετε ένα πρόγραμμα στο LabView το οποίο να υπολογίζει τη συχνότητα αποκοπής για διαφορετικές και γνωστές τιμές χωρητικοτήτων και αντιστάσεων.



Υψηλοπερατό φίλτρο R-C

Μέτρηση σχετικής υγρασίας

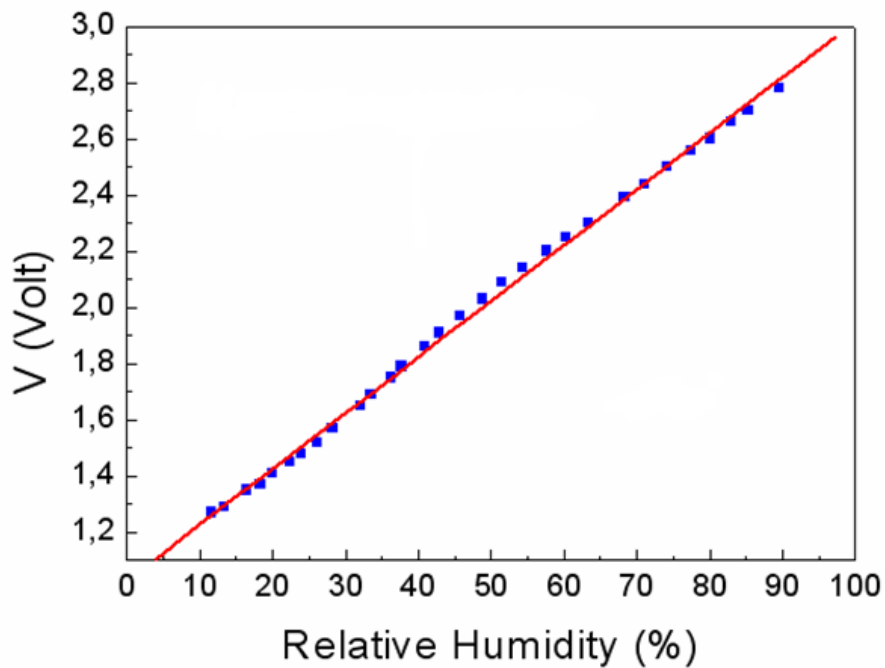
Η σχετική υγρασία (**Relative Humidity, RH**) ορίζεται ως ο λόγος της μάζας των υδρατμών που περιέχεται σε ένα δεδομένο όγκο αέρα προς τη μάζα που θα έπρεπε να περιείχε ο ίδιος όγκος αέρα για να ήταν κορεσμένος από υδρατμούς. Η μέτρηση της σχετικής υγρασίας του αέρα επιτυγχάνεται με κάποιες ειδικές συσκευές οι οποίες ονομάζονται αισθητήρες σχετικής υγρασίας. Οι συσκευές αυτές έχουν σαν βασικό στοιχείο του κυκλώματός τους :

- μια μεταβλητή αντίσταση που μεταβάλλει την ωμική της τιμή ανάλογα με τη τιμή της RH,
- ένα μεταβλητό πυκνωτή που μεταβάλλει την χωρητικότητά του ανάλογα με τη τιμή της RH

Οι αισθητήρες σχετικής υγρασίας, έχουν σαν βασικό στοιχείο στο κύκλωμα τους μεταβλητές αντιστάσεις, λόγω της μεγαλύτερης ακρίβειας και αντοχή τους στο χρόνο, σε σχέση με τους μεταβλητούς πυκνωτές υγρασίας. Ο αισθητήρας σχετικής υγρασίας στη συγκεκριμένη διάταξη που θα χρησιμοποιηθεί, έχει σαν βασικό στοιχείο μια μεταβλητή αντίσταση υγρασίας HS15P.

Χαρακτηριστική εξίσωση ονομάζεται η σχέση που συνδέει το ηλεκτρικό σήμα εξόδου (τάση ή ρεύμα) του αισθητήρα με τη τιμή του φυσικού μεγέθους που μετράει ο αισθητήρας. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται το διάγραμμα της χαρακτηριστικής εξίσωσης του αισθητήρα σχετικής υγρασίας που θα χρησιμοποιηθεί. Η χαρακτηριστική εξίσωση δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$V_o=1,02778 + 0,0199 \cdot RH$$



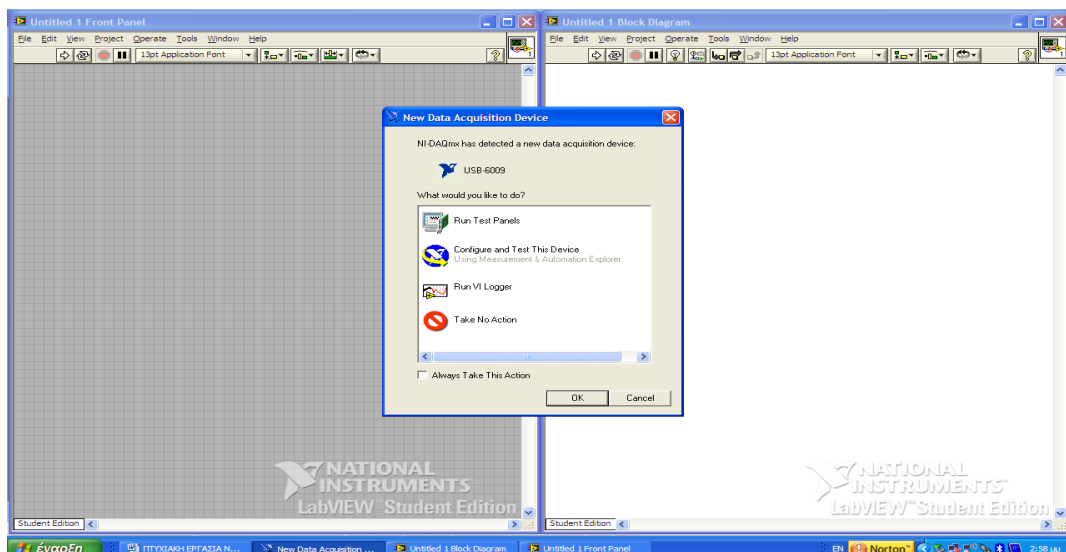
Σχήμα 1. Η χαρακτηριστική εξίσωση του αισθητήρα σχετικής υγρασίας στους 25 °C.

Διαδικασία μέτρησης RH

Ανοίγουμε το Labview και επιλεγούμε **>Open New VI.**

Στη συνέχεια επιλεγούμε **Window>Tile Left and Right** για να έχουμε σε μια οθόνη το **Front Panel** και το **Block Diagram.**

Συνδέουμε μετά την κάρτα DAQ USB 6009 με το καλώδιο USB στον (H/Y). Όταν γίνει η σύνδεση τότε εμφανίζεται ένα **test panel** στο οποίο γίνεται η αναγνώριση της κάρτας από το LabVIEW. Επιλεγούμε **OK.**



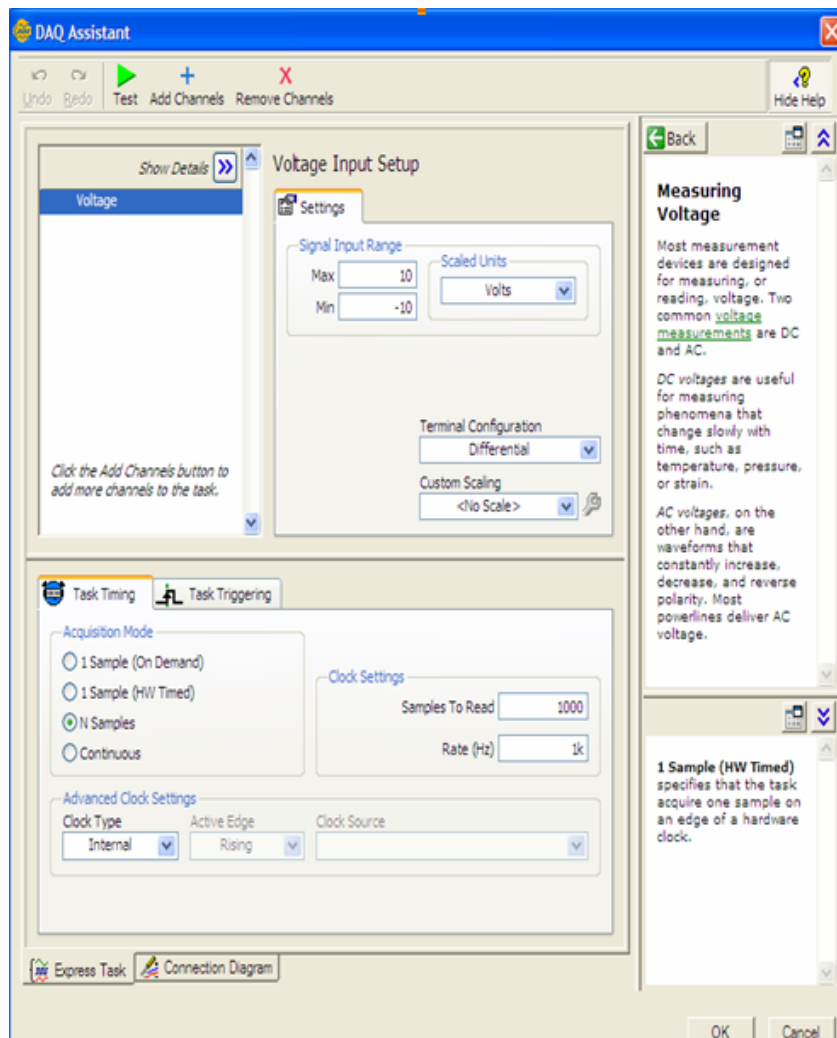
Επιλέγουμε στη συνέχεια **View> Functions Palette> Express> Input> DAQ assistant**. Τοποθετούμε το εικονίδιο **Daq Assistant** στο **Block Diagram** με αυτό τον τρόπο γίνεται η εισαγωγή του είδους της κάρτας στο Labview.



Επιλέγουμε **Analog Input** και στη συνέχεια επιλέγουμε **Voltage**.

Στη συνέχεια επιλέγουμε ένα από τα 8 κανάλια της κάρτας USB (π.χ. **a0**), και πατάμε **Finish**.

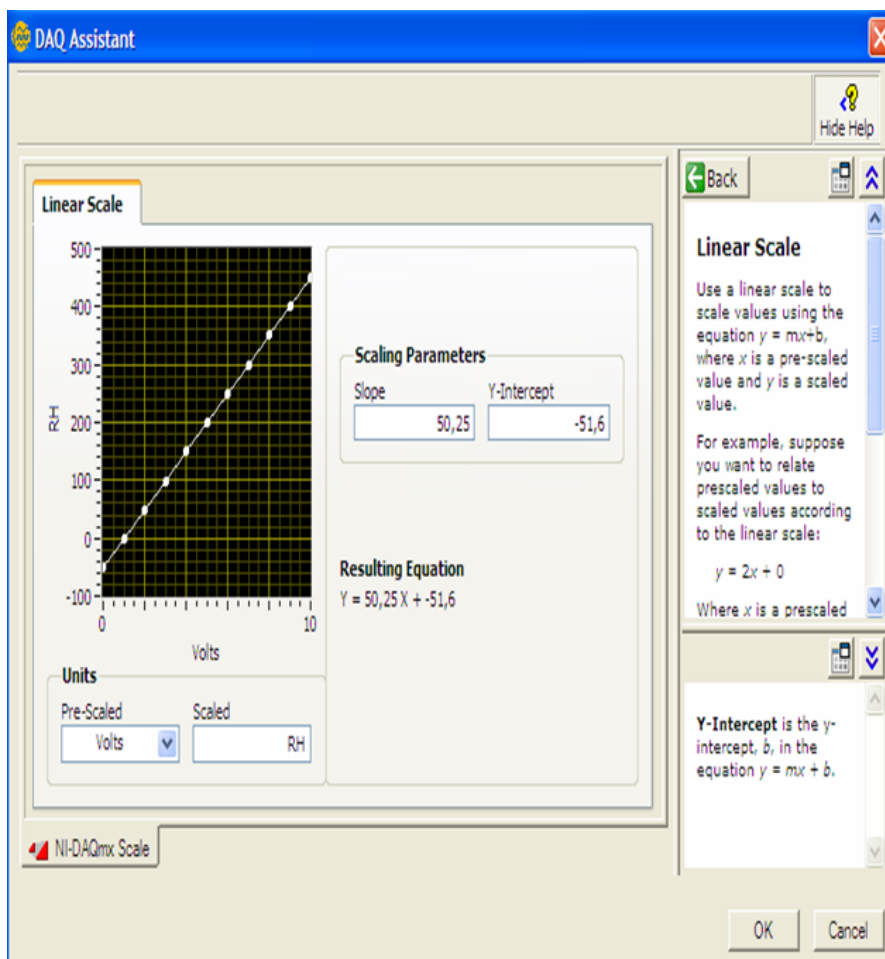
Εμφανίζεται στη συνέχεια το παρακάτω παράθυρο.



Στο πεδίο **Signal Input Range** επιλέγουμε το εύρος της τάσης μέτρησης. Όσο μικρότερο είναι το εύρος τόσο πιο ακριβής είναι και η μέτρηση.

Στο πεδίο **Terminal Configuration** επιλέγουμε **RSE**.

Στο πεδίο **Custom Scaling** επιλέγουμε **Create New** και στο νέο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγουμε **Linear**. Εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο το οποίο δίνει τη δυνατότητα να ορίσουμε τη μορφή της συνάρτησης μεταφοράς.



Λύνουμε την χαρακτηριστική εξίσωση του αισθητήρα ως προς το μετρούμενο φυσικό μέγεθος, τη σχετική υγρασία RH.

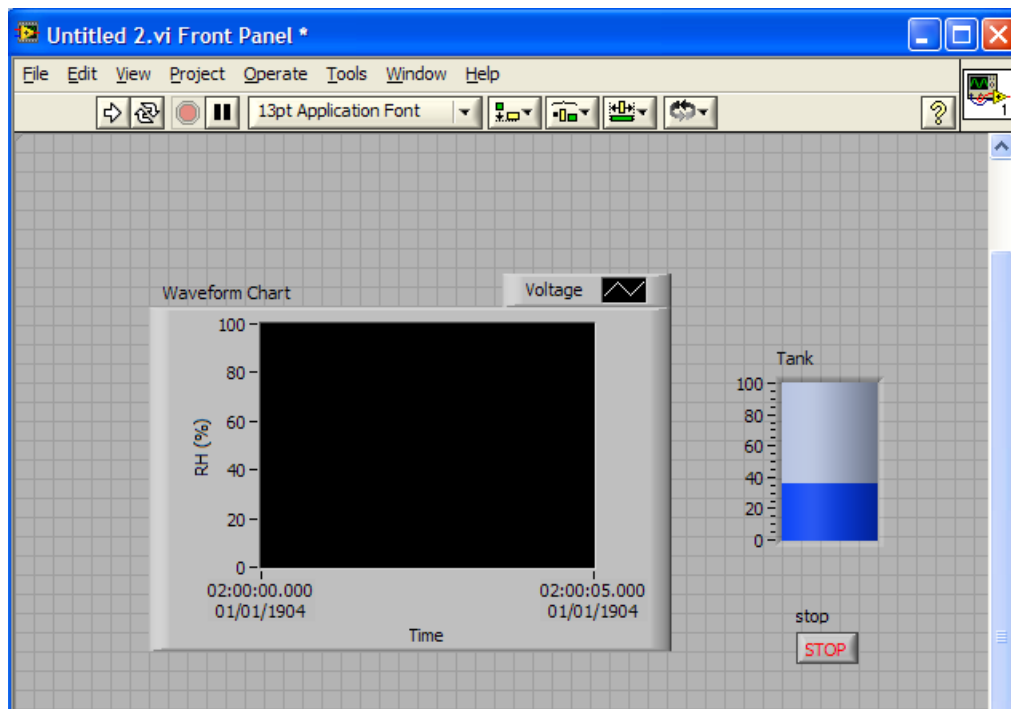
Βρίσκουμε την κλίση (**Slope**) και τη τομή της ευθείας με τον κατακόρυφο άξονα (**Y-Intercept**) και συμπληρώνουμε τα αντίστοιχα πεδία.

Στα πεδία **Pre-scaled** και **Scaled** επιλέγουμε **Volts** και **RH**. Με αυτό τον τρόπο ορίζουμε τις μονάδες των αξόνων x και y αντίστοιχα. Πατάμε **OK**.

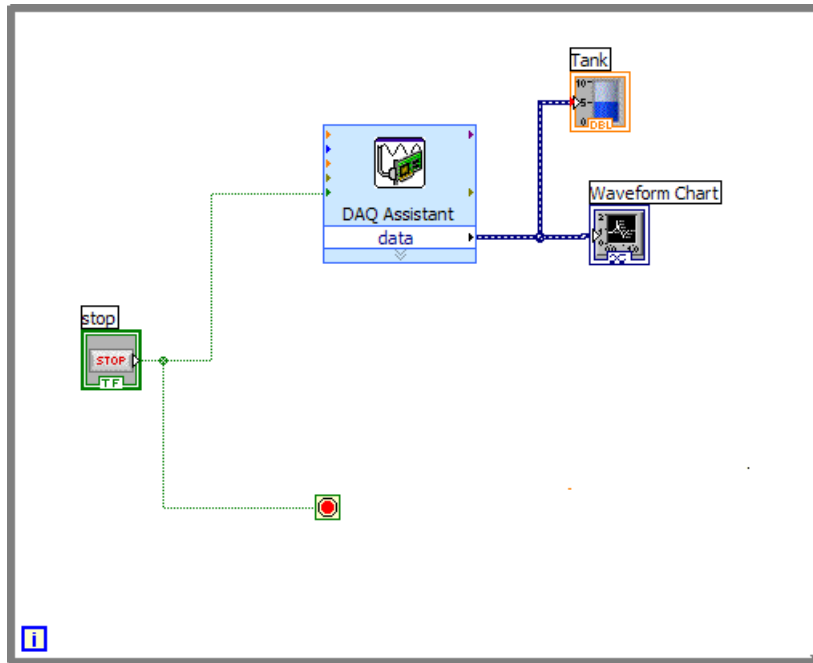
Στη συνέχεια επιλέγουμε στο Front Panel : **View>Control Palette>Modern>Graph> >Waveform Chart** ώστε να τοποθετήσουμε μια γραφική παράσταση τύπου παλμογράφου για την παρακολούθηση της μέτρησης ως συνάρτηση του χρόνου.

Τοποθετούμε ακόμα ένα όργανο απεικόνισης της μέτρησης στο Front Panel : **View>Control Palette>Modern>Numeric>Tank**.

Δημιουργούμε επίσης έναν ελεγκτή στο Front Panel : **View>Control>Palette> Boolean>Stop Button**. Καθορίζουμε επίσης την περιοχή μετρήσεων στους άξονες των οργάνων απεικόνισης. Στο Front Panel δημιουργείται η παρακάτω εικόνα.



Καλωδιώνουμε στη συνέχεια τα αντικείμενα στο **Block Diagram** και τα τοποθετούμε μέσα σε μια δομή **While Loop**, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Στη συνέχεια θα δημιουργήσουμε έναν κώδικα μέσω του οποίου θα επιλέγουμε το ρυθμό όπου θα λαμβάνονται οι μετρήσεις.

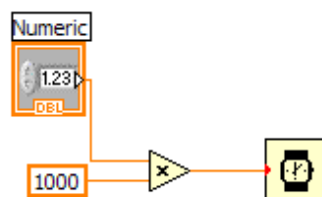
- από τη παλέτα αντικειμένων ένα στοιχείο ελέγχου **Numeric>Numeric Control**

- από την παλέτα λειτουργιών επιλέγουμε το σύμβολο του πολλαπλασιασμού **Numeric>Multiply**

- με δεξί κλικ πάνω στο σύμβολο πολλαπλασιασμού επιλέγουμε **Create>Constant** και γράφουμε μέσα του τον αριθμό 1000 (σημαίνει 1000 ms).

- από την παλέτα λειτουργιών επιλέγουμε **Time & Dialog>Wait(ms)**

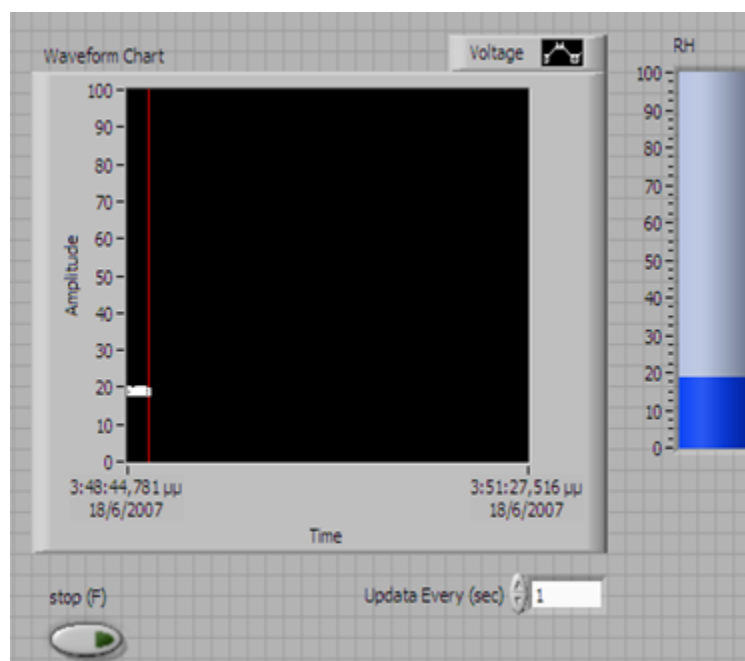
- καλωδιώνουμε τα παραπάνω αντικείμενα μέσα στο While Loop όπως φαίνεται παρακάτω



Στη συνέχεια συνδέουμε την είσοδο της κάρτας DAQ USB 6009 με την έξοδο του αισθητήρα σχετικής υγρασίας, και επιλέγουμε από το Front Panel να λαμβάνεται μια μέτρηση κάθε 1 δευτερόλεπτο (στο **Numeric** γράφουμε τον αριθμό 1, έτσι οι μετρήσεις γίνονται κάθε $1000\text{ms} \cdot 1 = 1\text{sec}$).

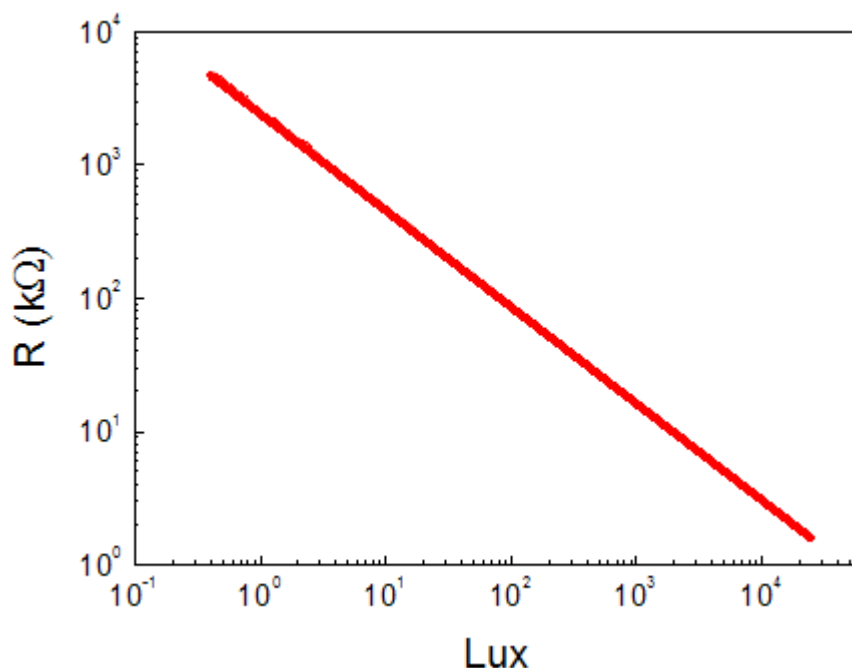
Εκτελούμε το πρόγραμμα που δημιουργήσαμε πατώντας το **Run**.

Πατώντας το εικονίδιο **STOP** από το Front Panel παίρνουμε μια εικόνα παρόμοια με την παρακάτω.



Μέτρηση φωτεινής έντασης

Το Lux είναι μια μονάδα που μετράει τη φωτεινότητα και αντιστοιχεί στην ένταση του φωτός. Σχετίζεται με την ποσότητα ακτινοβολίας που μετριέται σε Watt ανά τετραγωνικό μέτρο. Το Lux εξαρτάται από τη συχνότητα της ακτινοβολίας, δηλαδή το χρώμα. Για τη μέτρηση της φωτεινότητας χρησιμοποιούνται φωτοαντιστάσεις και φωτοδιόδοι. Ο αισθητήρας που θα χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της φωτεινότητας, χρησιμοποιεί μια φωτοαντίσταση καδμίου NORP12-RS της οποίας η τιμή μεταβάλλεται σύμφωνα με το Σχήμα 2.



Σχήμα 2.

Η χαρακτηριστική εξίσωση αισθητήρα που θα χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση του φωτός είναι η παρακάτω :

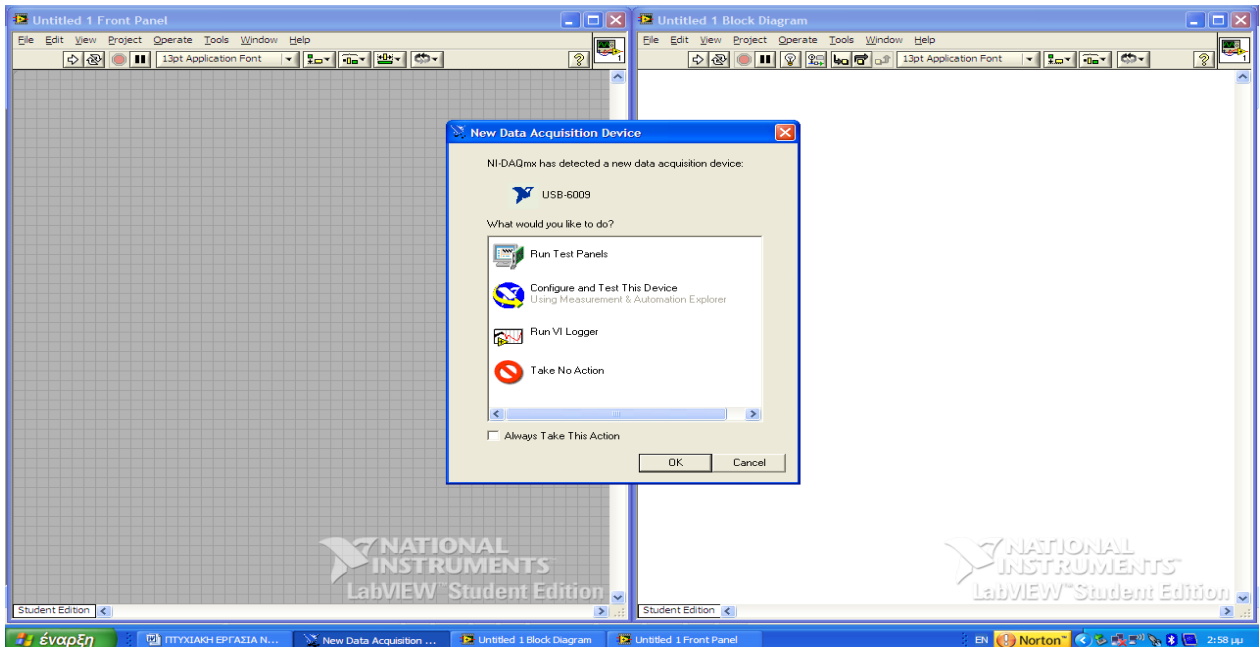
$$V_o = 1,304 + 3,2329 \cdot \log(\text{Lux})$$

Διαδικασία μέτρησης του φωτός

Ανοίγουμε το Labview και επιλεγούμε **>Open New VI.**

Στη συνέχεια επιλέγουμε **Window>Tile Left and Right** για να έχουμε σε μια οθόνη το **Front Panel** και το **Block Diagram.**

Συνδέουμε μετά την κάρτα DAQ USB 6009 με το καλώδιο USB στον (H/Y). Όταν γίνει η σύνδεση τότε εμφανίζεται ένα **test panel** στο οποίο γίνεται η αναγνώριση της κάρτας από το LabVIEW. Επιλέγουμε **OK**.



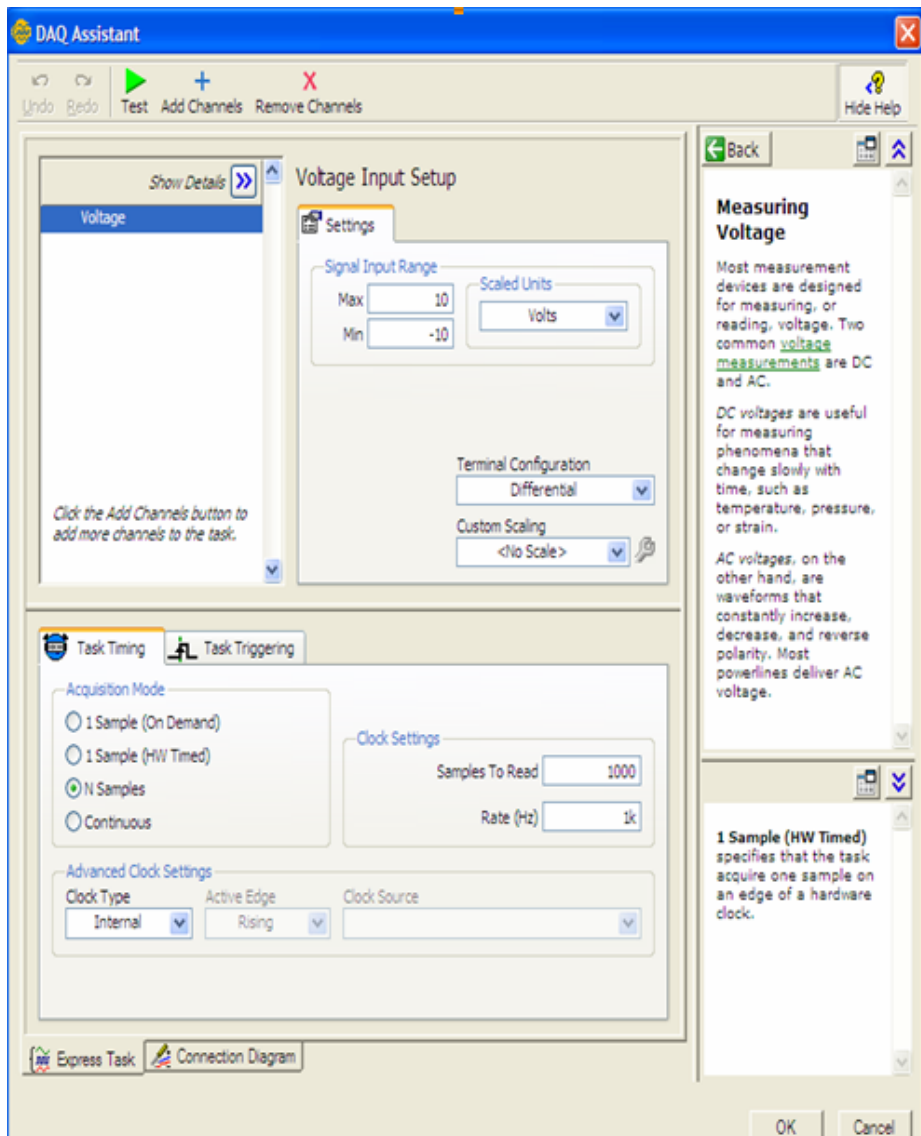
Επιλέγουμε στη συνέχεια **View> Functions Palette> Express> Input> DAQ assistant**. Τοποθετούμε το εικονίδιο **Daq Assistant** στο **Block Diagram** με αυτό τον τρόπο γίνεται η εισαγωγή του είδους της κάρτας στο Labview.



Επιλέγουμε **Analog Input** και στη συνέχεια επιλέγουμε **Voltage**.

Στη συνέχεια επιλέγουμε ένα από τα 8 κανάλια της κάρτας USB (π.χ. **a0**), και πατάμε **Finish**.

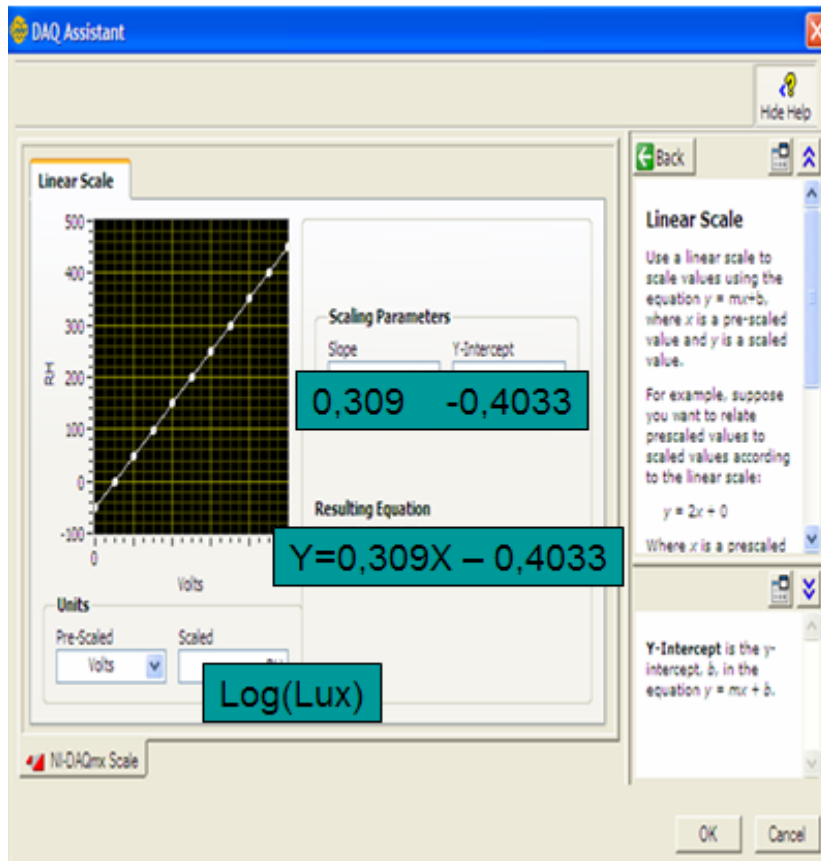
Εμφανίζεται στη συνέχεια το παρακάτω παράθυρο.



Στο πεδίο **Signal Input Range** γράφουμε τις τιμές του $\log(\text{Lux})$ που αντιστοιχούν στις τιμές -10 και 10 V. Γράφουμε δηλαδή στο πεδίο Max τον αριθμό 2,6867 και στο πεδίο Min τον αριθμό -3,4933.

Στο πεδίο **Terminal Configuration** επιλέγουμε **RSE**.

Στο πεδίο **Custom Scaling** επιλέγουμε **Create New** και στο νέο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγουμε **Linear**. Εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο το οποίο δίνει τη δυνατότητα να ορίσουμε τη μορφή της συνάρτησης μεταφοράς.



Λύνουμε την χαρακτηριστική εξίσωση του αισθητήρα ως προς το μετρούμενο φυσικό μέγεθος, την ένταση φωτός σε Lux.

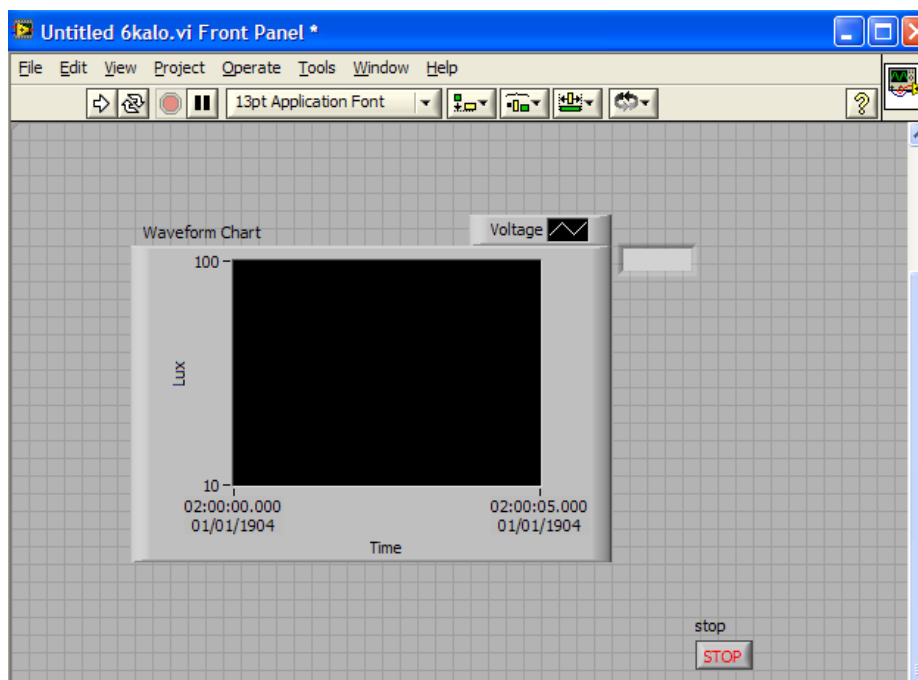
Βρίσκουμε την κλίση (**Slope**) και τη τομή της ευθείας με τον κατακόρυφο άξονα (**Y-Intercept**) και συμπληρώνουμε τα αντίστοιχα πεδία.

Στα πεδία **Pre-scaled** και **Scaled** επιλέγουμε **Volts** και **Lux**. Με αυτό τον τρόπο ορίζουμε τις μονάδες των αξόνων x και y αντίστοιχα. Πατάμε **OK**.

Στη συνέχεια επιλέγουμε στο Front Panel : **View>Control Palette>Modern>Graph> Waveform Chart** ώστε να τοποθετήσουμε μια γραφική παράσταση τύπου παλμογράφου για την παρακολούθηση της μέτρησης ως συνάρτηση του χρόνου.

Επιλέγουμε το εικονίδιο του **Waveform Chart** και πατάμε δεξί κλικ στον κατακόρυφο άξονα. Στη συνέχεια επιλέγουμε **properties>scales** και όπου **Time(x-axis)** επιλέγουμε (**y-axis**) και στη συνέχεια ενεργοποιούμε το **log**.

Δημιουργούμε επίσης έναν ελεγκτή στο Front Panel : **View>Control> Palette> Boolean>Stop Button**. Καθορίζουμε επίσης την περιοχή μετρήσεων στους άξονες του οργάνου απεικόνισης. Στο Front Panel δημιουργείται η παρακάτω εικόνα.



Από την παλέτα λειτουργιών επιλέγουμε **Mathematics > Exponentials> >10^x**, και τοποθετούμε το εικονίδιο στο Block Diagram.

Στη συνέχεια θα δημιουργήσουμε έναν κώδικα μέσω του οποίου θα επιλέγουμε το ρυθμό όπου θα λαμβάνονται οι μετρήσεις.

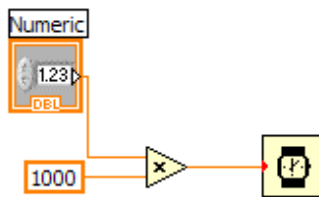
- από τη παλέτα αντικειμένων ένα στοιχείο ελέγχου **Numeric>Numeric Control**

- από την παλέτα λειτουργιών επιλέγουμε το σύμβολο του πολλαπλασιασμού **Numeric>Multiply**

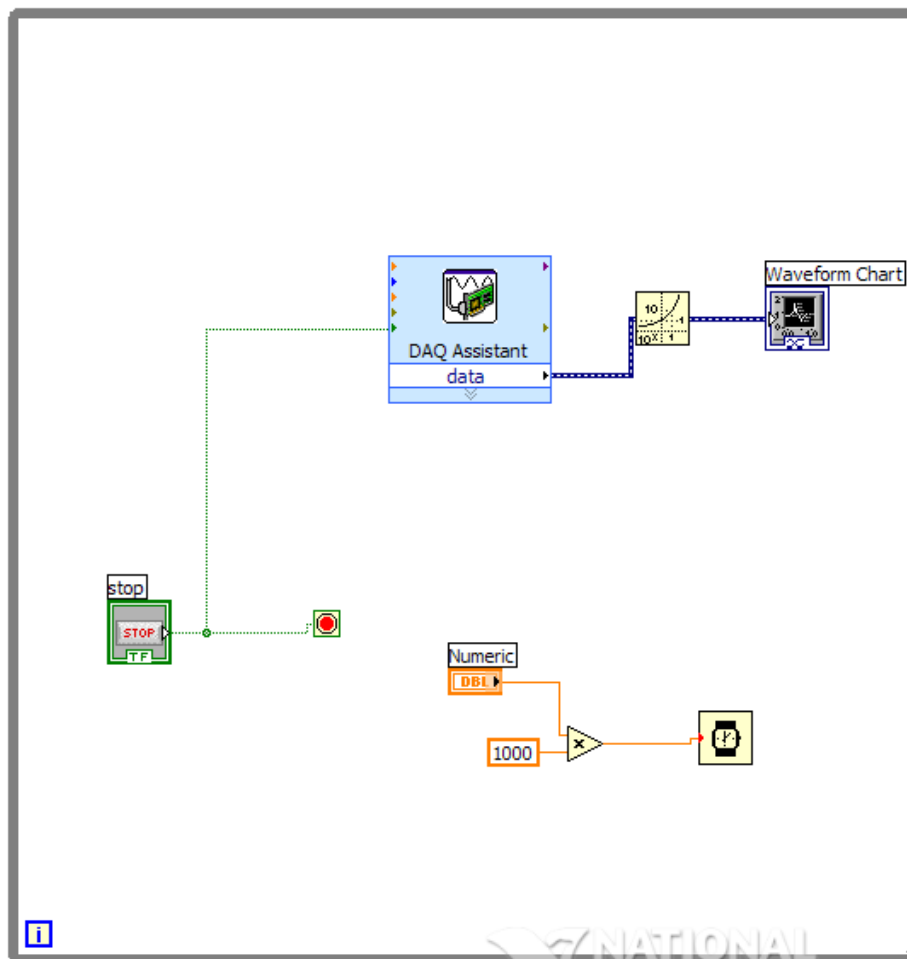
- με δεξί κλικ πάνω στο σύμβολο πολλαπλασιασμού επιλέγουμε **Create>Constant** και γράφουμε μέσα του τον αριθμό 1000 (σημαίνει 1000 ms).

- από την παλέτα λειτουργιών επιλέγουμε **Timing>Wait(ms)**

- καλωδιώνουμε τα παραπάνω αντικείμενα όπως φαίνεται παρακάτω



Καλωδιώνουμε στη συνέχεια τα υπόλοιπα αντικείμενα στο **Block Diagram** και στη συνέχεια τα τοποθετούμε μέσα σε μια δομή **While Loop**, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

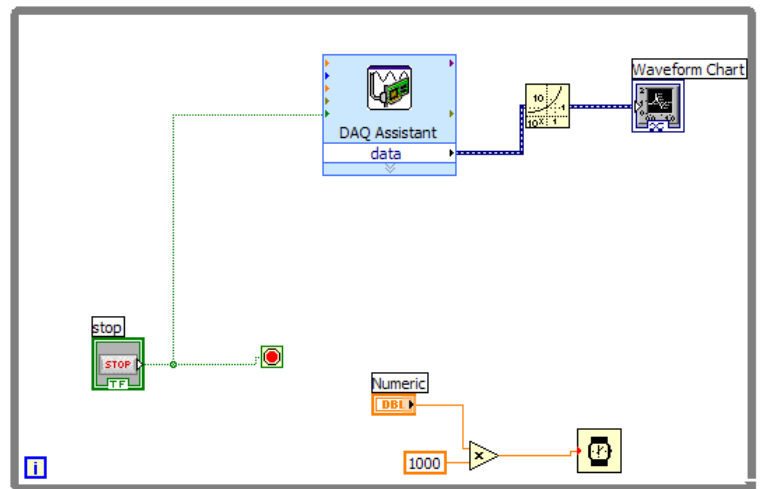
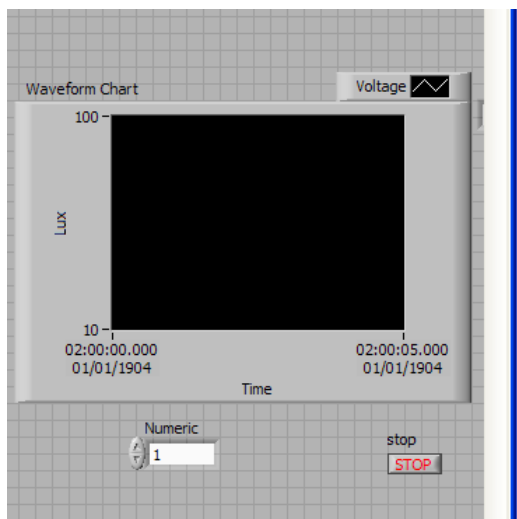


Στη συνέχεια συνδέουμε την είσοδο της κάρτας DAQ USB 6009 με την έξοδο του αισθητήρα φως, και επιλέγουμε από το Front Panel να λαμβάνεται μια μέτρηση κάθε 1 δευτερόλεπτο (στο **Numeric** γράφουμε τον αριθμό 1, έτσι οι μετρήσεις γίνονται κάθε $1000\text{ms} \cdot 1 = 1\text{sec}$).

Εκτελούμε το πρόγραμμα που δημιουργήσαμε πατώντας το **Run**.

Καθώς εκτελείται το πρόγραμμα και λαμβάνονται μετρήσεις, με την παλάμη μας πλησιάζουμε την φωτοαντίσταση και παρατηρούμε τις ενδείξεις των μετρήσεων.

Πατώντας το εικονίδιο **STOP** διακόπτουμε τη μέτρηση.



Τεχνικά χαρακτηριστικά καρτών DAQ USB 6008 και USB 6009

Low-Cost Multifunction DAQ for USB

NI USB-6008, NI USB-6009

- Small and portable
- 12 or 14-bit input resolution, at up to 48 kS/s
- Built-in, removable connectors for easier and more cost-effective connectivity
- 2 true DAC analog outputs for accurate output signals
- 12 digital I/O lines (TTL/LVTTL/CMOS)
- 32-bit event counter
- Student kits available
- OEM versions available

Operating Systems

- Windows 2000/XP
- Mac OS X¹
- Linux^{®1}
- Pocket PC
- Win CE

Recommended Software

- LabVIEW
- LabWindows/CVI

Measurement Services Software (included)

- NI-DAQmx
- Ready-to-run data logger

¹Mac OS X and Linux users need to download NI-DAQmx Base.



Product	Bus	Analog Inputs ¹	Input Resolution (bits)	Max Sampling Rate (kS/s)	Input Range (V)	Analog Outputs	Output Resolution (bits)	Output Rate (Hz)	Output Range (V)	Digital I/O Lines	32-Bit Counter	Trigger
USB-6009	USB	8 SE/4 DI	14	48	±1 to ±20	2	12	150	0 to 5	12	1	Digital
USB-6008	USB	8 SE/4 DI	12	10	±1 to ±20	2	12	150	0 to 5	12	1	Digital

¹SE = single ended, DI = differential

Hardware Description

The National Instruments USB-6008 and USB-6009 multifunction data acquisition (DAQ) modules provide reliable data acquisition at a low price. With plug-and-play USB connectivity, these modules are simple enough for quick measurements but versatile enough for more complex measurement applications.

Software Description

The NI USB-6008 and USB-6009 use NI-DAQmx high-performance, multithreaded driver software for interactive configuration and data acquisition on Windows OSs. All NI data acquisition devices shipped with NI-DAQmx also include VI Logger Lite, a configuration-based data-logging software package.

Mac OS X and Linux users can download NI-DAQmx Base, a multiplatform driver with a limited NI-DAQmx programming interface. You can use NI-DAQmx Base to develop customized data acquisition applications with National Instruments LabVIEW or C-based development environments. NI-DAQmx Base includes a ready-to-run data logger application that acquires and logs up to eight channels of analog data.

PDA users can download NI-DAQmx Base for Pocket PC and Win CE to develop customized handheld data acquisition applications.

Recommended Accessories

The USB-6008 and USB-6009 have removable screw terminals for easy signal connectivity. For extra flexibility when handling multiple wiring configurations, NI offers the USB-6008/09 Accessory Kit, which includes two extra sets of screw terminals, extra labels, and a screwdriver.

In addition, the USB-6008/09 Prototyping Accessory provides space for adding more circuitry to the inputs of the USB-6008 or USB-6009.

Common Applications

The USB-6008 and USB-6009 are ideal for a number of applications where economy, small size, and simplicity are essential, such as:

- Data logging – Log environmental or voltage data quickly and easily.
- Academic lab use – The low price facilitates student ownership of DAQ hardware for completely interactive lab-based courses. (Academic pricing available. Visit ni.com/academic for details.)
- Embedded OEM applications.

Low-Cost Multifunction DAQ for USB

Specifications

Typical at 25 °C unless otherwise noted.

Analog Input

Absolute accuracy, single-ended

Range	Typical at 25 °C (mV)	Maximum (0 to 55 °C) (mV)
±10	14.7	138

Absolute accuracy at full scale, differential¹

Range	Typical at 25 °C (mV)	Maximum (0 to 55 °C) (mV)
±20	14.7	138
±10	7.73	84.8
±5	4.28	58.4
±4	3.59	53.1
±2.5	2.56	45.1
±2	2.21	42.5
±1.25	1.70	38.9
±1	1.53	37.5

Number of channels..... 8 single-ended/4 differential

Type of ADC Successive approximation

ADC resolution (bits)

Module	Differential	Single-Ended
USB-6008	12	11
USB-6009	14	13

Maximum sampling rate (system dependent)

Module	Maximum Sampling Rate (kS/s)
USB-6008	10
USB-6009	48

Input range, single-ended..... ±10 V

Input range, differential..... ±20, ±10, ±5, ±4, ±2.5, ±2, ±1.25, ±1 V

Maximum working voltage ±10 V

Overvoltage protection ±35 V

FIFO buffer size 512 B

Timing resolution 41.67 ns (24 MHz timebase)

Timing accuracy 100 ppm of actual sample rate

Input impedance 144 k

Trigger source..... Software or external digital trigger

System noise..... 0.3 LSB_{rms} (±10 V range)

Analog Output

Absolute accuracy (no load) 7 mV typical, 36.4 mV maximum at full scale

Number of channels..... 2

Type of DAC Successive approximation

DAC resolution 12 bits

Maximum update rate 150 Hz, software-timed

Output range 0 to +5 V

Output impedance..... 50 Ω

Output current drive..... 5 mA

Power-on state..... 0 V

Slew rate..... 1 V/μs

Short-circuit current..... 50 mA

Digital I/O

Number of channels..... 12 total
8 (P0.<0..7>)
4 (P1.<0..3>)

Direction control Each channel individually programmable as input or output

Output driver type

USB-6008 Open-drain

USB-6009 Each channel individually programmable as push-pull or open-drain

Compatibility CMOS, TTL, LVTTL

Internal pull-up resistor 4.7 kΩ to +5 V

Power-on state..... Input (high impedance)

Absolute maximum voltage range..... -0.5 to +5.8 V

Digital logic levels

Level	Min	Max	Units
Input low voltage	-0.3	0.8	V
Input high voltage	2.0	5.8	V
Input leakage current	-	50	μA
Output low voltage (I = 8.5 mA)	-	0.8	V
Output high voltage (push-pull, I = -8.5 mA)	2.0	3.5	V
Output high voltage (open-drain, I = -0.5 mA, nominal)	2.0	5.0	V
Output high voltage (open-drain, I = -8.5 mA, with external pull-up resistor)	2.0	-	V

Counter

Number of counters 1

Resolution 32 bits

Counter measurements..... Edge counting (falling edge)

Pull-up resistor 4.7 kΩ to 5 V

Maximum input frequency..... 5 MHz

Minimum high pulse width..... 100 ns

Minimum low pulse width..... 100 ns

Input high voltage 2.0 V

Input low voltage 0.8 V

Power available at I/O connector

+5 V output (200 mA maximum) +5 V typical

+4.85 V minimum

+2.5 V output (1 mA maximum)..... +2.5 V typical

+2.5 V output accuracy 0.25% max

Voltage reference temperature drift... 50 ppm/°C max

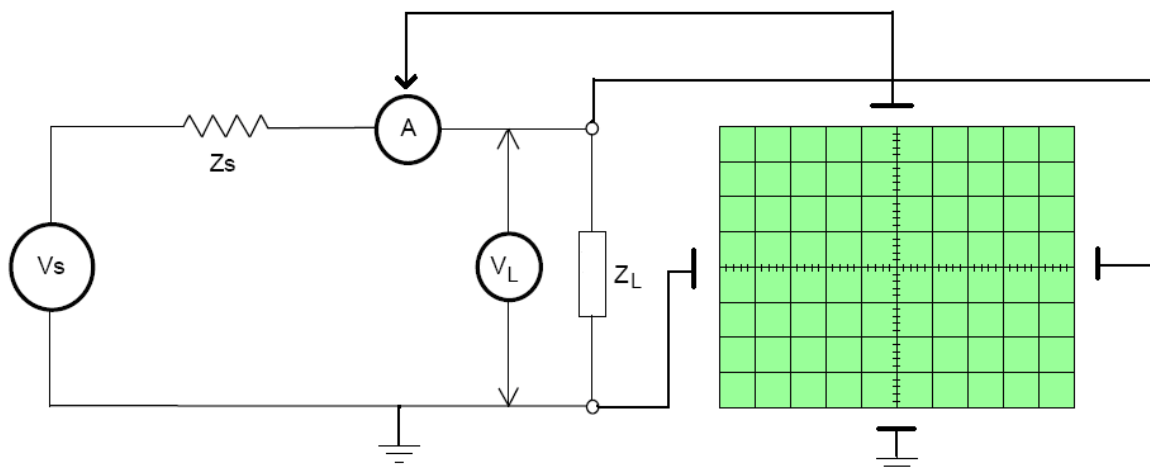
¹Input voltages may not exceed the working voltage range.

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ I-V ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ

ΑΝΑΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟΓΡΑΦΩΝ

Η αναλογική ανάλυση υπογραφών (Analog Signature Analysis, ASA) είναι μια διαδεδομένη και χρήσιμη μέθοδος ελέγχου ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Στη μέθοδο αυτή, εφαρμόζεται μια ημιτονική τάση συγκεκριμένης συχνότητας σε ένα ηλεκτρονικό εξάρτημα και λαμβάνεται η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος – τάσης (I-V), που καλείται αναλογική υπογραφή του. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι το εξάρτημα να βρίσκεται εκτός τροφοδοσίας, απομονωμένο. Η χαρακτηριστική καμπύλη του ηλεκτρονικού εξαρτήματος μπορεί να απεικονιστεί σε μια οθόνη (παλμογράφου, Η/Υ, κλπ). Η τάση απεικονίζεται με οριζόντια απόκλιση ενώ το ρεύμα με κατακόρυφη.

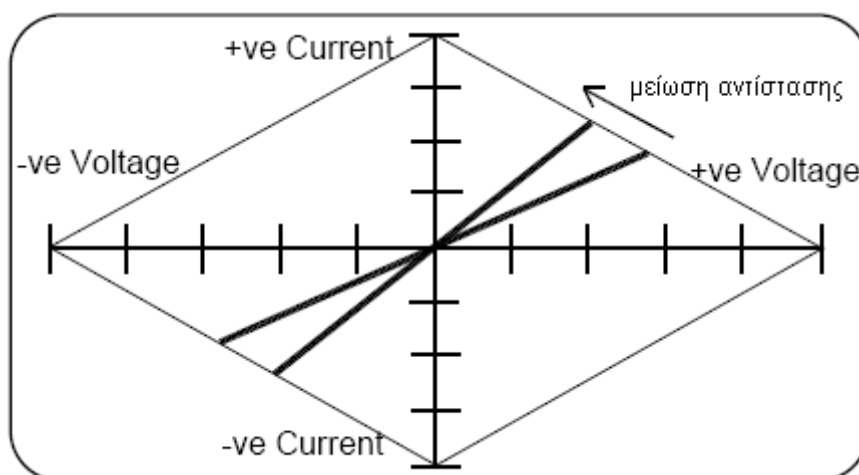
Στο Σχήμα 1, παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα του συστήματος μέτρησης που χρησιμοποιείται για την απεικόνιση των αναλογικών υπογραφών, διαφόρων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, σε μια οθόνη. Η V_s είναι μια ημιτονική πηγή τάσης ορισμένης συχνότητας. Το υπό έλεγχο εξάρτημα αντιστοιχεί στην σύνθετη αντίσταση Z_L . Η τάση στα άκρα της Z_L μετρείται και απεικονίζεται στον οριζόντιο άξονα της οθόνης. Το ρεύμα που διαρρέει το εξάρτημα είναι ανάλογο της μετρούμενης τάσης στα άκρα της αντίστασης Z_s . Η τάση αυτή απεικονίζεται στον κατακόρυφο άξονα της οθόνης.



Σχήμα 1.

Οι βασικές αναλογικές υπογραφές είναι πέντε: της αντίστασης R, της χωρητικότητας C, της αυτεπαγωγής L, της διόδου D (απλός ημιαγωγός) και της διόδου Z (Zener).

Στους ωμικές αντιστάτες, επειδή ισχύει ο νόμος του Ohm, ο λόγος του ρεύματος προς την τάση είναι σταθερός. Έτσι η υπογραφή των αντιστατών θα είναι μια διαγώνια γραμμή στην αντίστοιχη οθόνη, η κλίση της οποίας συνδέεται με την τιμή της αντίστασης (Σχήμα 2).

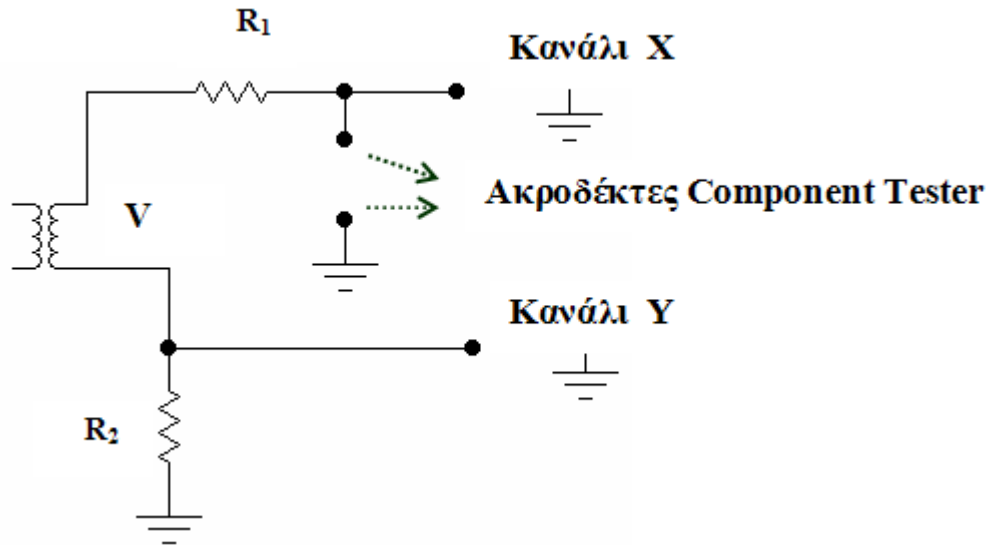


Σχήμα 2.

Στους ιδανικούς πυκνωτές και στα ιδανικά πηνία, η τάση παρουσιάζει μια διαφορά φάσης $\pm 90^\circ$ με το ρεύμα, με αποτέλεσμα η αναλογική υπογραφή τους να έχει συνήθως σχήμα έλλειψης (σπάνια κύκλου). Ο λόγος του μήκους του κατακόρυφου άξονα της έλλειψης προς το αντίστοιχο του οριζόντιου άξονα σχετίζεται άμεσα με τις τιμές της χωρητικότητας και της αυτεπαγωγής.

Η υπογραφή της απλής διόδου D, επειδή επιτρέπει την ροή ρεύματος κατά τη μια κατεύθυνση, απεικονίζεται με μια κατακόρυφη γραμμή προς τα πάνω και δεξιά αμέσως μετά το κέντρο των αξόνων της οθόνης (περίπου στα 0,6 V του οριζόντιου άξονα). Η υπογραφή της διόδου Z παρουσιάζει επιπλέον μια κατακόρυφη γραμμή προς τα κάτω αριστερά μετά το κέντρο των αξόνων της οθόνης, που αντιστοιχεί στην τάση διάσπασής της.

Στην εργαστηριακή άσκηση που ακολουθεί, θα χρησιμοποιηθεί ο Component Tester του παλμογράφου, για τη μελέτη των αναλογικών υπογραφών απλών και σύνθετων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, καθώς επίσης και για τον έλεγχο της καλής λειτουργίας τους. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται το απλοποιημένο κύκλωμα που αντιστοιχεί στην λειτουργία του Component Tester.



Σχήμα 3.

Από το κύκλωμα του Σχήματος 3 είναι φανερό ότι, όταν οι ακροδέκτες του Component Tester είναι ανοικτοί, τότε το κύκλωμα δεν θα διαρρέεται από ρεύμα, η τάση στα άκρα της αντίστασης R_2 θα είναι μηδενική και συνεπώς δεν θα παρατηρείται κατακόρυφη ταλάντωση στο κανάλι Y. Η απεικόνιση της υπογραφής, στην περίπτωση του ανοικτού κυκλώματος, είναι μια οριζόντια γραμμή στην οθόνη, η οποία οφείλεται στην ταλάντωση της τάσης V στο κανάλι X (που αντιστοιχεί σε $8,5 V_{rms}$ στον παλμογράφο Hameg). Όταν οι ακροδέκτες του Component Tester είναι βραχυκυκλωμένοι, τότε το κύκλωμα θα διαρρέεται από μέγιστο ρεύμα, η τάση στα άκρα της αντίστασης R_2 θα είναι μέγιστη και συνεπώς θα παρατηρείται μόνο η κατακόρυφη ταλάντωση στο κανάλι Y, επειδή η τάση στο κανάλι X θα είναι μηδενική λόγω βραχυκυκλώματος. Η απεικόνιση της υπογραφής, στην περίπτωση του βραχυκυκλώματος, είναι μια κατακόρυφη γραμμή στην οθόνη (που αντιστοιχεί σε $24 mA_{rms}$ στον παλμογράφο Hameg).

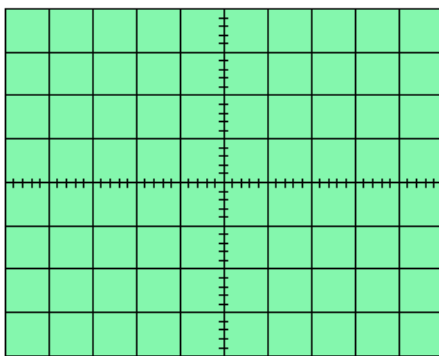
Εργαστηριακές δραστηριότητες

A. Έλεγχος αντιστάσεων, πυκνωτών, πηνίων και ημιαγωγών μέσω του component tester του παλμογράφου

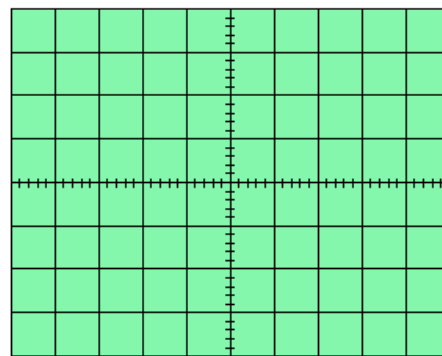
A1. Προετοιμάσετε τον παλμογράφο για έλεγχο εξαρτημάτων (Test Component).

A2. Συνδέστε μεταξύ των ακροδεκτών του παλμογράφου ένα διακόπτη. Σχεδιάστε την εικόνα του παλμογράφου σε κατάσταση ON & OFF.

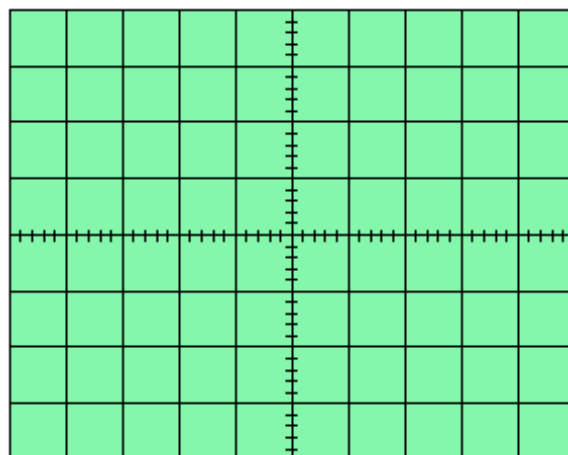
κατάσταση ON



κατάσταση OFF

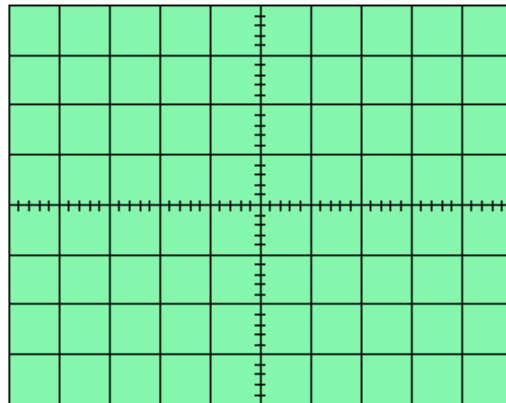


A3. Σας δίνονται 3 αντιστάτες με συγκεκριμένες τιμές. Συνδέστε τους διαδοχικά μεταξύ των ακροδεκτών του παλμογράφου, αρχίζοντας από αυτόν με τη μικρότερη τιμή. Τις τιμές αυτές, μαζί με την αντίστοιχη εικόνα του παλμογράφου να σχεδιάσετε παρακάτω στο ίδιο διάγραμμα.

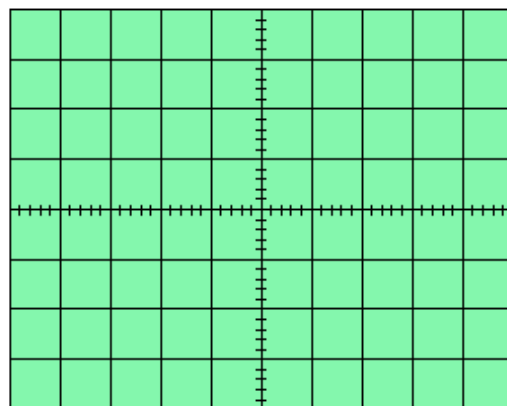


A4. Συνδέστε μεταξύ των ακροδεκτών του παλμογράφου ένα ποτενσιόμετρο **5ΚΩ**. Σχεδιάστε την εικόνα του παλμογράφου για

διαφορετικές τιμές του ποτενσιομέτρου στο ίδιο διάγραμμα (ελάχιστη τιμή – μεσαία τιμή – μέγιστη τιμή).

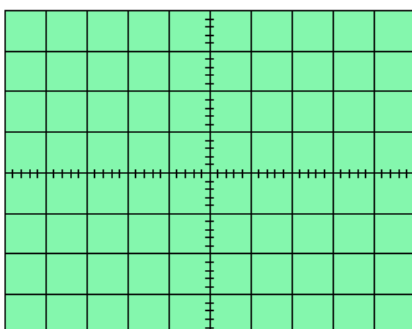


A5. Σας δίνονται 3 πυκνωτές με συγκεκριμένες τιμές. Συνδέστε τους διαδοχικά μεταξύ των ακροδεκτών του παλμογράφου, αρχίζοντας από αυτόν με τη μικρότερη τιμή. Τις τιμές αυτές, μαζί με την αντίστοιχη εικόνα του παλμογράφου να σχεδιάσετε παρακάτω στο ίδιο διάγραμμα.

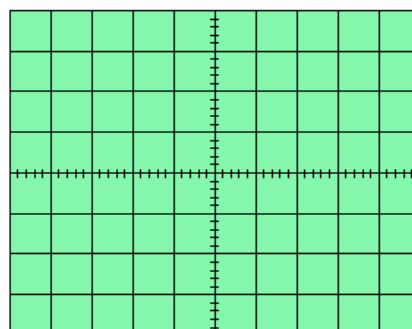


A6. Συνδέστε μεταξύ των ακροδεκτών του παλμογράφου το πρωτεύων ή δευτερεύων ενός μετασχηματιστή. Σχεδιάστε τις αντίστοιχες εικόνες του παλμογράφου σε κάθε περίπτωση.

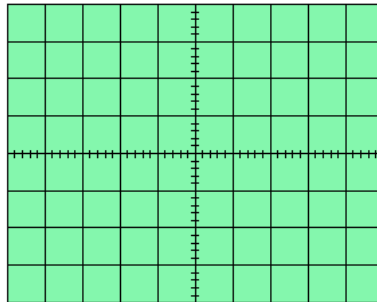
Πρωτεύων



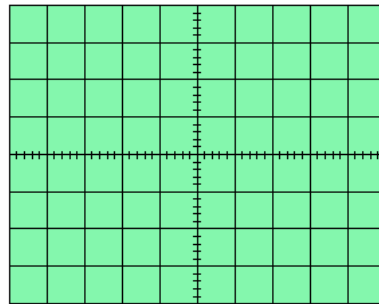
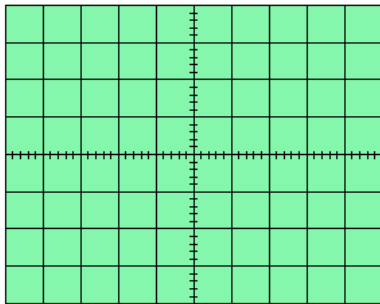
Δευτερεύων



A7. Συνδέστε μεταξύ των ακροδεκτών του παλμογράφου μία απλή δίοδο (Si ή Ge) . Σχεδιάστε την εικόνα του παλμογράφου παρακάτω.



A8. Συνδέστε μεταξύ των ακροδεκτών του παλμογράφου, μία δίοδο Zener 6,2 V και μια δίοδο Zener 12 V. Σχεδιάστε τις αντίστοιχες εικόνες του παλμογράφου παρακάτω.



A7. Να γράψετε τα συμπεράσματά σας όπως προκύπτουν από τους ελέγχους που κάνατε σε όλα τα παραπάνω εξαρτήματα της δραστηριότητας A.

Διακόπτες:

.....

.....

.....

.....

Αντιστάτες:

.....

.....

.....

.....

Πυκνωτές:

.....
.....
.....
.....

Πηνία:

.....
.....
.....
.....

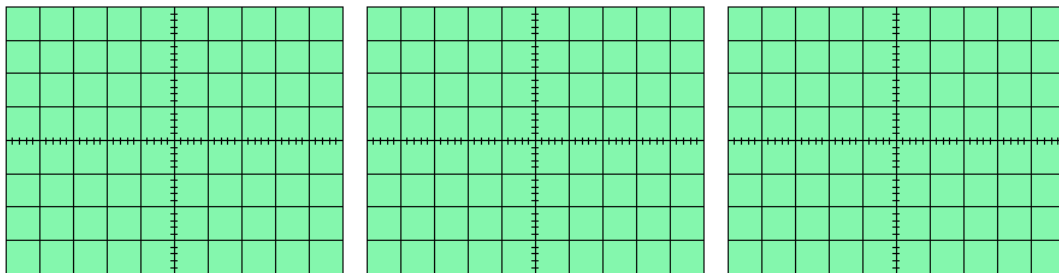
Ημιαγωγοί:

.....
.....
.....
.....

B. Έλεγχος ημιαγωγικών διατάξεων και σύνθετων κυκλωμάτων μέσω του Component Tester του παλμογράφου

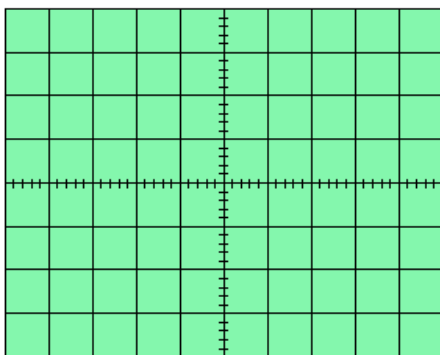
B1. Προετοιμάσετε τον παλμογράφο για έλεγχο εξαρτημάτων (Test Component).

B2. Συνδέστε μεταξύ των ακροδεκτών του παλμογράφου ένα τρανζίστορ. Σχεδιάστε την εικόνα του παλμογράφου για τις επαφές B-E , B-C και E-C.

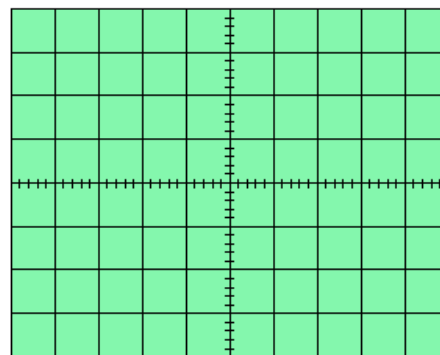


B3. Σχεδιάστε τις υπογραφές των παρακάτω σύνθετων κυκλωμάτων σε κάθε περίπτωση.

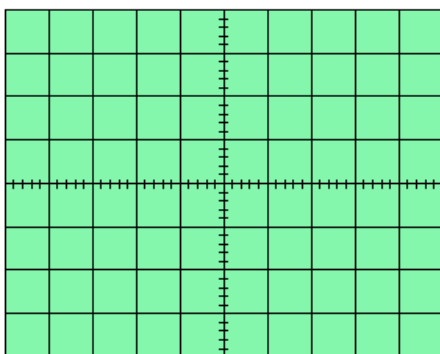
R-C σε σειρά



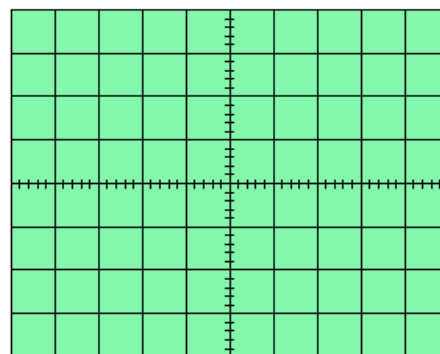
R-C παράλληλα



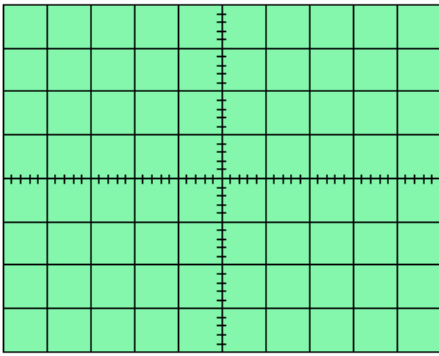
R-L σε σειρά



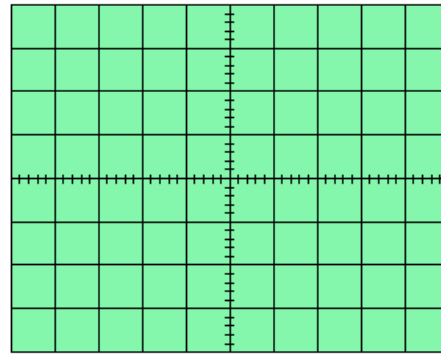
R-L παράλληλα



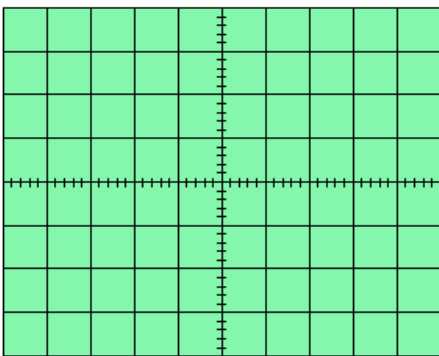
Zener - R σε σειρά



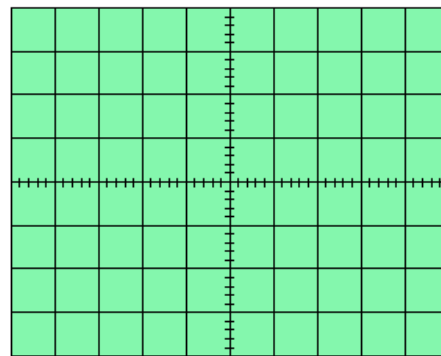
Zener - R παράλληλα



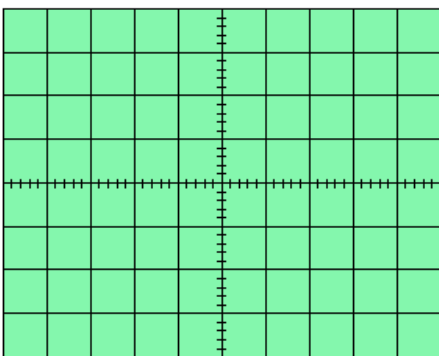
Zener - C σε σειρά



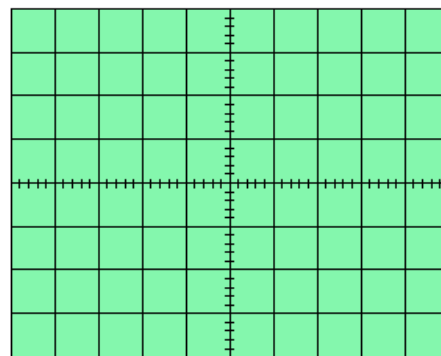
Zener - C παράλληλα



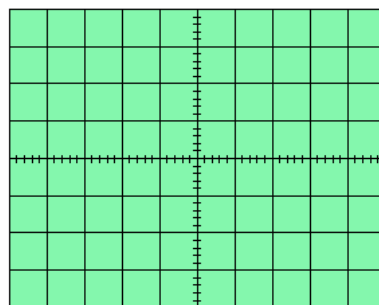
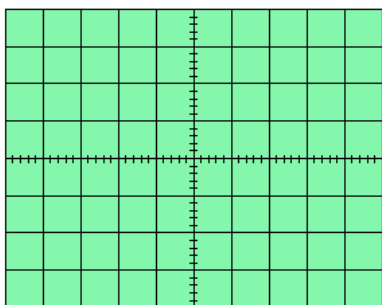
Zener - R - C σε σειρά

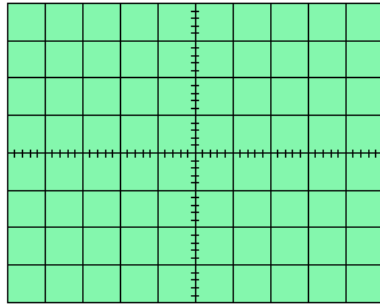
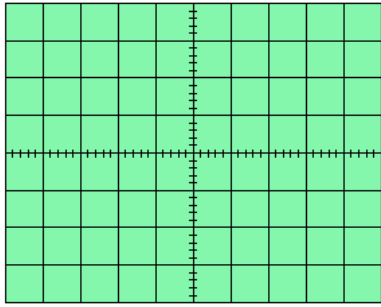


Zener - R - C παράλληλα



B4. Να εξετάσετε τις υπογραφές ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος, σχεδιάζοντας τουλάχιστον 4 από αυτές.





B5. Να γράψετε τα συμπεράσματά σας όπως προκύπτουν από τους ελέγχους που κάνατε σε όλα τα παραπάνω εξαρτήματα της δραστηριότητας Β.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

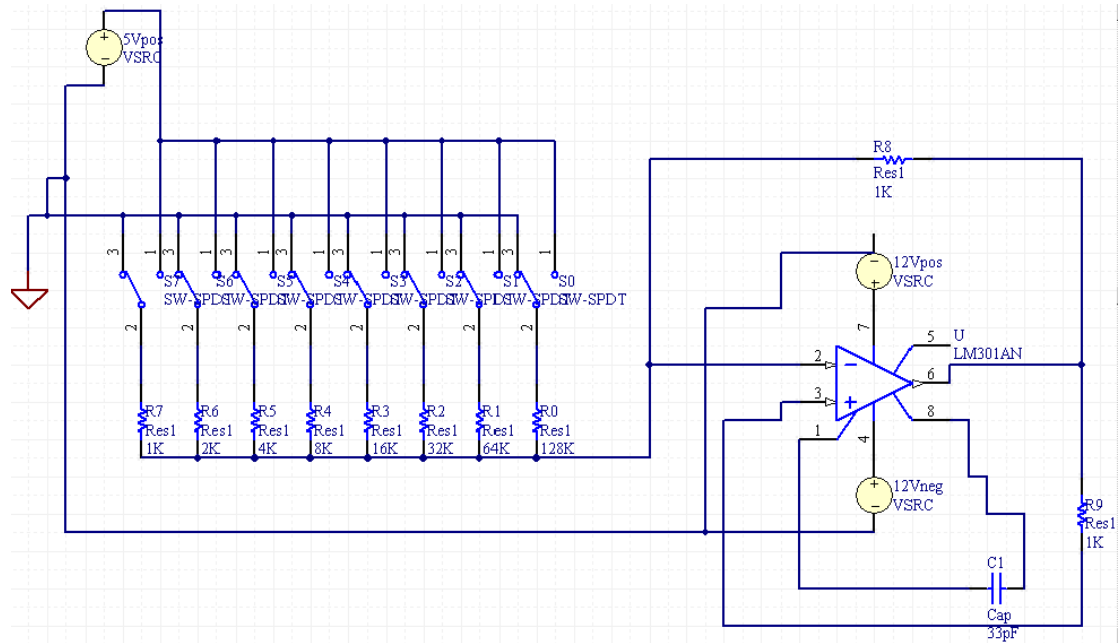
ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ

Μετατροπή ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (DAC)

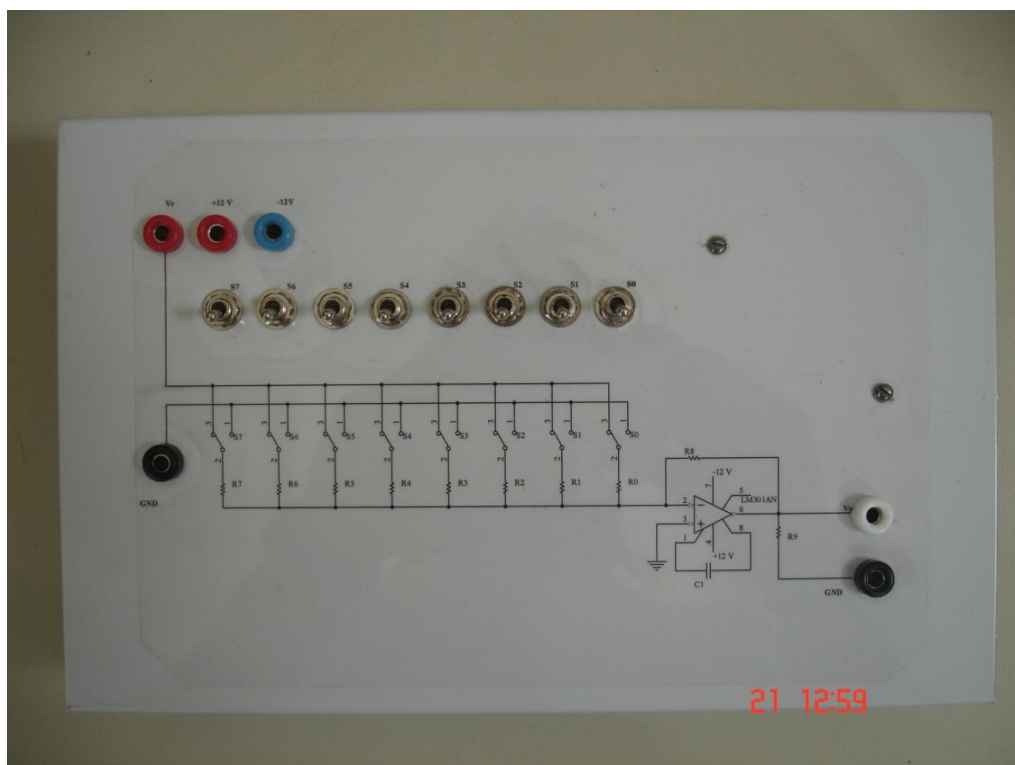
Για τη συνεργασία μιας ψηφιακής συσκευής με μία αναλογική, πρέπει να παρεμβάλουμε έναν μετατροπέα ψηφιακού σε αναλογικό σήμα. Ένα παράδειγμα είναι στα γνωστά mp3 players όπου τα δεδομένα είναι αποθηκευμένα σε ψηφιακή μορφή και πρέπει να μετατραπούν σε αναλογικό σήμα προκειμένου να ερμηνευτούν σε ήχο από τα ηχεία. Για την κατασκευή του DAC χρησιμοποιήθηκαν ένα σύνολο από αντιστάσεις, διακόπτες και ένας τελεστικός ενισχυτής (LM301). Η λειτουργία του συγκεκριμένου DAC βασίζεται στην επιλογή κατάλληλων αντισταθμιστικών αντιστάσεων, ώστε τα παραγόμενα διαδοχικά ρεύματα να έχουν λόγο ίσο με 2. Η τάση εξόδου δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$V_o = V_r \frac{R_8}{R_0} (\alpha_0 2^0 + \alpha_1 2^1 + \alpha_2 2^2 + \alpha_3 2^3 + \alpha_4 2^4 + \alpha_5 2^5 + \alpha_6 2^6 + \alpha_7 2^7) \quad (1)$$

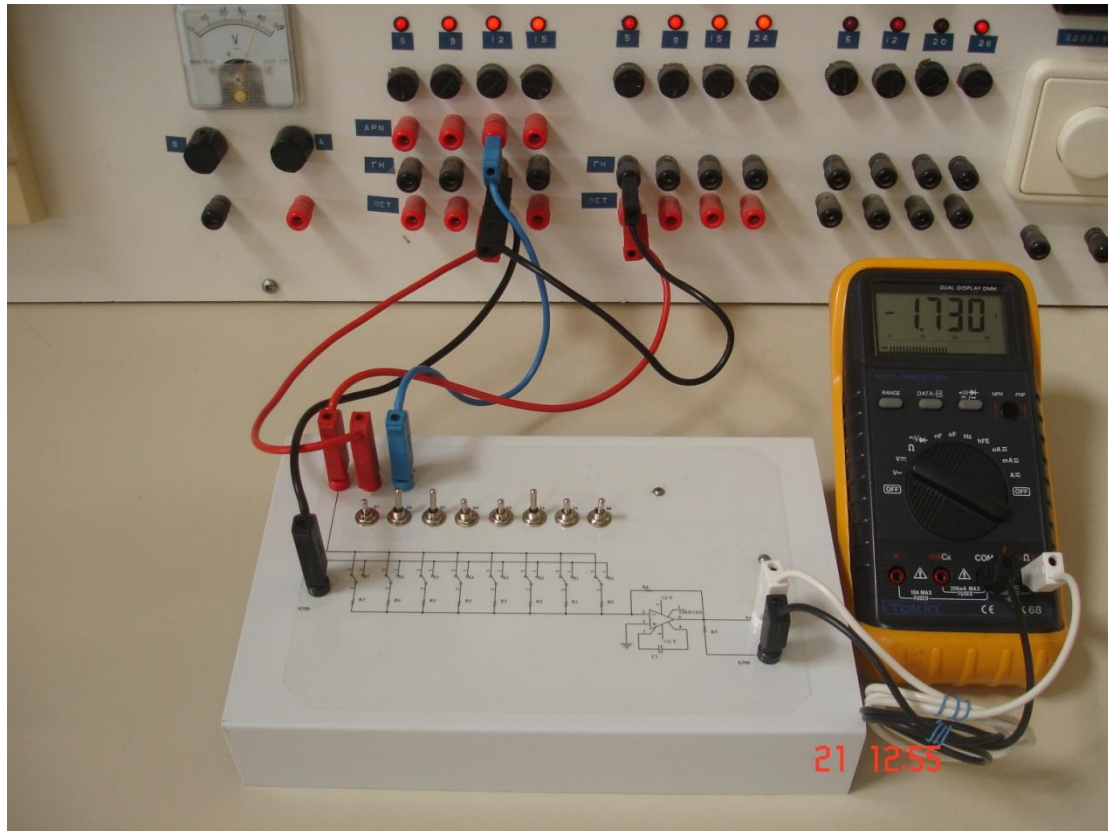
όπου $V_r=5$ V, $R_0= 128$ kΩ, $R_8= 1$ kΩ, $\alpha_i=1$ όταν ο διακόπτης S_i είναι κλειστός και 0 όταν είναι ανοιχτός. Οι υπόλοιπες τιμές των αντιστάσεων όπως διακρίνονται από το παρακάτω κύκλωμα έχουν τιμές $R_1= 64$ kΩ, $R_2= 32$ kΩ, $R_3= 16$ kΩ, $R_4= 8$ kΩ, $R_5= 4$ kΩ, $R_6= 2$ kΩ και $R_7= 1$ kΩ.



Εσωτερικό κύκλωμα κατασκευής DAC



Κατασκευή DAC



Συνδεσμολογία DAC

Απαιτούμενα υλικά

1. Εκπαιδευτική κατασκευή DAC.
2. Πάγκο με τάση 5V και συμμετρική τροφοδοσία τάσης $\pm 12V$.
3. 7 καλώδια κατάλληλων χρωμάτων.
4. Πολύμετρο.

Υλοποίηση της εργαστηριακής άσκησης

1. Συνδέουμε συμμετρική τάση $\pm 12V$ στο κύκλωμα χρησιμοποιώντας την τυποποιημένη τροφοδοσία των πάγκων. Επισημαίνετε ότι απαιτείται να συνδέσουμε πρώτα τη γείωση.
2. Συνδέουμε την V_r στα 5V από την τυποποιημένη τροφοδοσία των πάγκων.
3. Θέτουμε το πολύμετρο σε λειτουργία συνεχούς τάσης.
4. Συνδέουμε το πολύμετρο στη έξοδο V_o και στη γη.
5. Ανοίγουμε κατάλληλα τους διακόπτες A_i , μετράμε την τάση εξόδου V_o και συμπληρώνουμε τον παρακάτω Πίνακα 1.

6. Που οφείλονται οι διαφορές στις τιμές V_o που υπολογίσθηκαν θεωρητικά από την σχέση 1 και στις αντίστοιχες τιμές V_o που μετρήθηκαν;

Πίνακας 1.

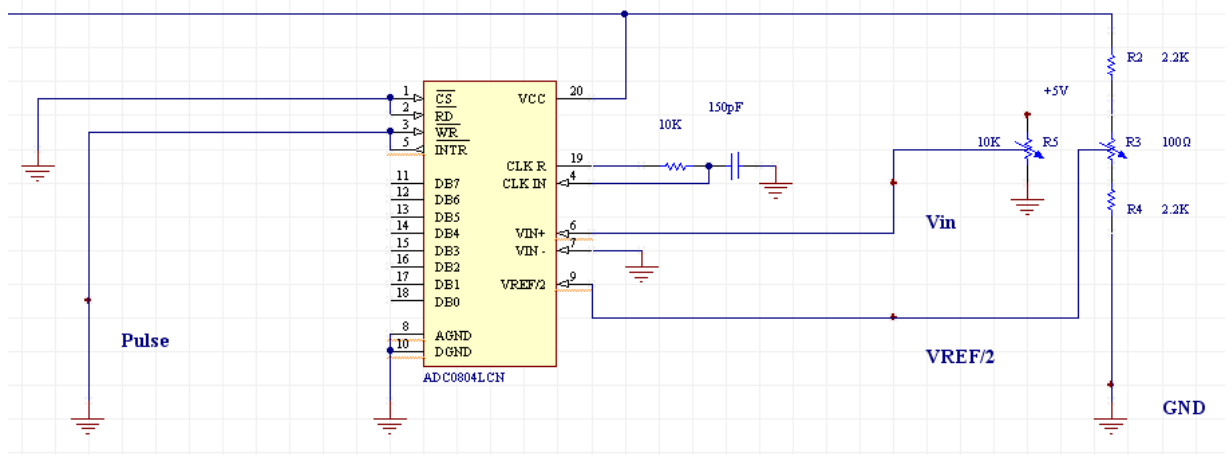
A7	A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0	V_o (V) Υπολογισθείσα	V_o (V) Μετρούμενη
0	0	0	0	0	0	1	0		
0	0	1	0	1	0	0	0		
0	0	1	0	1	0	1	0		
0	1	0	0	1	0	1	0		
1	0	1	0	1	1	1	0		
1	1	1	1	1	1	1	1		

Μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC)

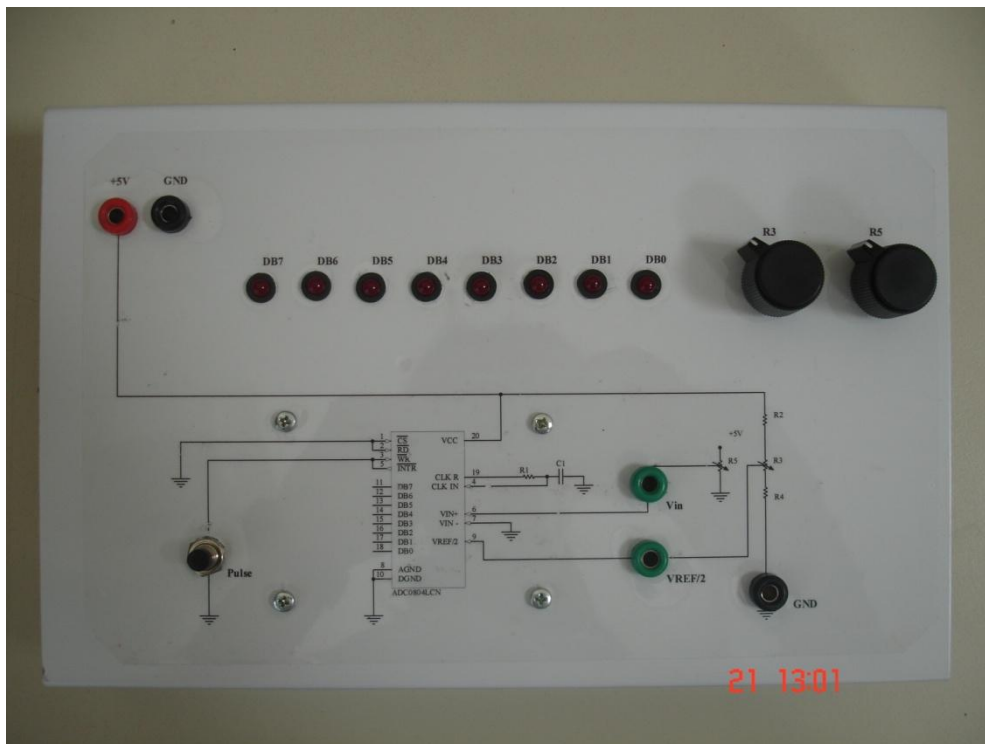
Ένας μετατροπέας ADC χρησιμοποιείται για τη συνεργασία μιας αναλογικής συσκευής με μια ψηφιακή. Για παράδειγμα, για την επεξεργασία ενός αναλογικού σήματος από έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή θα πρέπει να παρεμβάλουμε έναν μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC). Στο κύκλωμα της συγκεκριμένης εργαστηριακής άσκησης χρησιμοποιείται ο μετατροπέας ADC 0804 που η λειτουργία του βασίζεται στη μέθοδο των διαδοχικών προσεγγίσεων (successive approximation). Ο ακροδέκτης 9 του ADC 0804 δέχεται μια τάση αναφοράς. Αν στην τάση αναφοράς εφαρμόσουμε τάση 2,5 V τότε η μέγιστη τάση που μπορεί να μετατρέψει είναι τα 5V, για αυτό το λόγο η τάση στον ακροδέκτη 9 ονομάζεται $V_{REF}/2$. Αφού λοιπόν η μέγιστη τιμή είναι 5V και η έξοδος είναι n=8 bit η διακριτική του ικανότητα (ή αλλιώς το βήμα κβάντισης q) είναι ίσο με

$$q = \frac{V_{\max}}{2^n - 1} = \frac{5}{2^8 - 1} = 19,6 \text{ mV}$$

Για κάθε μεταβολή τάσης κατά 19.53mV έχουμε μεταβολή ενός bit στην ψηφιακή έξοδο.



Εσωτερικό κύκλωμα κατασκευής ADC



Κατασκευή ADC



Συνδεσμολογία ADC

Απαιτούμενα υλικά

1. Εκπαιδευτική κατασκευή ADC.
2. Τροφοδοσία 5V.
3. 4 καλώδια κατάλληλων χρωμάτων.
4. Πολύμετρο.

Υλοποίηση της εργαστηριακής άσκησης

1. Συνδέουμε τους ακροδέκτες +5V και GND στο πάνω αριστερό μέρος της κατασκευής με την προεπιλεγμένη τροφοδοσία πάγκου 5V.
2. Θέτουμε το πολύμετρο σε λειτουργία συνεχής τάσης.
3. Συνδέουμε το πολύμετρο στο $V_{REF}/2$ και στη γη.
4. Στρέφουμε το ποτενσιόμετρο R3 μέχρι η $V_{REF}/2$ να γίνει ακριβώς 2,5 V.
5. Πατάμε το κουμπί pulse μια φορά για να δώσουμε έναν παλμό στο ολοκληρωμένο ADC0804 και να αρχίσει να λειτουργεί.
6. Συνδέουμε το πολύμετρο στο V_{in} και στη γη.

7. Στρέφουμε το ποτενσιόμετρο R5 δίνοντας μια τιμή τάσης V_{in} στο ολοκληρωμένο.
8. Παρατηρούμε την τάση που δώσαμε, να μετατρέπεται σε ψηφιακή στις φωτοδιόδους της κατασκευής, με Most Significant Bit το DB7 και Least Significant Bit το DB0.
9. Συμπληρώστε τον παρακάτω Πίνακα 2.
10. Τι αποτέλεσμα μπορεί να έχει το γεγονός ότι οι τιμές των διαιρέσεων της δεύτερης από αριστερά στήλης του Πίνακα 2, δεν είναι πάντα ακέραιες;

Πίνακας 2.

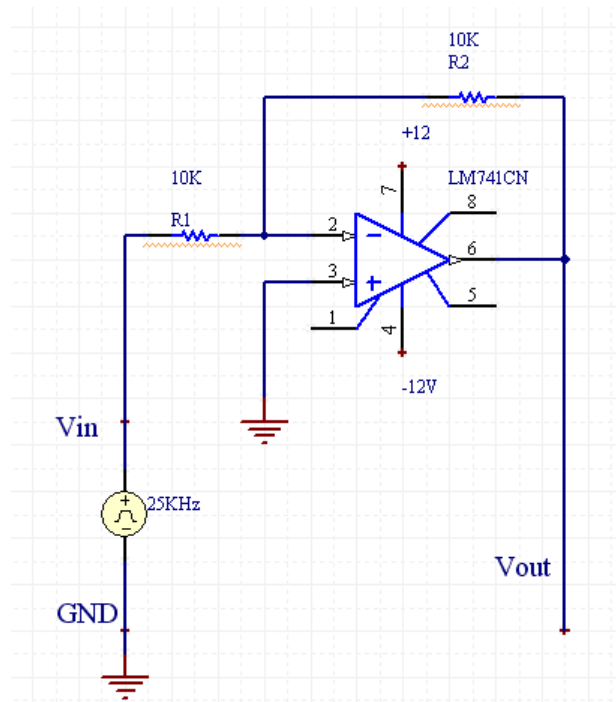
V_{in} (V) Τάση εισόδου	$V_{in}/$ 0.0196V	D7 128	D6 64	D5 32	D4 16	D3 8	D2 4	D1 2	D0 1
0.5V									
1V									
1.5V									
2V									
2.5V									
3V									
3.5V									
4V									
4.5V									
5V									

ΜΕΤΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΥ ΕΝΙΣΧΥΤΗ

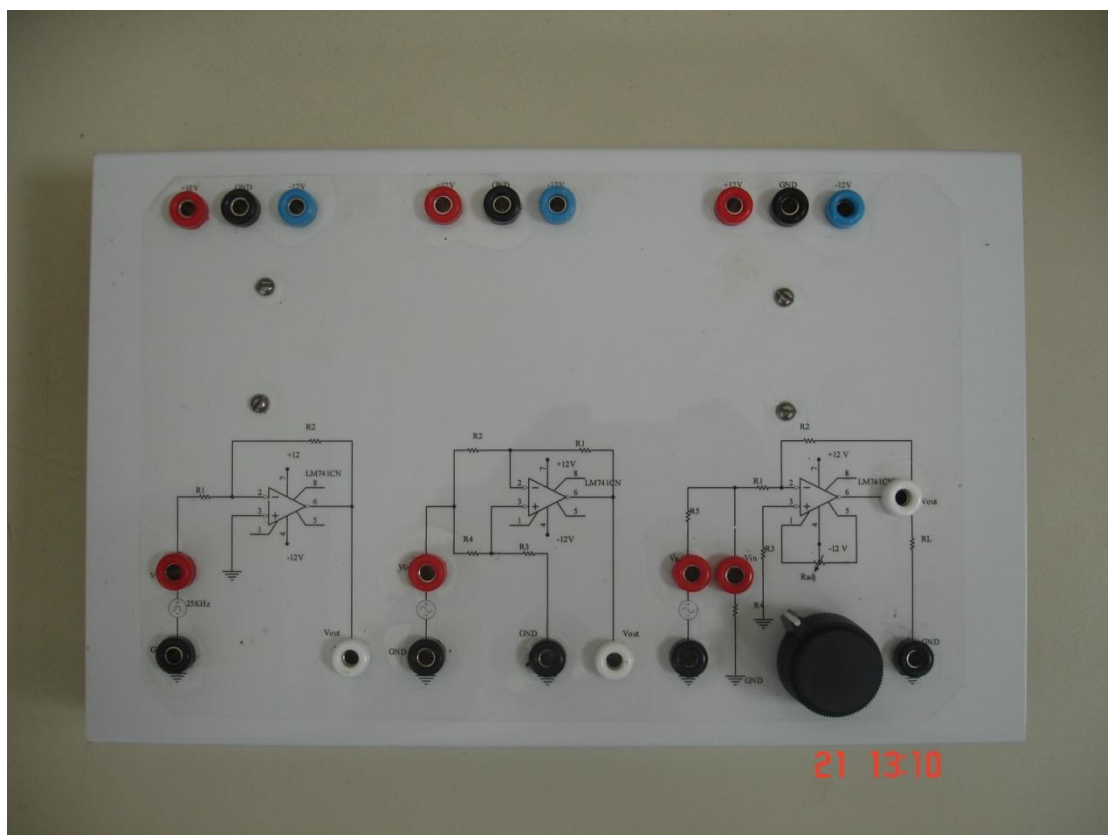
Μέτρηση ρυθμού αιώρησης (Slew rate)

Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα τελεστικών ενισχυτών έχουν πεπερασμένους μεταβατικούς χρόνους. Εάν ο ρυθμός μεταβολής τάσης εισόδου (συχνότητα) είναι πολύ μεγάλος ο τελεστικός ενισχυτής δεν μπορεί να παρακολουθήσει τις μεταβολές του σήματος εξόδου. Ο περιορισμός αυτός ισχύει σε κάθε μη ιδανικό τελεστικό ενισχυτή και ονομάζεται ρυθμός αιώρησης (slew rate). Για ένα ημιτονοειδές σήμα μεγάλης συχνότητας ο τελεστικός ενισχυτής θα δώσει στην έξοδο τριγωνικό σήμα και όχι ημιτονοειδές. Ο ρυθμός αιώρησης μετριέται σε V/μsec. Για να μετρήσουμε το ρυθμό αιώρησης θα πρέπει να δώσουμε τετραγωνικό παλμό στην είσοδο του τελεστικού ενισχυτή και να παρακολουθήσουμε την παραμόρφωση του παλμού στην έξοδο. Η κλίση της ευθείας την στιγμή που εφαρμόζεται ο παλμός έως τη στιγμή που θα φτάσει στη μέγιστη τάση μας δείχνει το ρυθμό αιώρησης S_r :

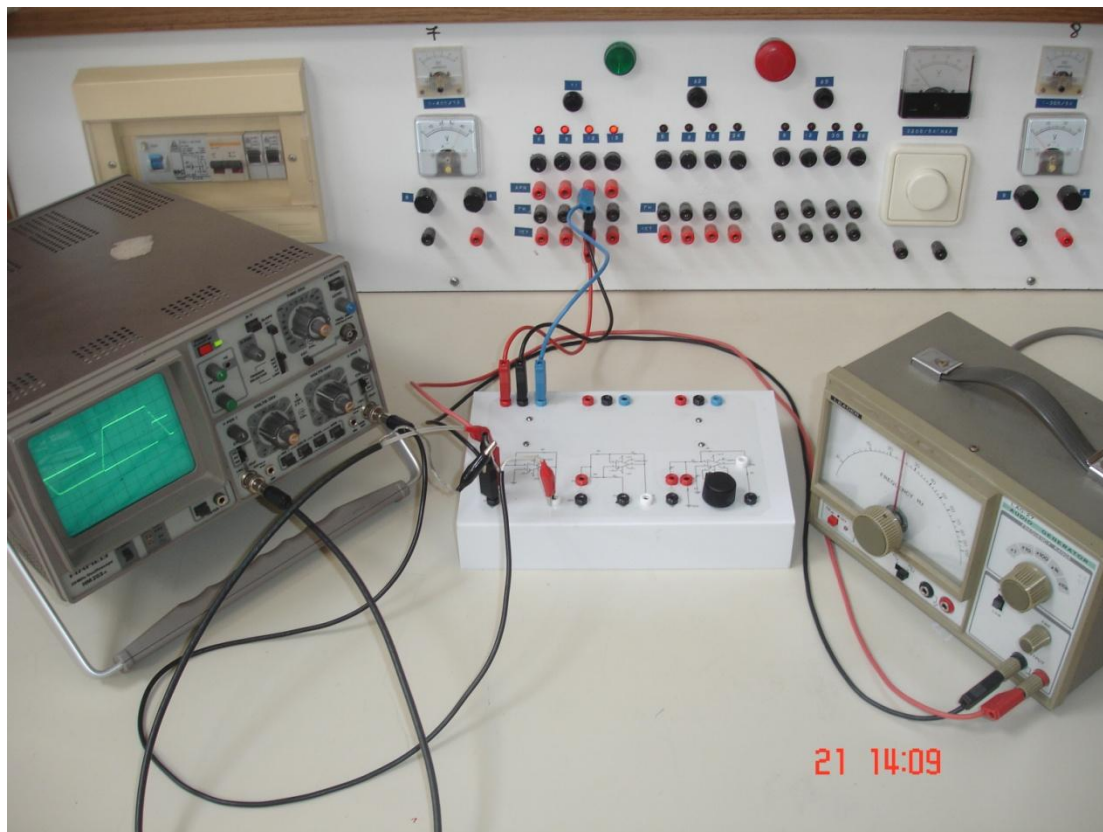
$$S_r = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$



Εσωτερική κατασκευή κυκλώματος τελεστικού ενισχυτή LM 741



Κατασκευή τελεστικού ενισχυτή LM 741(αριστερό κύκλωμα)



Συνδεσμολογία κυκλώματος μέτρησης ρυθμού αιώρησης

Απαιτούμενα υλικά

1. Εκπαιδευτική κατασκευή τελεστικού ενισχυτή 741.
2. Γεννήτρια συχνοτήτων.
3. Παλμογράφος.
4. 7 καλώδια κατάλληλων χρωμάτων.
5. 2 καλώδια παλμογράφου.

Υλοποίηση της εργαστηριακής άσκησης

1. Συνδέουμε συμμετρική τάση $\pm 12V$ στο πρώτο (αριστερό) κύκλωμα χρησιμοποιώντας την τυποποιημένη τροφοδοσία των πάγκων. Επισημαίνεται ότι απαιτείτε να συνδέσουμε πρώτα τη γείωση.
2. Συνδέουμε τη γεννήτρια συχνοτήτων μεταξύ V_{in} και GND και βάζουμε **τετραγωνικό** παλμό συχνότητας 25 kHz. Η τάση που θα δώσουμε δεν παίζει ρόλο, προτείνεται από 0.5V έως 3V p-p.
3. Συνδέουμε το πρώτο κανάλι του παλμογράφου στην είσοδο της γεννήτριας και το δεύτερο στην έξοδο.

4. Βρίσκουμε από το γράφημα στην οθόνη του παλμογράφου το χρόνο που χρειάζεται η κυματομορφή εξόδου να έρθει από την ελάχιστη στη μέγιστη τιμή της, $\Delta t = \dots\dots$
5. Υπολογίζουμε τον ρυθμό αιώρησης από τη σχέση:

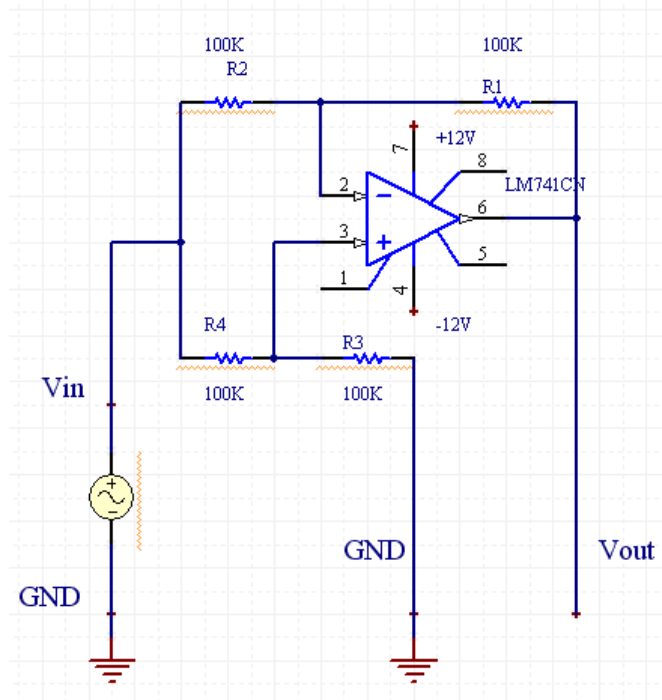
$$S_r = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \dots\dots\dots \frac{V}{\mu s}$$

Μέτρηση του λόγου απόρριψης κοινού σήματος (CMRR)

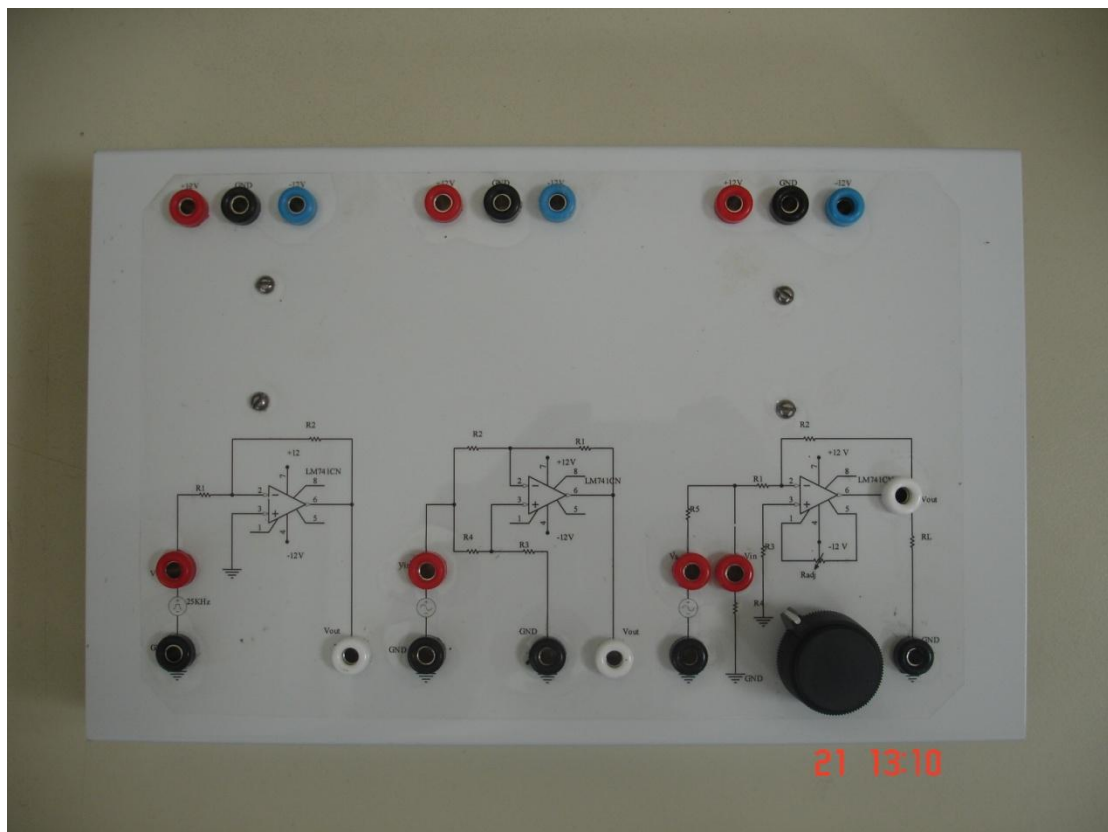
Η βασική λειτουργία και ιδιότητα του τελεστικού ενισχυτή είναι να ενισχύει τη διαφορά των σημάτων των δύο εισόδων του. Η ικανότητα να αλλάζει το πρόσημο της αναστρέφουσας εισόδου και να προστίθεται στο σήμα της μη αναστρέφουσας, είναι αυτό που έκανε τον τελεστικό ενισχυτή εργαλείο με μεγάλο εύρος εφαρμογών. Όταν όμως εφαρμόσουμε το ίδιο σήμα στην αναστρέφουσα και στη μη αναστρέφουσα είσοδο, ο τελεστικός ενισχυτής θα πρέπει να αφαιρεί το ένα σήμα από το άλλο και να δίνει μηδενική έξοδο. Στον ιδανικό ενισχυτή αυτό συμβαίνει, στην πράξη όμως εμφανίζεται στην έξοδο μια πολύ μικρή τάση. Το διαφορικό κέρδος A_D του τελεστικού ενισχυτή είναι πολύ μεγαλύτερο από το κέρδος τάσης κοινού τρόπου A_C . Ο λόγος των δύο αυτών τιμών δίνει το λόγο απόρριψης κοινού σήματος και υπολογίζεται αποκλειστικά θεωρητικά από την παρακάτω σχέση:

$$CMRR(dB) = 20 \log \left(\frac{A_D}{A_C} \right)$$

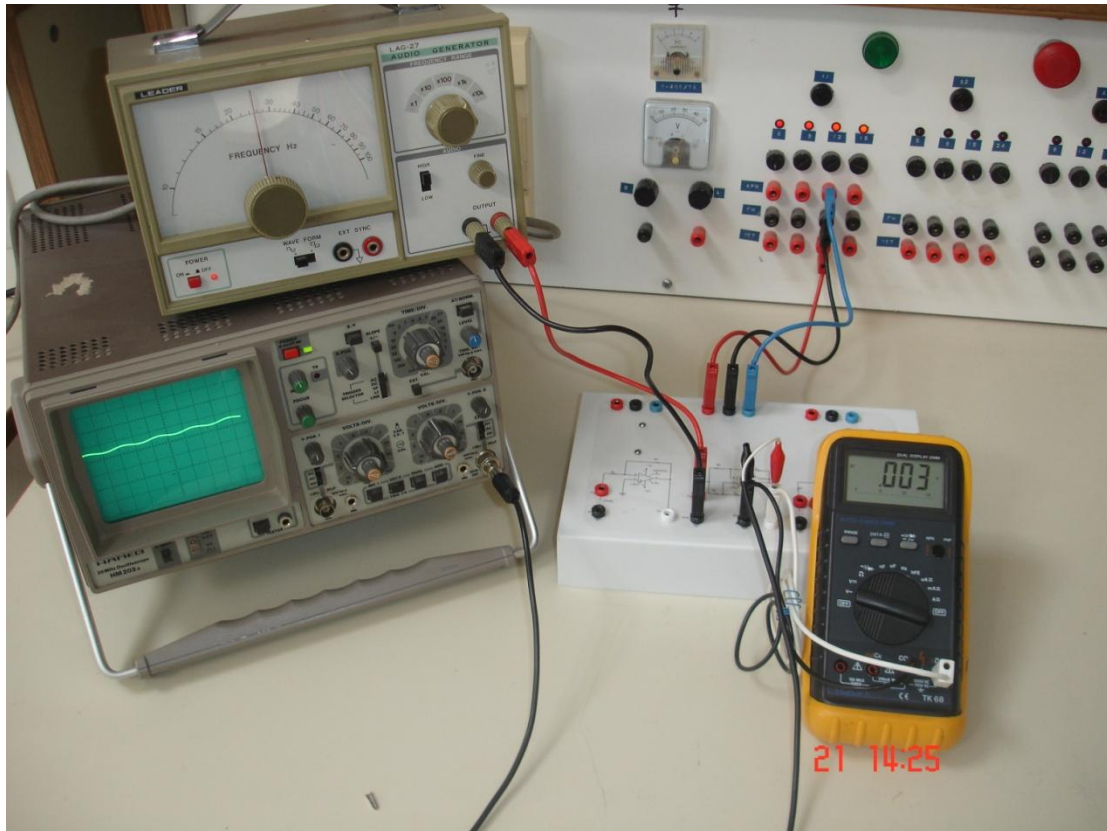
Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η τιμή, τόσο καλύτερος είναι ο τελεστικός ενισχυτής.



Εσωτερική κατασκευή κυκλώματος μέτρησης του λόγου CMRR



Κατασκευή μέτρησης ρυθμού αιώρησης του TE LM 741(μεσαίο κύκλωμα)



Συνδεσμολογία κυκλώματος μέτρησης CMRR

Απαιτούμενα υλικά

1. Εκπαιδευτική κατασκευή τελεστικού ενισχυτή LM 741.
2. Γεννήτρια συχνοτήτων.
3. Παλμογράφος.
4. 7 καλώδια κατάλληλων χρωμάτων.
5. 2 καλώδια παλμογράφου.

Υλοποίηση της εργαστηριακής άσκησης

1. Συνδέουμε συμμετρική τάση $\pm 12V$ στο δεύτερο (μεσαίο) κύκλωμα χρησιμοποιώντας την τυποποιημένη τροφοδοσία των πάγκων. Επισημαίνετε ότι απαιτείτε να συνδέσουμε πρώτα τη γείωση.
2. Συνδέουμε τη γεννήτρια συχνοτήτων μεταξύ V_{in} και GND και βάζουμε μία εναλλασσόμενη ημιτονοειδής τάση συχνότητας μερικών δεκάδων kHz και πλάτους μερικών Volts. Ο λόγος απόρριψης κοινού σήματος δεν εξαρτάται από τη συχνότητα και το πλάτος. Για να μην έχουμε

όμως σφάλματα θορύβου προτείνεται μια τιμή συχνότητας μεταξύ 10-20 KHZ και τάσης 3-5V p-p.

3. Συνδέουμε τον παλμογράφο στην έξοδο του κυκλώματος και παρατηρούμε μηδενική τάση. Αυτό συμβαίνει γιατί ο διαφορικός ενισχυτής ενισχύει τη διαφορά των τάσεων των δύο εισόδων του. Όταν οι εισοδοί είναι ίσες αφαιρείται η μία από την άλλη με αποτέλεσμα να μηδενίσει το σήμα εξόδου. Τάση στην έξοδο μεγαλύτερη των λογικών πλαισίων (ονομαστικά άνω των 0,4 V αν και εξαρτάται από την τάση εισόδου) οφείλετε στην ανοχή των αντιστάσεων εσωτερικού κυκλώματος που οδηγούν σε ελαφρά διαφοροποίηση των δύο εισόδων.
4. Υπολογίστε θεωρητικά το διαφορικό κέρδος A_D του ενισχυτή από τη σχέση:

$$A_D = \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} = \text{----}$$

5. Υπολογίστε το κέρδος τάσης κοινού τρόπου A_C από τη σχέση:

$$A_C = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \text{----}$$

6. Στη συνέχεια υπολογίστε θεωρητικά τον λόγο απόρριψης κοινού σήματος από τη σχέση:

$$CMRR(dB) = 20 \log \left(\frac{A_D}{A_C} \right) = \text{----}$$

Μέτρηση εύρους ζώνης διέλευσης συχνοτήτων (BW)

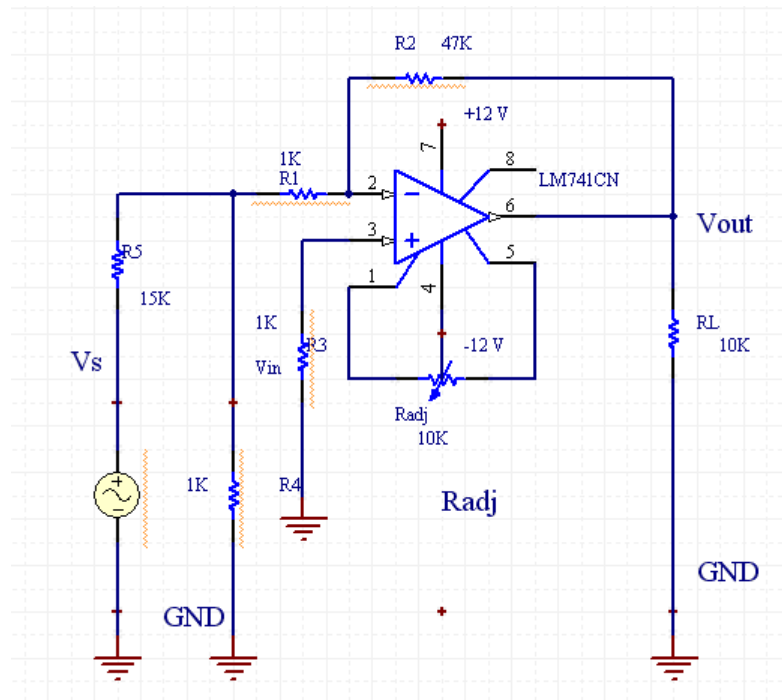
Σε αυτό το κύκλωμα θα δούμε το αποτέλεσμα του σφάλματος του πεπερασμένου ρυθμού αιώρησης για διάφορες συχνότητες. Όπως θα παρατηρήσουμε, οι τελεστικοί ενισχυτές έχουν κάποια όρια συχνοτήτων στα οποία μπορούν να λειτουργήσουν σωστά. Με σταθερή τάση εισόδου μετράμε την τάση εξόδου, και κατά συνέπεια την ενίσχυση του σήματος για διάφορες τιμές συχνότητας. Η ενίσχυση σήματος δίνεται από τη σχέση:

$$A_V = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

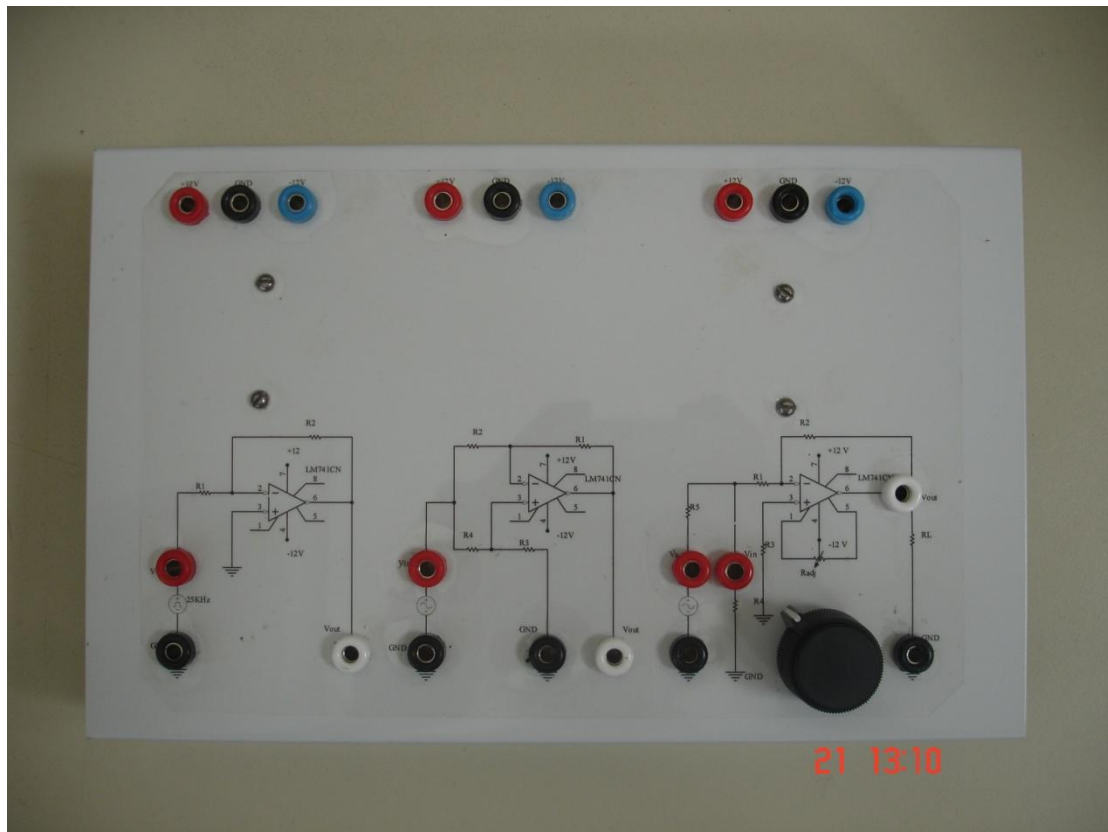
ενώ η ενίσχυση σε dB δίνεται από τη σχέση:

$$A_V (dB) = 20 \log A_V = 20 \log \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

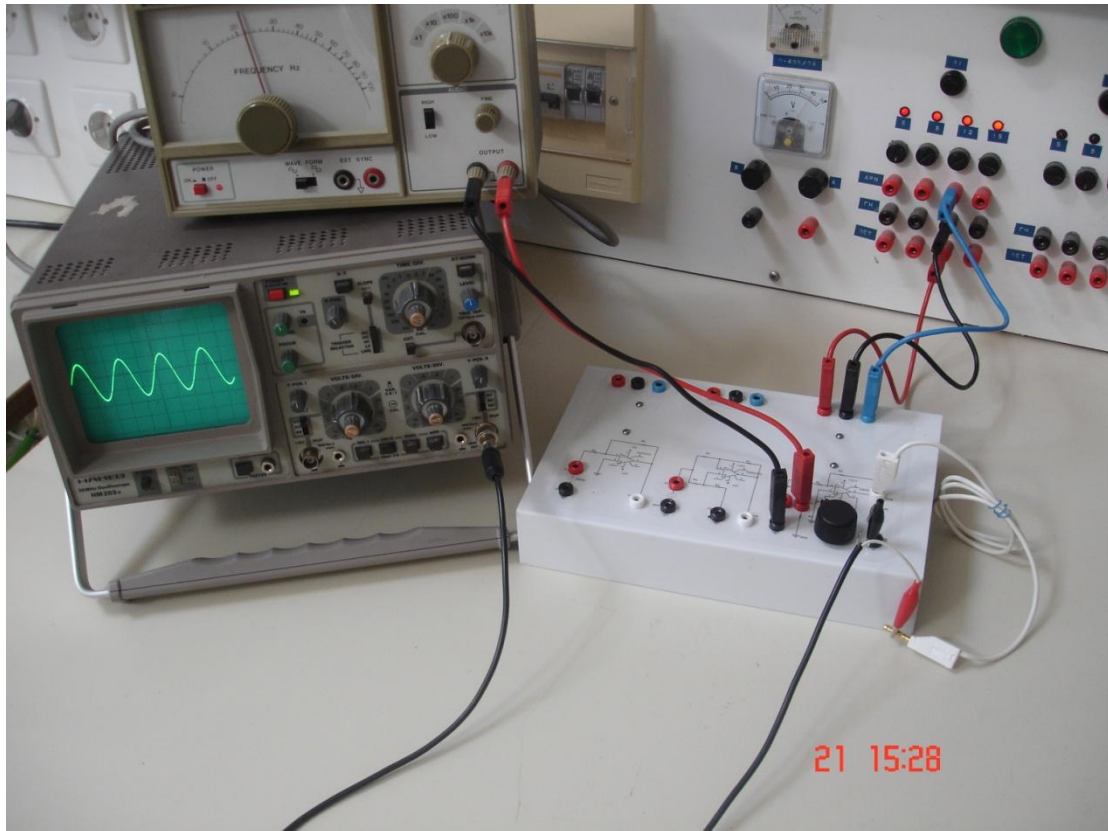
Για την ευκολία των μετρήσεων σε ότι ακολουθεί όλες οι τιμές τάσης που υπολογίζονται να είναι από *κορυφή σε κορυφή* (*peak to peak*).



Κύκλωμα μέτρηση εύρους BW



Κατασκευή μέτρησης εύρους BW του TE LM 741(δεξιό κύκλωμα)



Συνδεσμολογία μέτρησης εύρους ζώνης διέλευσης συχνοτήτων

Απαιτούμενα υλικά

1. Εκπαιδευτική κατασκευή τελεστικού ενισχυτή LM 741.
2. Γεννήτρια συχνοτήτων.
3. Παλμογράφος.
4. 7 καλώδια κατάλληλων χρωμάτων.
5. 2 καλώδια παλμογράφου.

Υλοποίηση της εργαστηριακής άσκησης

1. Συνδέουμε συμμετρική τάση $\pm 12V$ στο τρίτο (δεξί) κύκλωμα χρησιμοποιώντας την τυποποιημένη τροφοδοσία των πάγκων. Επισημαίνετε ότι απαιτείτε να συνδέσουμε πρώτα τη γείωση.
2. Συνδέουμε την γεννήτρια συχνοτήτων στο V_s και τη γη.
3. Συνδέουμε τον παλμογράφο στο V_{in} και στη γη.
4. Δίνουμε τάση από τη γεννήτρια έτσι ώστε στην είσοδο V_{in} που είναι συνδεδεμένος ο παλμογράφος να πάρουμε τάση 80 mV p-p. (Επειδή μερικές γεννήτριες συχνοτήτων δεν μπορούν να δώσουν τόσο μικρή

τάση, οι αντιστάσεις R5 και R4 λειτουργούν ως διαιρέτης τάσης, με αποτέλεσμα να ρίχνουν την τάση εισόδου στο 1/16 της τάσης V_s και να έχουμε την είσοδο που επιθυμούμε στα 80mV p-p).

5. Μηδενίζουμε την απόκλιση τάσης εξόδου. Για να το πετύχουμε αυτό πρέπει να μηδενίσουμε την DC συνιστώσα του σήματος εξόδου. Συνδέουμε τον παλμογράφο στην έξοδο και στο κανάλι του παλμογράφου εναλλάσσουμε τον διακόπτη του καναλιού από τη θέση AC στη θέση DC. Παρατηρούμε μια μετατόπιση του σήματος ως προς τον άξονα γ. Στη συνέχεια, στρέφουμε τη μεσαία λήψη του ποτενσιόμετρου ώστε να εξαλείψουμε αυτή τη μετατόπιση.
6. Δίνουμε από τη γεννήτρια τις διάφορες τιμές συχνοτήτων και συμπληρώνουμε τον παρακάτω Πίνακα 3.
7. Από τις τιμές του Πίνακα 3 να κάνετε τις γραφικές παραστάσεις A_v -f και A_v (dB)-f χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα **Origin** (οι άξονες να είναι σε λογαριθμική κλίμακα).
8. Από τις γραφικές παραστάσεις να βρείτε το εύρος BW

Πίνακας 3.

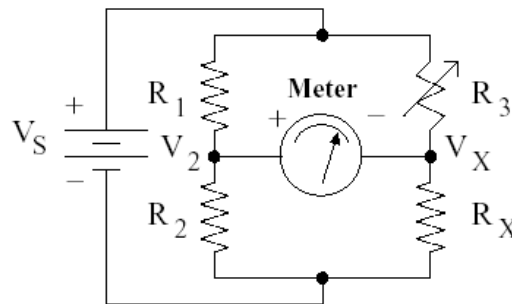
F_{in}	1Hz	10Hz	50Hz	100Hz	500Hz	1kHz	5kHz	10kHz
V_{in} (mV)	80	80	80	80	80	80	80	80
V_{out} (V)								
$A_v=(V_{out}/V_{in})$								
A_v (dB)								

F_{in}	20 kHz	30 kHz	50 kHz	70 kHz	100 kHz	200 kHz	300 kHz	400 kHz
V_{in} (mV)	80	80	80	80	80	80	80	80
V_{out} (V)								
$A_v=(V_{out}/V_{in})$								
A_v (dB)								

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ

Μετρήσεις με γέφυρα και ισοδύναμα κυκλώματα

Η πιο γνωστή γέφυρα είναι η γέφυρα Wheatstone. Αυτή μετράει αντιστάσεις με ακρίβεια 0,1% στην περιοχή 1Ω –1ΜΩ. Οι αντιστάσεις R_1 , R_2 είναι γνωστές και σταθερές, η αντίσταση R_3 είναι μεταβαλλόμενη και η R_x είναι μια άγνωστη αντίσταση. Η τάση V_s είναι συνεχής (dc λειτουργία γέφυρας).



Μεταβάλλοντας κατάλληλα την R_3 , η γέφυρα έρχεται σε ισορροπία (ένδειξη γαλβανόμετρου "0"). Τότε είναι :

$$I_1 = I_2 \quad , \quad I_3 = I_x \quad \text{και} \quad V_2 = V_x$$

και προκύπτει η παρακάτω συνθήκη ισορροπίας :

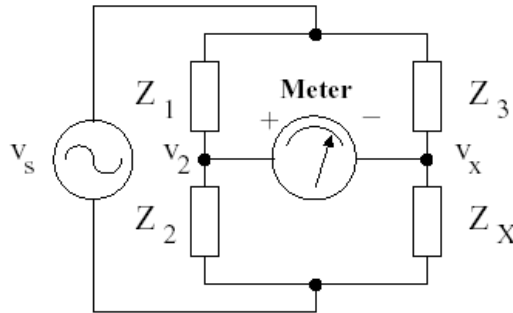
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_x}$$

από την οποία υπολογίζεται η άγνωστη αντίσταση R_x .

Η γενική μορφή των γεφυρών AC είναι ίδια με τη γέφυρα Wheatstone με τις παρακάτω διαφορές :

- οι αντιστάσεις έχουν αντικατασταθεί με σύνθετες αντιστάσεις
- η συνεχής πηγή τάσης έχει αντικατασταθεί με εναλλασσόμενη πηγή

- το γαλβανόμετρο έχει αντικατασταθεί με αντίστοιχο όργανο ac μέτρησης
Οι γέφυρες ac χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση όχι μόνο αντίστασης αλλά και χωρητικότητας, αυτεπαγωγής και συχνότητας ημιτονικών σημάτων.



Όταν η γέφυρα ισορροπεί ισχύει η παρακάτω συνθήκη :

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_x}$$

Θεωρώντας ότι οι σύνθετες αντιστάσεις έχουν τη μορφή $Z_i = R_i + jX_i$, τότε από τη συνθήκη ισορροπίας της γέφυρας (ισότητα των πραγματικών και φανταστικών μερών της) εξάγονται οι παρακάτω δύο σχέσεις :

$$R_1 R_x - X_1 X_x = R_2 R_3 - X_2 X_3$$

και

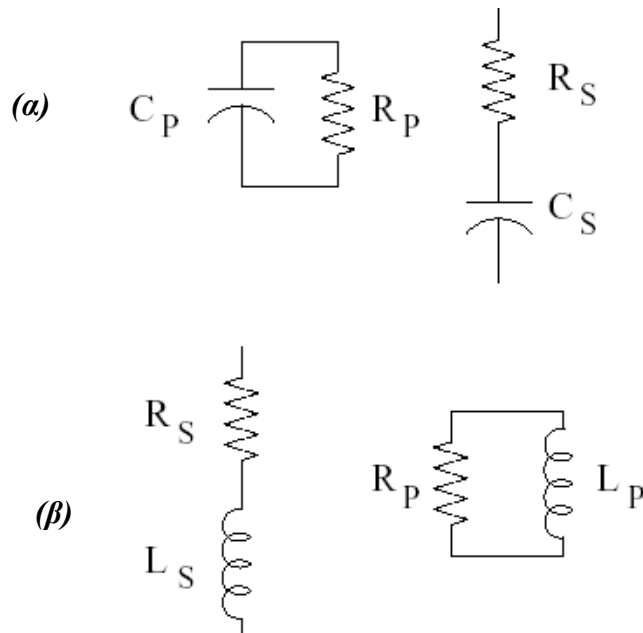
$$R_1 X_x + R_x X_1 = R_2 X_3 + R_3 X_2$$

Οι παραπάνω σχέσεις εφαρμόζονται σε κάθε τύπο ac γέφυρας για την εξαγωγή των σχέσεων ισορροπίας της.

Οι πραγματικοί πυκνωτές δεν χαρακτηρίζονται μόνο από χωρητικότητα, αλλά και από κάποια αντίσταση που συνδέεται με απώλειες ενέργειας. Ένας πυκνωτής μπορεί να αναπαρασταθεί με ένα ισοδύναμο κύκλωμα μιας χωρητικότητας C_p συνδεδεμένης παράλληλα με μια αντίσταση R_p .

Επίσης, τα πραγματικά πηνία δεν χαρακτηρίζονται μόνο από αυτεπαγωγή, αλλά και από κάποια αντίσταση που συνδέεται με απώλειες ενέργειας. Ένα πηνίο μπορεί να αναπαρασταθεί με ένα ισοδύναμο κύκλωμα μιας αυτεπαγωγής L_s συνδεδεμένης σε σειρά με μια αντίσταση R_s .

Για την αναπαράσταση πραγματικών πυκνωτών και πηνίων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι αντίστροφοι τύποι ισοδύναμων κυκλωμάτων, όπως φαίνεται παρακάτω.



Οι τιμές των R και C για τους δύο τύπους ισοδύναμων κυκλωμάτων (α), συνδέονται με τις παρακάτω σχέσεις :

$$R_S = R_P \frac{D^2}{1 + D^2}$$

και

$$C_S = C_P(1 + D^2)$$

όπου D ο συντελεστής απωλειών (dissipation factor) :

$$D = \frac{X_P}{R_P} = \frac{1}{\omega R_P C_P} = \frac{R_S}{X_S} = \omega C_S R_S$$

Ο συντελεστής απωλειών, D, είναι ανάλογος των απωλειών ενέργειας μέσα στον πυκνωτή για κάθε περίοδο του ac σήματος. Ένας καλός (σχεδόν ιδανικός) πυκνωτής έχει πολύ μικρή τιμή D, $D \ll 1$.

Οι τιμές των R και L για τους δύο τύπους ισοδύναμων κυκλωμάτων (β), συνδέονται με τις παρακάτω σχέσεις :

$$R_P = R_S(1 + Q^2)$$

και

$$L_P = L_S(1 + \frac{1}{Q^2})$$

όπου Q ο συντελεστής αποθήκευσης ή ποιότητας (quality factor) :

$$Q = \frac{X_S}{R_S} = \frac{\omega L_S}{R_S} = \frac{R_P}{X_P} = \frac{R_P}{\omega L_P}$$

Ο συντελεστής ποιότητας, Q, είναι ανάλογος της αποθηκευμένης ενέργειας μέσα στο πηνίο για κάθε περίοδο του ac σήματος. Ένα καλό (σχεδόν ιδανικό) πηνίο έχει πολύ μεγάλη τιμή Q, $Q \gg 1$.

Από τα παραπάνω προκύπτει επίσης ότι :

$$Q = \frac{1}{D}$$

Για τους πυκνωτές και τα πηνία, η ιδανική τους συμπεριφορά και για τους δύο τύπους ισοδύναμων κυκλωμάτων, απαιτεί πολύ μικρή τιμή R_S και πολύ μεγάλη τιμή R_P .

Εύρεση ισοδύναμων κυκλωμάτων

Δύο κυκλώματα λέγονται ισοδύναμα όταν έχουν την ίδια συνάρτηση μεταφοράς (transfer function). Με άλλα λόγια δύο κυκλώματα λέγονται ισοδύναμα όταν για την ίδια διέγερση (τάση V ή ρεύμα I) έχουν την ίδια απόκριση (ρεύμα I ή τάση V). Αυτό σημαίνει, σύμφωνα με το νόμο του Ohm, ότι δύο ισοδύναμα κυκλώματα έχουν την ίδια σύνθετη αντίσταση Z και την ίδια σύνθετη αγωγιμότητα Y, αφού $Z=1/Y$. Τα μεγέθη Z και Y είναι δύο συναρτήσεις μεταφοράς ηλεκτρικών κυκλωμάτων.

Ο απλούστερος φορμαλισμός που περιγράφει ένα κύκλωμα σειράς είναι ο φορμαλισμός της σύνθετης αντίστασης Z . Επίσης, ο απλούστερος φορμαλισμός που περιγράφει ένα παράλληλο κύκλωμα είναι ο φορμαλισμός της σύνθετης αγωγιμότητας Y .

Όταν δίνεται ένα κύκλωμα σειράς (π.χ. R_s και C_s) και ζητείται να υπολογιστεί το ισοδύναμο παράλληλο κύκλωμα (R_p και C_p), για συγκεκριμένη συχνότητα f (ή γωνιακή συχνότητα $\omega=2\pi f$), εργαζόμαστε ως εξής:

α. Ο απλούστερος φορμαλισμός του κυκλώματος σειράς είναι αυτός της σύνθετης αντίστασης Z , οπότε στην περίπτωση που αυτό αποτελείται από αντίσταση R_s και χωρητικότητα C_s , θα είναι :

$$Z = R_s - i \frac{1}{\omega C_s}$$

β. Υπολογίζουμε στη συνέχεια τη σύνθετη αγωγιμότητα $Y=1/Z$ και τη γράφουμε σε μορφή αθροίσματος πραγματικού και φανταστικού μέρους, δηλαδή :

$$Y = Y_1 + iY_2$$

γ. Ο απλούστερος φορμαλισμός του παράλληλου κυκλώματος είναι αυτός της σύνθετης αγωγιμότητας, οπότε στην περίπτωση που αυτό αποτελείται από αντίσταση R_p και χωρητικότητα C_p , θα είναι :

$$Y = \frac{1}{R_p} + i\omega C_p$$

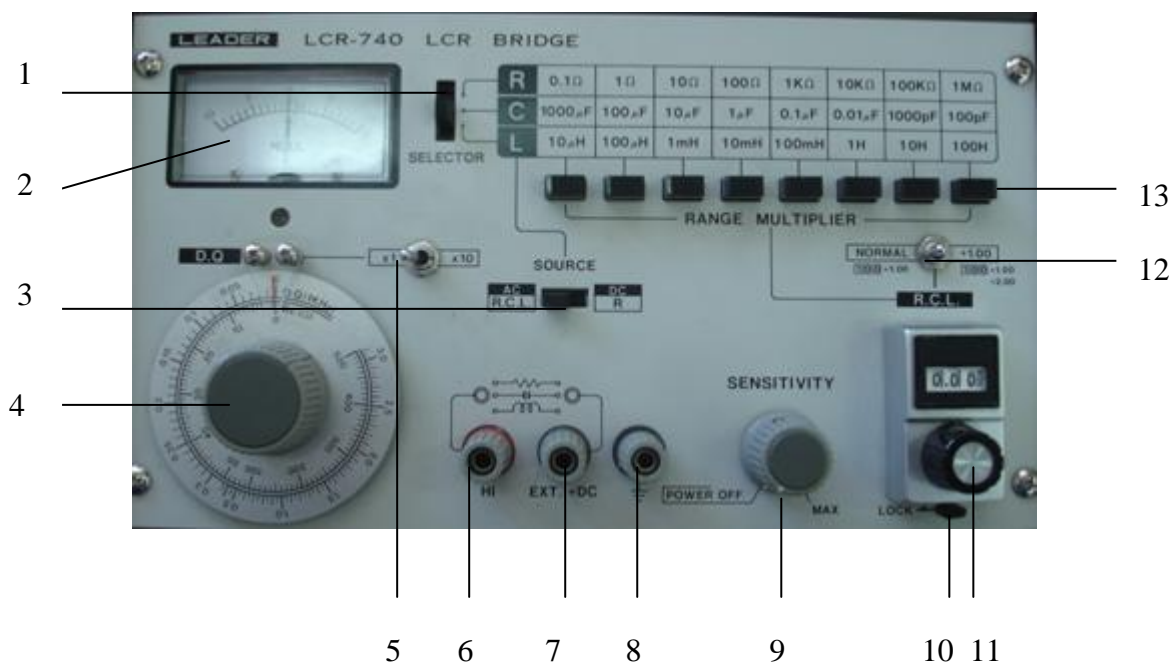
δ. Εξισώνοντας τώρα τα πραγματικά και φανταστικά μέρη των σύνθετων αγωγιμοτήτων, προκύπτουν σχέσεις της μορφής :

$$Y_1 = \frac{1}{R_p} \quad \text{και} \quad Y_2 = \omega C_p$$

ε. Λύνοντας τις προηγούμενες δύο ισότητες ως προς R_p και C_p , βρίσκουμε τις τιμές της αντίστασης και της χωρητικότητας του παράλληλου κυκλώματος που είναι ισοδύναμο με το κύκλωμα σειράς R_s και C_s .

Όπως φαίνεται, για συγκεκριμένες τιμές R_s και C_s οι αντίστοιχες τιμές R_p και C_p του ισοδύναμου παράλληλου κυκλώματος εξαρτώνται από τη συχνότητα f (ή ω), δηλαδή για διαφορετικές συχνότητες, τα R_p και C_p έχουν διαφορετικές τιμές.

Πειραματική διάταξη γέφυρας LCR – 740



1. Επιλογέας μέτρησης R, C, και L.
2. Ένδειξη μηδενισμού γέφυρας.
3. Επιλογέας μέτρησης συνεχούς τάσης (dc) τροφοδοσίας ή εναλλασσόμενης τάσης (ac) τροφοδοσίας με συχνότητα 1 kHz.

4. Στρεφόμενη κλίμακα για την απευθείας μέτρηση του συντελεστή απωλειών D πυκνωτών και του συντελεστή ποιότητας Q πηνίων. Επίσης μετράει και την ισοδύναμη αντίσταση σειράς πυκνωτών και πηνίων μέσω των σχέσεων :

$$R_s(\Omega) = \frac{R_E}{C(\mu F)} \quad , \quad R_s(\Omega) = \frac{L(\mu H)}{R_E}$$

όπου R_E είναι η ένδειξη της στρεφόμενης κλίμακας, σε μονάδες $\Omega \cdot \mu F$ (για πυκνωτές) και σε μονάδες $\Omega^{-1} \cdot \mu H$ (για πηνία), στο σημείο μηδενισμού της γέφυρας.

5. Επιλογέας του συντελεστή πολλαπλασιασμού (x1, x10) για τις τιμές D, Q και R_E .
- 6, 7. Ακροδέκτες για τη σύνδεση των στοιχείων μέτρησης R, C, και L.
8. Γείωση.
9. Διακόπτης λειτουργίας της γέφυρας και ρύθμισης της ευαισθησίας της.
10. Διακόπτης για το "κλείδωμα" της ένδειξης της γέφυρας.
11. Στρεφόμενη κλίμακα για την επίτευξη μηδενισμού της γέφυρας και ένδειξη της μέτρησης 3 ψηφίων (1 ακέραιο και 2 δεκαδικά). Ο αριθμός αυτός πολλαπλασιαζόμενος με τον συντελεστή του (13) μας δίνει την τιμή των R, C, και L.
12. Διακόπτης με δύο επιλογές : (α) NORMAL για τις συνηθισμένες μετρήσεις των R, C, L και (β) +1.00 όταν υπερβαίνουμε το πάνω όριο της κλίμακας της γέφυρας.
13. Συντελεστές πολλαπλασιασμού της ένδειξης (11). Επιλέγεται από τον χρήστη η περιοχή τιμών του μετρούμενου εξαρτήματος R, C, ή L.

Εργαστηριακές δραστηριότητες

Μέτρηση αντιστάσεων

1. Να αναγνωρίσετε τα τμήματα της γέφυρας LCR-740.
2. Σας δίνονται 3 αντιστάσεις με ονομαστικές τιμές που θα βρείτε χρησιμοποιώντας το χρωματικό κώδικα. Τις τιμές αυτές, μαζί με την τιμή της ανοχής και τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή να καταγράψετε στον παρακάτω πίνακα.
3. Συνδέστε τη μικρότερη αντίσταση μεταξύ των ακροδεκτών (6) και (7) της γέφυρας και μετρήστε τη τιμή της μέσω του ενδείκτη (11) της γέφυρας. Το ίδιο να επαναλάβετε για όλες τις αντιστάσεις. Συμπληρώστε τον παρακάτω πίνακα.
4. Μεταβάλετε το διακόπτη SOURCE (3) στη θέση AC/RCL και μετρήστε και πάλι τις τιμές των τριών αντιστάσεων. Συμπληρώστε τον παρακάτω πίνακα.

Αντίσταση	Ονομ. Τιμή	Ανοχή	Επιτρεπ. Τιμές	Μετρουμ. Τιμή (D.C.)	Μετρουμ. Τιμή (A.C.)
R_1					
R_2					
R_3					

5. Να γράψετε τα συμπεράσματα σας όπως προκύπτουν από τις μετρήσεις που κάνατε :

α) Για την αντίσταση R_1 :

.....
.....
.....
β) Για την αντίσταση R_2 :

.....
.....
.....
γ) Για την αντίσταση R_3 :

Μέτρηση χωρητικότητας πυκνωτών

A1. Να προετοιμάσετε τη συσκευή για μέτρηση άγνωστης χωρητικότητας C .

A2. Σας δίνονται 3 πυκνωτές με συγκεκριμένες τιμές. Τις τιμές αυτές, μαζί με την τιμή της ανοχής και τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή να καταγράψετε στον Πίνακα I.

A3. Συνδέστε τον πυκνωτή μικρότερης τιμής χωρητικότητας C μεταξύ των ακροδεκτών (6) και (7) της γέφυρας και μετρήστε τις τιμές : **α)** της χωρητικότητας C , **β)** του συντελεστή απωλειών D και **γ)** της ισοδύναμης αντίστασης σειράς R_s . Το ίδιο να επαναλάβετε και για τους υπόλοιπους πυκνωτές. Για τον υπολογισμό της R_s χρησιμοποιήστε την αντίστοιχη σχέση που δίνεται στην περιγραφή (4) της πειραματικής διάταξης της γέφυρας LCR – 740. Συμπληρώστε τον Πίνακα I.

Πίνακας I

Πυκνωτής	Ονομ. Τιμή	Ανοχή	Επιτρεπ. Τιμές	Μετρομ. Τιμή C	Ισοδύναμη αντίσταση R_s	Συντελ. Απωλ. D
C1						
C2						
C3						

A4. Να γράψετε τα συμπεράσματά σας όπως προκύπτουν από τις μετρήσεις που κάνατε για τους παραπάνω πυκνωτές:

α) Για τον πυκνωτή C1:

.....

β) Για τον πυκνωτή C2 :

.....

γ) Για τον πυκνωτή C3 :

.....

A5. Συνδέστε μια αντίσταση $R=100 \Omega$ σε σειρά με κάθε πυκνωτή C_1 , C_2 και C_3 και ακολουθώντας το βήμα (**A3**) συμπληρώστε τον παρακάτω Πίνακα II.

Πίνακας II

Πυκνωτής- Αντίσταση	Μετρούμενη τιμή χωρητικότητας C	Μετρούμενη ισοδύναμη αντίσταση R_s	Συντελεστής απωλειών D
C_1-R			
C_2-R			
C_3-R			

A6. Συγκρίνοντας τους Πίνακες I και II, τι παρατηρείτε;

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Μέτρηση χωρητικότητας καλωδίου

A7. Μετρήστε το μήκος l και τη χωρητικότητα C ενός καλωδίου (BNC probe) παλμογράφου:

$$C = \dots\dots\dots \mu\text{F}, \quad L = \dots\dots\dots \text{m}$$

Να ανάγετε τη χωρητικότητα του προηγούμενου καλωδίου σε χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους :

$$\text{Χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους} = \dots\dots\dots \mu\text{F/m}$$

A8. Μετρήστε τη χωρητικότητα ενός όμοιου, με το BNC probe παλμογράφου, καλωδίου αγνώστου μήκους :

$$C = \dots\dots\dots \mu\text{F}$$

Με βάση τη τιμή **Χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους** που βρήκατε στο βήμα (A7), να υπολογίσετε το μήκος του καλωδίου :

$$L_{\text{υπ.}} = \dots\dots\dots\text{m}$$

Να συγκρίνετε την προηγούμενη τιμή μήκους που υπολογίσατε με αυτή που προκύπτει από μέτρηση

$$L_{\text{μετρ.}} = \dots\dots\dots\text{m}$$

Αφού σχολιάσετε τις παρατηρήσεις σας, να αναφέρετε πιθανές εφαρμογές των βημάτων (A7) και (A8) :

.....

.....

.....

.....

.....

Ισοδύναμα κυκλώματα

B1. Θεωρείστε ένα συνδυασμό χωρητικότητας και αντίστασης σε σειρά, με τιμές $C=1\mu\text{F}$ και $R=100\Omega$. Αν είναι γνωστό ότι η συχνότητα της εφαρμοζόμενης **ac** τάσης της γέφυρας είναι $f=1\text{ kHz}$, να υπολογίσετε το ισοδύναμο κύκλωμα του παράλληλου συνδυασμού χωρητικότητας - αντίστασης :

$$R_p = \dots\dots\dots, \quad C_p = \dots\dots\dots$$

B2. Αν μετρήσετε με τη γέφυρα τον παράλληλο συνδυασμό με τιμές R_p και C_p που υπολογίσατε στο προηγούμενο βήμα (B1), τι τιμές χωρητικότητας C_s και αντίστασης R_s σε σειρά θεωρείτε ότι θα βρείτε;

$$C_s = \dots\dots\dots, \quad R_s = \dots\dots\dots$$

B3. Πραγματοποιήστε το κύκλωμα του παράλληλου συνδυασμού R_p και C_p με τις τιμές που βρήκατε στο βήμα (B1). Μετρήστε με τη γέφυρα τις αντίστοιχες (ισοδύναμες) τιμές αντίστασης και χωρητικότητας σε σειρά :

$$C_s = \dots\dots\dots, \quad R_s = \dots\dots\dots$$

Να συγκρίνετε τις προηγούμενες μετρούμενες τιμές C_s και R_s με αυτές που εκτιμήσατε στο βήμα (B2). Σχολιάστε τις παρατηρήσεις σας :

.....
.....
.....
.....
.....

Μέτρηση άγνωστης αυτεπαγωγής L

Γ1. Να προετοιμάσετε τη συσκευή για μέτρηση άγνωστης αυτεπαγωγής L.

Γ2. Σας δίνονται 2 πηνία με συγκεκριμένες τιμές. Τις τιμές αυτές, μαζί με την τιμή της ανοχής, τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή να καταγράψετε στον Πίνακα III.

Γ3. Συνδέστε το πηνίο μικρότερης τιμής αυτεπαγωγής L μεταξύ των ακροδεκτών (6) και (7) της γέφυρας και μετρήστε τις τιμές : **α)** της αυτεπαγωγής L, **β)** του συντελεστή ποιότητας Q και **γ)** της ισοδύναμης αντίστασης σειράς R_s . Το ίδιο να επαναλάβετε για όλα τα πηνία. Για τον υπολογισμό της R_s χρησιμοποιήστε την αντίστοιχη σχέση που δίνεται στην περιγραφή (4) της πειραματικής διάταξης της γέφυρας LCR – 740. Συμπληρώστε τον Πίνακα III.

Πίνακας III

Πηνίο	Ονομ. Τιμή	Ανοχή	Επιτρεπ. Τιμές	Μετρούμ. Τιμή L	Ισοδύναμη Αντίσταση R_s	Συντελ. Ποιοτ. Q
L1						
L2						

Γ4. Να γράψετε τα συμπεράσματα σας όπως προκύπτουν από τις μετρήσεις που κάνατε για τα παραπάνω πηνία.

α) Για το πηνίο L1:

.....
.....
.....

β) Για το πηνίο L2 :

.....
.....
.....

Γ5. Διατυπώστε γενικότερα τα συμπεράσματά σας και τις παρατηρήσεις σας για τις μετρήσεις με γέφυρα:

.....
.....
.....
.....
.....
.....

ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Μέτρηση σύνθετης αντίστασης και σύνθετης αγωγιμότητας

Η φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης (Impedance Spectroscopy) ή σύνθετης αγωγιμότητας (Admittance Spectroscopy) ή ισοδύναμα διηλεκτρική φασματοσκοπία (Dielectric Relaxation Spectroscopy), είναι μια σχετικά νέα και ιδιαίτερα χρήσιμη μέθοδος μελέτης των ηλεκτρικών και διηλεκτρικών ιδιοτήτων υλικών και διατάξεων. Οι πειραματικές διατάξεις που έχουν κατασκευαστεί την τελευταία δεκαετία, επιτρέπουν την μελέτη υλικών σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων, 10^{-5} - 10^{11} Hz. Ανάλογα με την περιοχή συχνοτήτων που χρησιμοποιείται, απαιτούνται διαφορετικές μετρητικές διατάξεις, από τις οποίες η ανάλυση των αποτελεσμάτων βασίζεται σε διαφορετικά θεωρητικά υπόβαθρα.

Στις υψηλές συχνότητες (μεγαλύτερες από ~10 MHz), το μήκος κύματος του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου γίνεται συγκρίσιμο με τις διαστάσεις της μετρητικής διάταξης, με αποτέλεσμα να μην είναι το ίδιο κατά μήκος του κυκλώματος και έτσι ένα μέρος του να υφίσταται διέλευση και ένα ανάκλαση, όταν κατά την διάδοσή του μέσα στο κύκλωμα συναντήσει την επιφάνεια του υπό μελέτη υλικού, που αποτελεί μέρος του κυκλώματος. Η ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων, στην περίπτωση αυτή, γίνεται με την βοήθεια της θεωρίας της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε γραμμές μεταφοράς.

Όταν οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται χαμηλές (μικρότερες από ~10 MHz), τότε το μήκος κύματος του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου είναι πολύ μεγαλύτερο από τις διαστάσεις της μετρητικής διάταξης, με αποτέλεσμα το ηλεκτρικό πεδίο να μην "αισθάνεται" τις ασυνέχειες κατά τη διεύθυνση της διάδοσής του. Στη περίπτωση αυτή τα στοιχεία του κυκλώματος είναι εντοπισμένα και επομένως μπορούν να παρασταθούν ως αντιστάσεις, χωρητικότητες ή και ως συνδυασμούς αυτών. Όταν και το πλάτος του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου είναι μικρό, το κύκλωμα θεωρείται γραμμικό και η ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων γίνεται με την βοήθεια της θεωρίας των γραμμικών ηλεκτρικών κυκλωμάτων.

Βασικές αρχές μέτρησης της σύνθετης αγωγιμότητας και της σύνθετης αντίστασης

Η παρουσίαση των βασικών αρχών μέτρησης της σύνθετης αντίστασης και της σύνθετης αγωγιμότητας που ακολουθεί, γίνεται για την φασματοσκοπία εναλλασσόμενου ηλεκτρικού πεδίου χαμηλών συχνοτήτων (< 10 MHz).

Το υλικό, πάχους d , τοποθετείται μεταξύ δύο μεταλλικών πλακών (ηλεκτροδίων), επιφάνειας A ($A \gg d^2$) που αποτελούν μέρος του κυκλώματος της μετρητικής διάταξης. Το σύστημα ηλεκτροδίων-υλικού συνήθως ονομάζεται πειραματικό κελί. Στη συνέχεια εφαρμόζεται ένα μικρού πλάτους ηλεκτρικό σήμα και μετράται η απόκριση του συστήματος ηλεκτροδίων-υλικού. Στην περίπτωση που εφαρμόζεται μια εναλλασσόμενη τάση $V^*(\omega, t) = V_0 \exp(i\omega t)$ (διέγερση) μετριέται το ρεύμα $I^*(\omega, t)$ (απόκριση) στο υπόλοιπο κύκλωμα. Τότε η σύνθετη αγωγιμότητα $Y^*(\omega)$ (admittance) του συστήματος ηλεκτροδίων-υλικού ορίζεται ως

$$Y^*(\omega) = \frac{I^*(\omega, t)}{V^*(\omega, t)} \quad (1)$$

ενώ η σύνθετη αντίσταση $Z^*(\omega)$ (impedance) ορίζεται ως

$$Z^*(\omega) = \frac{1}{Y^*(\omega)} = \frac{V^*(\omega, t)}{I^*(\omega, t)} \quad (2)$$

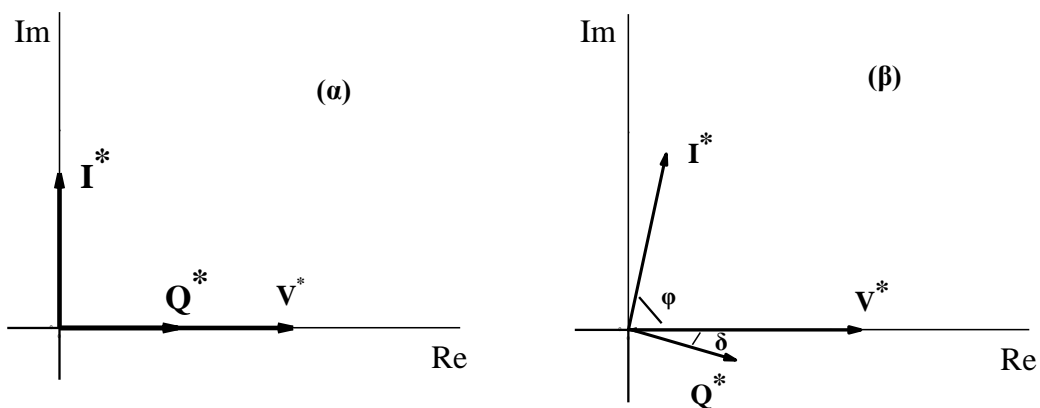
Το φορτίο $Q^*(\omega, t)$ που εμφανίζεται στα ηλεκτρόδια λόγω της διέγερσης $V^*(\omega, t)$ είναι:

$$Q^*(\omega, t) = C^*(\omega)V^*(\omega, t) \quad (3)$$

όπου $C^*(\omega)$ είναι η σύνθετη χωρητικότητα του συστήματος ηλεκτροδίων-υλικού. Επομένως το ρεύμα $I^*(\omega, t)$ είναι

$$I^*(\omega, t) = \frac{dQ^*(\omega, t)}{dt} = i\omega C^*(\omega)V^*(\omega, t) \quad (4)$$

Αν μεταξύ των ηλεκτροδίων δεν υπήρχε υλικό ή υπήρχε ένας τέλειος μονωτής, τότε η χωρητικότητα του συστήματος θα ήταν ένας πραγματικός αριθμός και το ρεύμα $I^*(\omega, t)$ θα προηγείτο από την τάση $V^*(\omega, t)$ και το φορτίο $Q^*(\omega, t)$ κατά $\pi/2$, όπως φαίνεται από τις σχέσεις (3) και (4) (σχήμα 1α). Η εισαγωγή ενός υλικού, μεταξύ των ηλεκτροδίων, με μη μηδενική αγωγιμότητα, θα έχει ως αποτέλεσμα το ρεύμα να προηγείται της τάσης κατά γωνία φ μικρότερη από $\pi/2$, επειδή τώρα το ρεύμα θα έχει μια μικρή συνιστώσα λόγω της αγωγιμότητας συνεχούς σε φάση με την εφαρμοζόμενη τάση. Το ρεύμα θα εξακολουθεί να προηγείται του φορτίου κατά $\pi/2$, ενώ το φορτίο θα υστερεί από την τάση κατά γωνία δ έτσι ώστε $\varphi + \delta = \pi/2$ (σχήμα 1β).



Σχήμα 1. Τα διανύσματα της τάσης, της έντασης και του φορτίου στο μιγαδικό επίπεδο για τη περίπτωση πυκνωτή που περιέχει α) τέλειο μονωτή και β) διηλεκτρικό με απώλειες.

Η γωνία δ ονομάζεται γωνία απωλειών (loss angle) και από την σχέση (4) ορίζεται η εφαπτομένη απωλειών (loss tangent), $\tan\delta$, ως

$$\tan\delta = -\frac{\text{Im } C^*}{\text{Re } C^*} \quad (5)$$

η οποία δίνει το λόγο της απώλειας ενέργειας προς την αποθηκευμένη ενέργεια για το σύστημα ηλεκτροδίων-υλικού, ανά περίοδο εφαρμογής του ηλεκτρικού πεδίου.

Από τις σχέσεις (1), (2) και (4) προκύπτει ότι

$$Y^*(\omega) = i\omega C^*(\omega) \quad (6)$$

και

$$Z^*(\omega) = \frac{1}{i\omega C^*(\omega)} \quad (7)$$

Για ομοιογενή και ισότροπα υλικά (γραμμικά διηλεκτρικά) η σύνθετη χωρητικότητα $C^*(\omega)$ δίνεται από την σχέση:

$$C^*(\omega) = C_o \varepsilon^*(\omega) = C_o (\varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega)) \quad (8)$$

όπου $\varepsilon^*(\omega)$ είναι η διηλεκτρική συνάρτηση του συστήματος ηλεκτροδίων-υλικού και C_o η χωρητικότητα του πυκνωτή των δύο ηλεκτροδίων χωρίς το υλικό (του άδειου πυκνωτή).

Το ηλεκτρικό μέτρο $M^*(\omega)$ και η σύνθετη ειδική αγωγιμότητα $\sigma^*(\omega)$, συνδέονται με την διηλεκτρική συνάρτηση $\varepsilon^*(\omega)$ μέσω των σχέσεων

$$M^*(\omega) = M' + iM'' = \frac{1}{\varepsilon^*(\omega)} \quad (9)$$

και

$$\sigma^*(\omega) = \sigma' + i\sigma'' = i\omega \varepsilon_o \varepsilon^*(\omega) \quad (10)$$

Επομένως στη φασματοσκοπία εναλλασσόμενου ηλεκτρικού πεδίου, η μέτρηση του $Y^*(\omega)$ και του $Z^*(\omega)$ συνεπάγεται και το προσδιορισμό των

μεγεθών $C^*(\omega)$, $\epsilon^*(\omega)$, $M^*(\omega)$, $\sigma^*(\omega)$ και $\tan\delta$, μέσω των οποίων γίνεται η μελέτη του συστήματος. Οι πληροφορίες που εξάγονται με την χρήση των παραπάνω μεγεθών, για το σύστημα ηλεκτροδίων-υλικού, κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες: α) εκείνες που αφορούν το ίδιο το υλικό (π.χ. διηλεκτρική σταθερά, αποκατάσταση διπόλων, κινητικότητα φορτίων, αγωγιμότητα και β) εκείνες που αφορούν την διεπιφάνεια ηλεκτροδίων-υλικού (π.χ. χωρητικότητα, αντίσταση).

Χρήση ισοδυνάμων κυκλωμάτων

Στη φασματοσκοπία εναλλασσόμενου ηλεκτρικού πεδίου, πολλές φορές, το σύστημα ηλεκτροδίων-υλικού μπορεί να προσομοιάσει με ένα απλό κύκλωμα αντιστάσεων και χωρητικοτήτων, το οποίο έχει την ίδια απόκριση με το υπό μελέτη σύστημα. Το κύκλωμα αυτό ονομάζεται ισοδύναμο κύκλωμα του συστήματος. Η παραπάνω διαδικασία προσομοίωσης δεν είναι απλή υπόθεση, επειδή υπάρχουν πολλά κυκλώματα αντιστάσεων και πυκνωτών τα οποία έχουν την ίδια απόκριση. Η επιλογή του συγκεκριμένου ηλεκτρικού κυκλώματος (ισοδύναμου κυκλώματος), το οποίο αντανάκλα τις πραγματικές διεργασίες που συμβαίνουν στο σύστημα υπό την επίδραση της διέγερσης (π.χ. εναλλασσόμενης τάσης), γίνεται:

α) τόσο με τη συγκριτική μελέτη των μεγεθών $\epsilon^*(\omega)$, $M^*(\omega)$, $Z^*(\omega)$, $Y^*(\omega)$ και $\tan\delta$, επειδή το καθένα λόγω διαφορετικής εξάρτησης και βάρους με τη συχνότητα, αναδεικνύει ή μειώνει διαφορετικές διεργασίες.

β) όσο και με τη βοήθεια άλλων μεθόδων μελέτης των υλικών (π.χ. AFM, ηλεκτρονική φασματοσκοπία, σκέδαση ακτινών X υπό μικρές γωνίες κ.ά.).

Σε ένα ισοδύναμο κύκλωμα ένας συνδυασμός αντιστάσεων και πυκνωτών μπορεί να αντιστοιχεί σε ένα μηχανισμό διηλεκτρικής αποκατάστασης ή σε ένα μηχανισμό αγωγιμότητας. Μια αντίσταση ή μια χωρητικότητα μπορεί να συσχετισθεί με την αντίσταση ή την χωρητικότητα των αγωγίμων δρόμων ενός υλικού αντίστοιχα.

Οι μετρητικές διατάξεις, στη φασματοσκοπία εναλλασσόμενου ηλεκτρικού πεδίου, προσομοιάζουν το σύστημα συνήθως με δύο τρόπους:

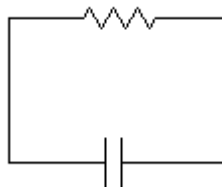
α) Με παράλληλο συνδυασμό μιας αντίστασης R και ενός πυκνωτή C, οπότε μετράται η σύνθετη αγωγιμότητα $Y^*(\omega)$ του συστήματος (δηλαδή το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της, για κάθε συχνότητα του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού σήματος).

β) Με συνδυασμό μιας αντίστασης R και ενός πυκνωτή C σε σειρά, οπότε μετριέται η σύνθετη αντίσταση $Z^*(\omega)$ του συστήματος.

Αν το ισοδύναμο κύκλωμα του συστήματος δεν ταυτίζεται με το κύκλωμα προσομοίωσης της μετρητικής διάταξης (γεγονός που σπάνια δεν συμβαίνει), τότε η αντίσταση και η χωρητικότητα των κυκλωμάτων προσομοίωσης (α) ή (β) είναι συναρτήσεις της συχνότητας του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού σήματος.

Μερικά απλά ισοδύναμα κυκλώματα

A) Παράλληλη σύνδεση αντίστασης R και χωρητικότητας C



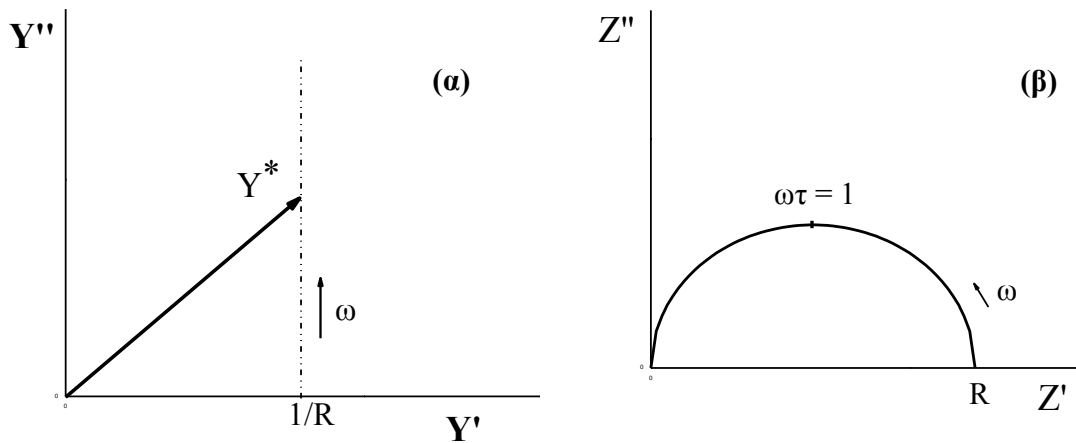
Αν το παραπάνω ισοδύναμο κύκλωμα αντιστοιχεί σε ένα υλικό μεταξύ των ηλεκτροδίων της μετρητικής διάταξης και το κύκλωμα προσομοίωσης είναι το (α), τότε η σύνθετη αγωγιμότητα $Y^*(\omega)$ που μετριέται είναι

$$Y^*(\omega) = 1/R + i\omega C \quad (11)$$

οπότε η σύνθετη αντίσταση θα είναι

$$Z^*(\omega) = \frac{R}{1 + \omega^2 \tau^2} - i \frac{R\omega\tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (12)$$

όπου $\tau = RC$ είναι η σταθερά χρόνου του κυκλώματος.



Σχήμα 2. Τα διαγράμματα της σύνθετης αγωγιμότητας (α) και της σύνθετης αντίστασης (β) για τη διάταξη της παράλληλης σύνδεσης αντίστασης και χωρητικότητας.

Από τη σχέση (12) αποπαραμετροποιώντας τον παράγοντα $\omega\tau$ από το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης, μπορεί ναδειχτεί ότι το διάγραμμα $Z''-Z'$ είναι ημικύκλιο με κέντρο πάνω στον άξονα Z' στο σημείο $R/2$ με ακτίνα $R/2$. Στη μέγιστη τιμή του Z'' είναι $\omega\tau=1$ και $Z''_{\max}=R/2$. Στο σχήμα (2) φαίνονται τα διαγράμματα σύνθετης αγωγιμότητας ($Y''-Y'$) και σύνθετης αντίστασης ($Z''-Z'$).

Από τις σχέσεις (6), (8), (10) και (11) προκύπτει ότι

$$\varepsilon^*(\omega) = \frac{C}{C_o} \left(1 - i \frac{1}{\omega\tau} \right) \quad (13)$$

και

$$\sigma^*(\omega) = \frac{C}{C_o} \left(\frac{1}{\tau} + i\omega \right) \quad (14)$$

όπου C_o είναι η χωρητικότητα του άδειου πυκνωτή. Άρα το παραπάνω ισοδύναμο κύκλωμα, όπως προκύπτει από τα πραγματικά μέρη των σχέσεων

(13) και (14), αντιστοιχεί στην απόκριση ενός υλικού με τιμή του ϵ' ανεξάρτητη από την συχνότητα και ίση με

$$\epsilon' = \frac{C}{C_0} \quad (15)$$

και επίσης με τιμή του σ' ανεξάρτητη της συχνότητας, ίση με

$$\sigma' = \frac{C}{\tau C_0} = \frac{d}{RA} \quad (16)$$

όπου d είναι το πάχος του υλικού και A είναι η επιφάνεια των ηλεκτροδίων ($\epsilon_0=1$).

Η σταθερά χρόνου, $\tau=RC$ ($=\epsilon'/\sigma'$), είναι ο χρόνος αποκατάστασης της αγωγιμότητας του υλικού, δηλαδή ο χρόνος που χρειάζεται για να μειωθεί το ηλεκτρικό πεδίο μέσα στο υλικό, στο $1/e$ της αρχικής του τιμής, όταν η διηλεκτρική μετατόπιση D είναι σταθερή. Το παραπάνω λοιπόν ισοδύναμο κύκλωμα, είναι κατάλληλο για την αναπαράσταση ενός μηχανισμού αγωγιμότητας.

B) Κύκλωμα με χωρητικότητα C και αντίσταση R σε σειρά



Η σύνθετη αντίσταση $Z^*(\omega)$ του παραπάνω κυκλώματος είναι

$$Z^*(\omega) = R - i \frac{1}{\omega C} \quad (18)$$

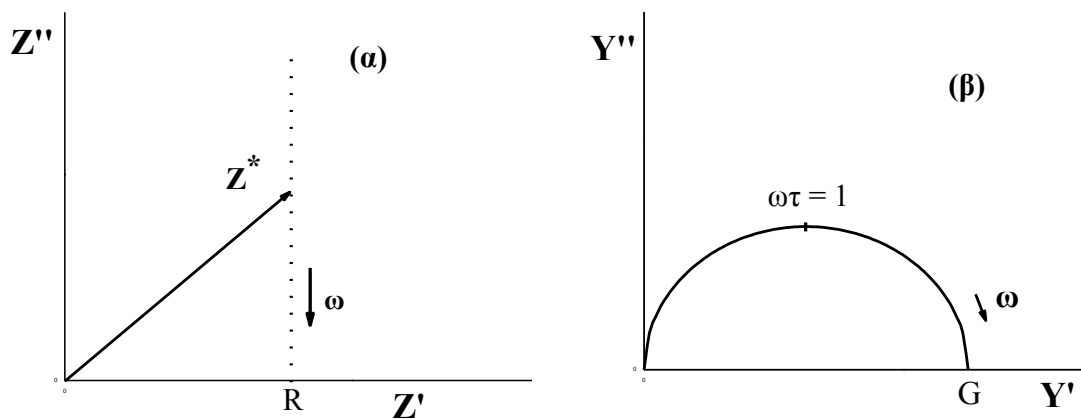
ενώ η σύνθετη αγωγιμότητα $Y^*(\omega)$ είναι

$$Y^*(\omega) = \frac{G\omega^2\tau^2}{1+\omega^2\tau^2} + i \frac{G\omega\tau}{1+\omega^2\tau^2} \quad (19)$$

όπου $\tau = C/G = CR$ είναι η σταθερά χρόνου του κυκλώματος. Στο σχήμα (3) παρουσιάζονται τα διαγράμματα της σύνθετης αντίστασης και της σύνθετης αγωγιμότητας.

Το ισοδύναμο κύκλωμα (B), αν και αντιστοιχεί σε μια διαδικασία πόλωσης που γίνεται με απώλειες ενέργειας, δεν μπορεί να περιγράψει μια πραγματική απόκριση ενός υλικού σε όλο το εύρος συχνοτήτων, γιατί για $\omega\tau \gg 1$ λόγω των σχέσεων (6) και (19) είναι

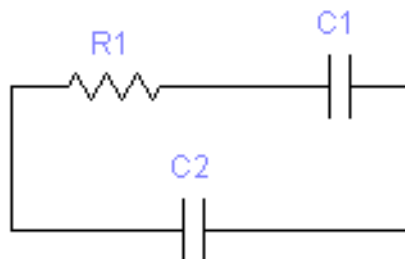
$$\varepsilon'(\omega) = \frac{G}{\omega^2 \tau C_0} \quad (20)$$



Σχήμα 3. Τα διαγράμματα της σύνθετης αντίστασης (α) και της σύνθετης αγωγιμότητας (β) για τη περίπτωση του κυκλώματος (B).

που σημαίνει ότι το πραγματικό μέρος της διηλεκτρικής συνάρτησης τείνει στο μηδέν (<1!) στις υψηλές συχνότητες.

Γ) Κύκλωμα R_1 - C_1 σε σειρά , παράλληλο με χωρητικότητα C_2



Αν το ισοδύναμο κύκλωμα (B) συνδεθεί παράλληλα με μια χωρητικότητα C_2 , προκύπτει το παραπάνω ισοδύναμο κύκλωμα (Γ). Η σύνθετη αγωγιμότητα του κυκλώματος θα είναι

$$Y^*(\omega) = \frac{G_1 \omega^2 \tau_1^2}{1 + \omega^2 \tau_1^2} + i \frac{G_1 \omega \tau_1}{1 + \omega^2 \tau_1^2} + i \omega C_2 \quad (21)$$

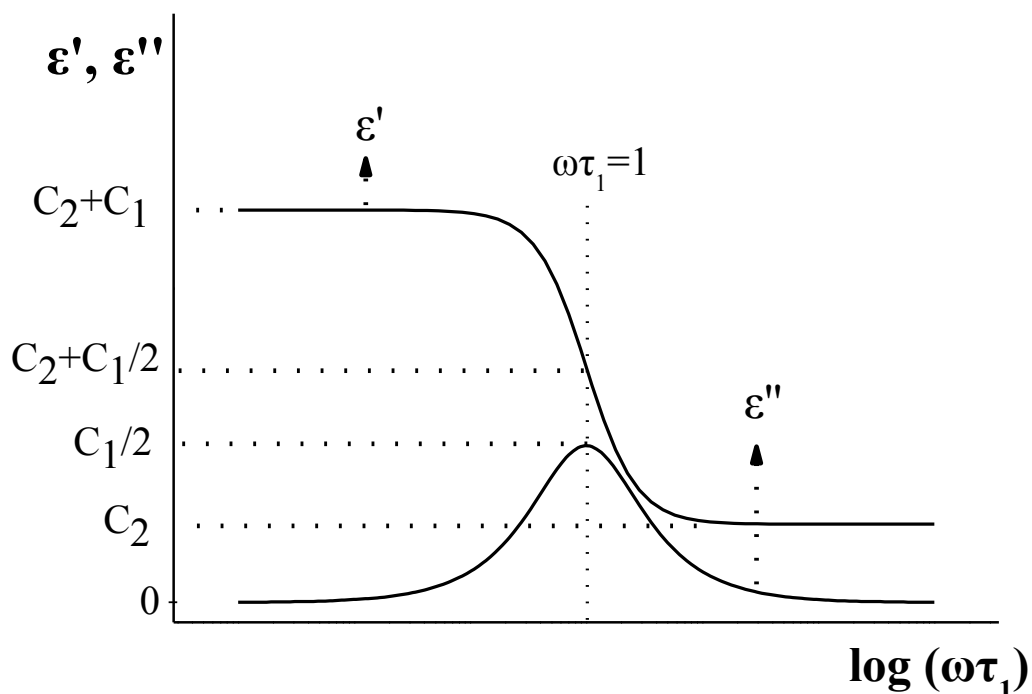
όπου $\tau_1 = R_1 C_1 = C_1 / G_1$ η σταθερή χρόνου του κυκλώματος $C_1 - R_1$. Η σύνθετη αγωγιμότητα και η σύνθετη αντίσταση μπορούν να πάρουν τη μορφή

$$Y^*(\omega) = \frac{G_1}{1 - i \omega \tau_1} + i \frac{G_1}{(r - 1) \omega \tau_1} \quad (22)$$

και

$$Z^*(\omega) = \frac{R_1}{1 + i \omega \tau_1 / r} - i \frac{R_1}{(r - 1) \omega \tau_1 / r} \quad (23)$$

όπου $r = C_1 / C_2$. Τα διαγράμματα σύνθετης αντίστασης και αγωγιμότητας είναι ημικυκλικά (στη περιοχή συχνοτήτων γύρω από τη τιμή $\omega = 1 / R_1 C_1$) όταν ο λόγος $r = C_1 / C_2$ είναι μεγάλος. Η απόκλιση από το ημικύκλιο αρχίζει καθώς ο λόγος r παίρνει μικρότερες τιμές, λόγω του δεύτερου όρου των σχέσεων (22) και (23).



Σχήμα 4. Το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της διηλεκτρικής συνάρτησης ϵ^* συναρτήσει της συχνότητας, για ένα υλικό όπου το ισοδύναμο κύκλωμά του είναι το (Γ).

Από τις σχέσεις (6) και (21), προκύπτει ότι το πραγματικό μέρος, $\varepsilon'(\omega)$ και φανταστικό μέρος $\varepsilon''(\omega)$ της διηλεκτρικής συνάρτησης θα είναι

$$\varepsilon'(\omega) = \frac{C_2}{C_o} + \frac{1}{C_o} \frac{C_1}{1 + \omega^2 \tau_1^2} \quad (24)$$

και

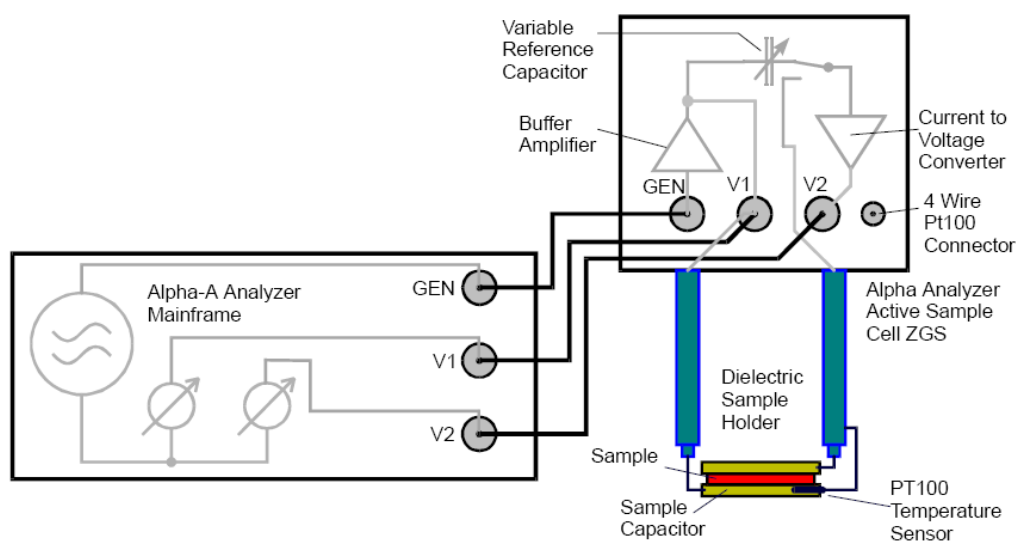
$$\varepsilon''(\omega) = \frac{1}{C_o} \frac{C_1 \omega \tau_1}{1 + \omega^2 \tau_1^2} \quad (25)$$

Οι σχέσεις (24) και (25) περιγράφουν ένα μηχανισμό αποκατάστασης τύπου Debye. Στο σχήμα (4) δίνεται το διάγραμμα του ε' και του ε'' ως συνάρτηση του $\omega\tau$.

Το ισοδύναμο κύκλωμα (Γ) σπάνια μπορεί να περιγράψει μια πραγματική απόκριση υλικού. Μπορεί όμως να περιγράψει με αρκετά καλή προσέγγιση μια διαδικασία πόλωσης που μπορεί να οφείλεται σε μη αλληλεπιδρώντα δίπολα ενός υλικού με μικρό ιξώδες ή σε μη αλληλεπιδρώντα φορτία που δεν συνεισφέρουν στην αγωγιμότητα συνεχούς και η κίνησή τους σε μικροσκοπικές αποστάσεις μέσα στο υλικό οδηγεί σε πόλωση (διεπιφανειακή πόλωση).

Η εργαστηριακή διάταξη – Novocontrol Alpha Analyzer

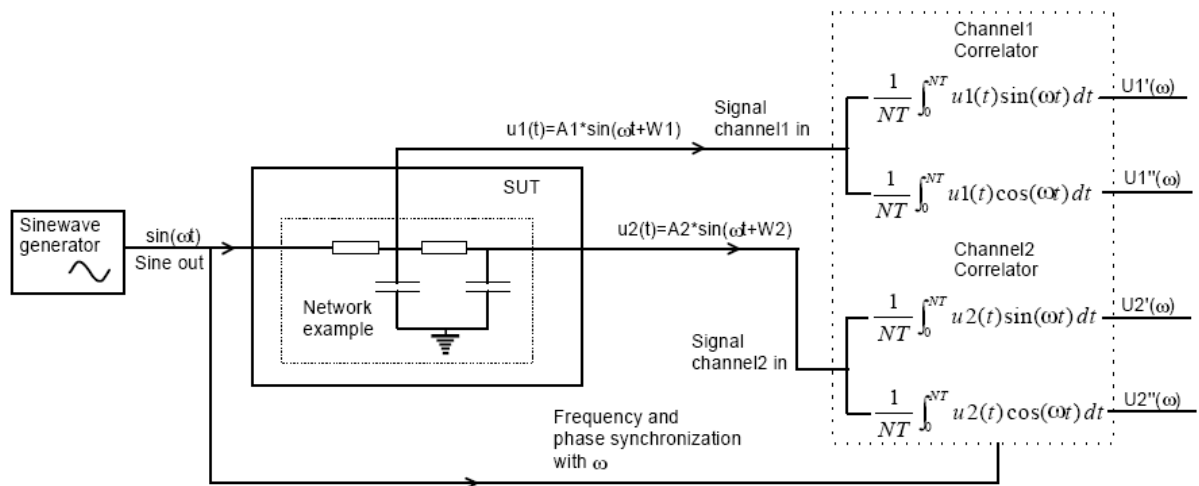
Ο Alpha Analyzer της Novocontrol μετράει (πραγματικό και φανταστικό μέρος) της μιγαδικής διηλεκτρικής σταθεράς, της μιγαδικής ειδικής αγωγιμότητας και της μιγαδικής αντίστασης υλικών και διατάξεων, σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων με μεγάλη ακρίβεια. Ο Alpha Analyzer είναι μια σύνθετη διάταξη ηλεκτρονικών μετρήσεων, όπου αποτελείται από την κύρια μονάδα (Alpha analyzer mainframe) και αρκετές επιπλέον μονάδες που μπορούν να διασυνδεθούν στην κύρια μονάδα (test interfaces), όπως το ενεργό κελί μέτρησης των υλικών (active sample cell ZGS). Η κύρια μονάδα του Alpha Analyzer περιέχει έναν αναλυτή απόκρισης συχνότητας (frequency response analyzer) με μια γεννήτρια αρμονικών σημάτων και μια γεννήτρια συνεχούς τάσης (dc-bias) και επιπλέον δύο κανάλια εισόδου ac τάσης. Κάθε κανάλι μετράει το πλάτος και τη γωνία φάσης ενός αρμονικού σήματος τάσης που εφαρμόζεται στην κάθε είσοδο.



Διάγραμμα ροής μιας ηλεκτρικής μέτρησης υλικού με τον Alpha Analyzer συνδεδεμένο με το ενεργό κελί μέτρησης ZGS.

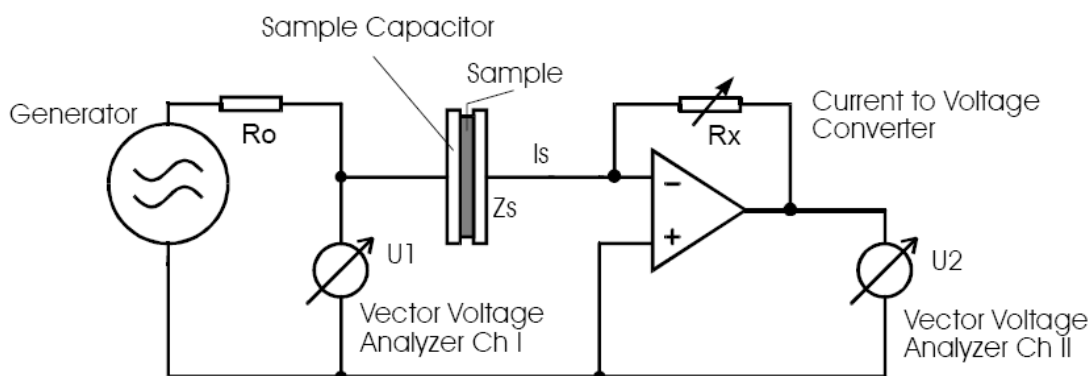
Η σύνδεση του Alpha Analyzer με το ενεργό κελί μέτρησης ZGS επιτρέπει μετρήσεις στις περιοχές: συχνοτήτων $3 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^7$ Hz, αντιστάσεων $10^{-2} - 10^{14}$ Ω, χωρητικοτήτων 1 fF – 1 F, εφαπτομένης απωλειών $10^{-5} - 10^4$, με εναλλασσόμενη τάση $100 \mu\text{V} - 3 V_{\text{rms}}$ και συνεχή τάση (- 40) – (+40 V) στα 70 mA.

Η αρχή μέτρησης του Alpha Analyzer βασίζεται στην εφαρμογή μιας γνωστής ac τάσης στο υλικό – διάταξη και στη μέτρηση του ρεύματος απόκρισης. Συγκεκριμένα μετριέται το πλάτος του ρεύματος και η γωνία φάσης του ως προς την τάση διέγερσης. Στη συνέχεια, θεωρώντας απόκριση, από το νόμο του Ohm υπολογίζεται η μιγαδική αντίσταση Z^* , η μιγαδική ειδική αγωγιμότητα σ^* , η μιγαδική διηλεκτρική σταθερά ϵ^* κ.αλ.



Διάγραμμα αναλυτή απόκρισης συχνότητας σε σύστημα SUT που αποτελείται από ένα δίκτυο RC.

Η μέτρηση της ac τάσης διέγερσης μετριέται άμεσα από το πρώτο κανάλι (Ch I) του Alpha αναλυτή απόκρισης συχνότητας. Για τη μέτρηση του ρεύματος απόκρισης χρησιμοποιείται επιπρόσθετα ένας μετατροπέας ρεύματος σε τάση, που μετατρέπει το ρεύμα που διαρρέει το υλικό σε τάση η οποία μετριέται από το δεύτερο κανάλι Alpha αναλυτή απόκρισης συχνότητας, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Αρχή μέτρησης της αντίστασης ενός υλικού (sample).

Στο παραπάνω σχήμα η αντίσταση R_0 περιορίζει την ένταση του ρεύματος που διαρρέει το υλικό στην περίπτωση που αυτό χαρακτηρίζεται από χαμηλή αντίσταση. Το ρεύμα I_S που διαρρέει το υλικό εισέρχεται στον μετατροπέα ρεύματος σε τάση. Ο Alpha Analyzer επιλέγει τέτοια τιμή αντίστασης ανάδρασης R_X , έτσι ώστε η U_2 να είναι στην κατάλληλη περιοχή μέτρησης τάσης του δεύτερου καναλιού (Ch II). Στην περίπτωση ιδανικών στοιχείων ισχύει

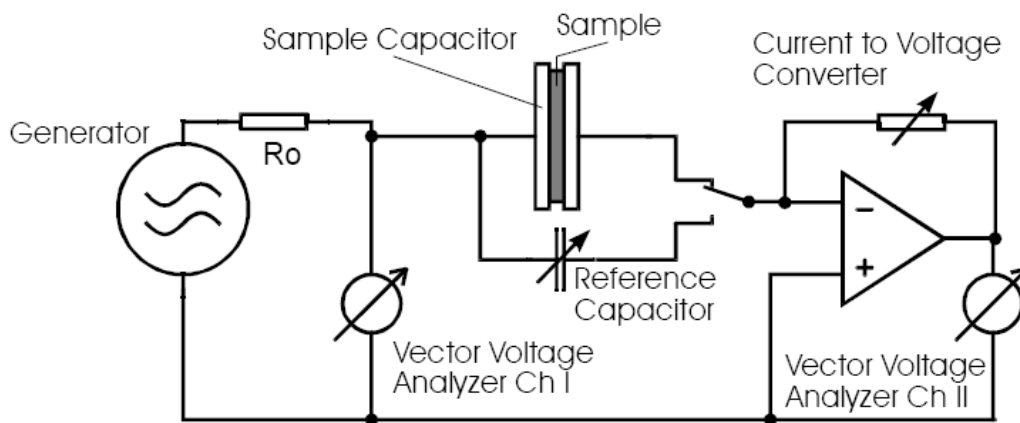
$$I_S = -\frac{U_2}{R_X}$$

και για ιδανική συμπεριφορά του μετατροπέα ρεύματος σε τάση, θα είναι

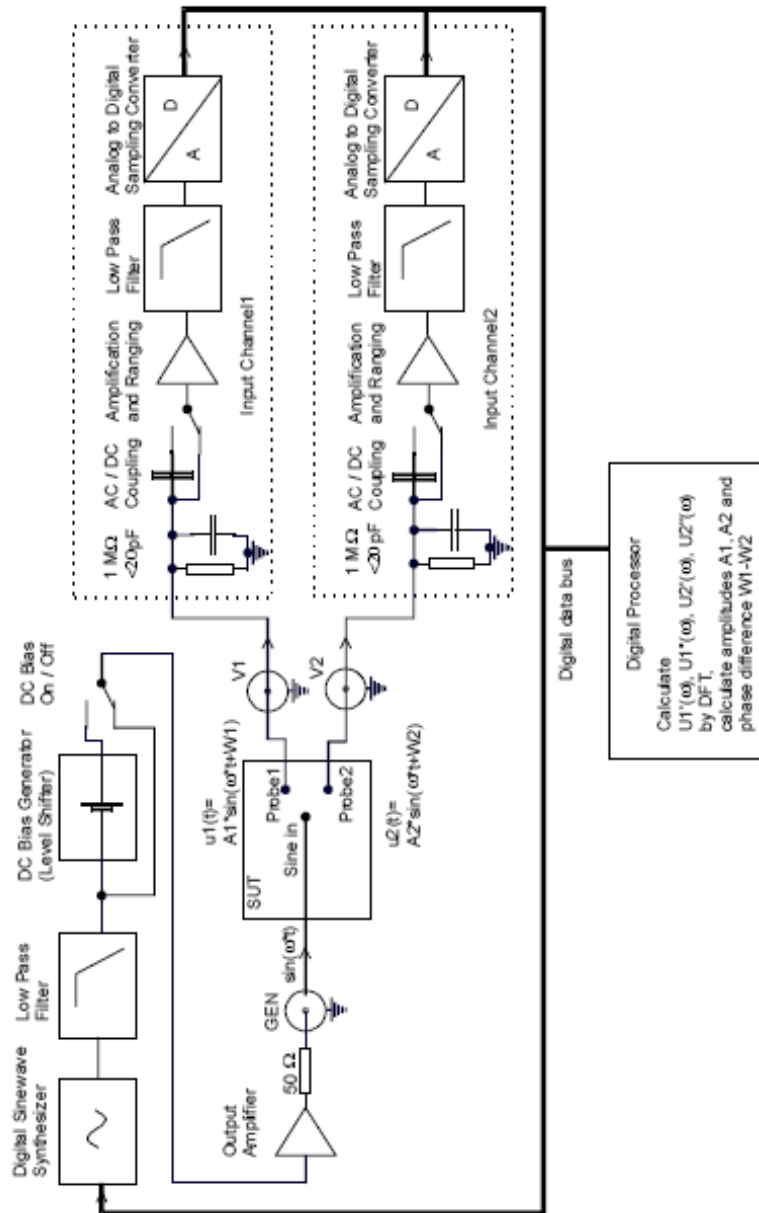
$$Z_S = \frac{U_1}{I_S} = -\frac{U_1}{U_2} R_X$$

Στην παραπάνω διάταξη μπορούν να μετρηθούν πολύ χαμηλά ρεύματα I_S , έως fA, και συνεπώς η μέτρηση πολύ υψηλών αντιστάσεων είναι εφικτή με καλή ακρίβεια έως και στα 10 MHz.

Μετά από τη μέτρηση του υλικού (σε κάθε συχνότητα), πραγματοποιείται και μέτρηση ενός πυκνωτή αναφοράς (reference capacitor), όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Αυτή η δεύτερη μέτρηση χρησιμοποιείται για να γίνει κάποιο είδος βαθμονόμησης (calibration) στο μετατροπέα ρεύματος σε τάση. Η τεχνική αυτή βελτιώνει σημαντικά την ακρίβεια των μετρήσεων, επειδή όλα τα γραμμικά συστηματικά σφάλματα του μετατροπέα ρεύματος σε τάση και των καναλιών ανάλυσης απόκρισης της συχνότητας, ακυρώνονται.



Μέτρηση γνωστού πυκνωτή αναφοράς



Κύριο διάγραμμα ροής του Alpha αναλυτή απόκρισης συχνότητας

Εργαστηριακές δραστηριότητες

A1. Μετρήστε με ένα μικρόμετρο το πάχος, t , μιας πολυουρεθάνης (PU) και έχοντας υπόψη ότι η διάμετρος των ηλεκτροδίων του κελιού μέτρησης ZGS είναι 12 mm, υπολογίστε τη χωρητικότητα του άδειου πυκνωτή C_0

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{t}$$

όπου A είναι το εμβαδό της επιφάνειας του πυκνωτή και $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m είναι η ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού χώρου.

A2. Τοποθετείστε την πολυουρεθάνη στο κελί μέτρησης του Alpha Analyzer και μετρήστε το πραγματικό και φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης, $Z^* = Z' - iZ''$, του υλικού στην περιοχή συχνοτήτων $f = 10^{-2} - 10^7$ Hz.

A3. Μετά το τέλος της μέτρησης δημιουργήστε στο πρόγραμμα Origin τα διαγράμματα, $\epsilon' - f$, $\epsilon'' - f$, $Z'' - f$, $Z' - f$, $M'' - f$, $\sigma' - f$ και $\tan \delta - f$.

A4. Από τα προηγούμενα διαγράμματα χαρακτηρίστε ηλεκτρικά το υλικό που μετρήσατε:

- Να βρείτε τη διηλεκτρική σταθερά που αντιστοιχεί στην τιμή του ϵ' στις χαμηλές συχνότητες.
- Να βρείτε αν υπάρχει μηχανισμός διηλεκτρικής αποκατάστασης που αντιστοιχεί στην ύπαρξη κορυφή στο διάγραμμα $\epsilon'' - f$.
- Να βρείτε την αγωγιμότητα dc του υλικού που αντιστοιχεί στην τιμή του πλατώ του διαγράμματος $\log \sigma' - \log f$ στις χαμηλές συχνότητες.
- Να βρείτε την αντίσταση R του υλικού από τη σχέση $\sigma_{dc} = t/RA$.
- Να βρείτε την αντίσταση R του υλικού από τη σχέση $Z''_{max} = R/2$ όπου Z''_{max} είναι η μέγιστη τιμή του Z'' στην κορυφή του διαγράμματος $Z'' - \log f$.

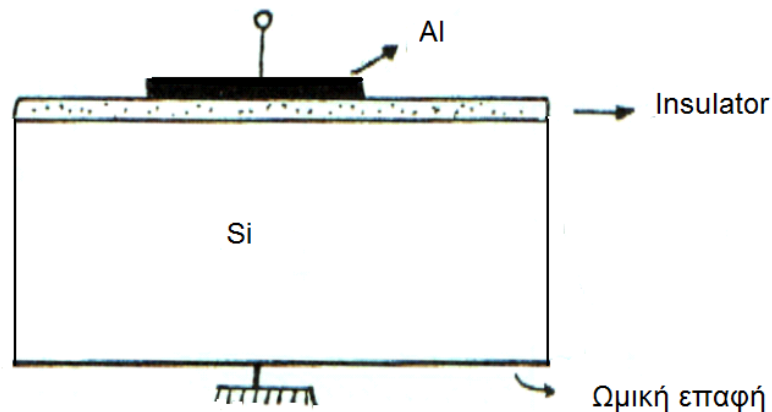
- Να βρείτε την χωρητικότητα του υλικού από τη σχέση $C = \epsilon' C_0$, όπου ϵ' η τιμή του στις χαμηλές συχνότητες του διαγράμματος $\epsilon' - \log f$.

- Να βρείτε την χωρητικότητα του υλικού από τη σχέση $M''_{\max} = C_0/2C$, όπου M''_{\max} είναι η μέγιστη τιμή του M'' στην κορυφή του διαγράμματος $M'' - \log f$.

- Να βρείτε τις απώλειες ενέργειας του υλικού, υπό μορφή θερμότητας, από το διάγραμμα $\tan \delta - \log f$. Τι τιμές θεωρείτε ότι πρέπει να έχει το $\tan \delta$ σε όλο το εύρος λειτουργικών συχνοτήτων, όταν ένα συγκεκριμένο υλικό πρέπει να αποτελέσει μέρος ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος;

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ C-V ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ MIS

Η δομή MIS (Metal - Insulator - Semiconductor) είναι μια διάταξη μετάλλου - μονωτή - ημιαγωγού που αποτελεί ένα βασικό στοιχείο της τεχνολογίας των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο ημιαγωγός είναι το πυρίτιο (Si), ενώ πολλές φορές χρησιμοποιείται σαν διηλεκτρικό στην επιφάνειά του το οξείδιό του (SiO_2) και σαν μεταλλική επαφή λεπτό στρώμα αλουμινίου (Al) ή χρυσού. Η μεταλλική αυτή επαφή της διάταξης λέγεται και πύλη (gate), ενώ στην κάτω επιφάνεια του ημιαγωγού υπάρχει ωμική επαφή κατάλληλη για την εφαρμογή εξωτερικής πόλωσης (Σχήμα 1).

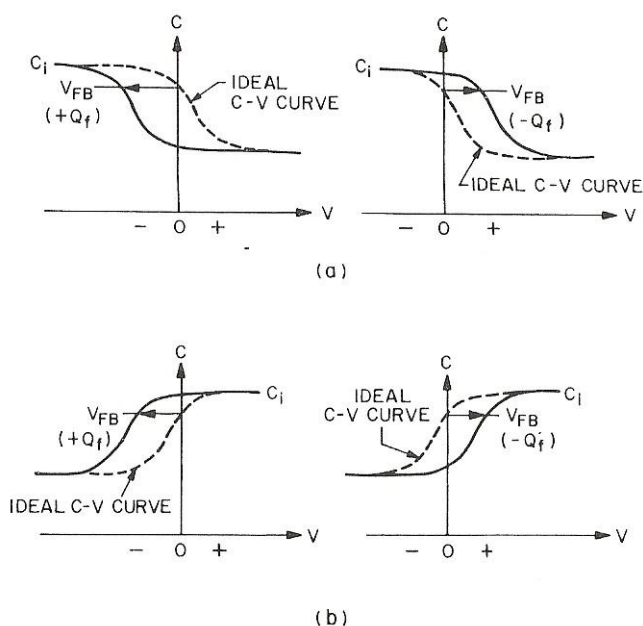


Σχήμα 1. Τομή διόδου MIS.

Όταν το διηλεκτρικό είναι οξείδιο πυριτίου, η διάταξη καλείται και **δίοδος ή πυκνωτής MOS**. Οι ιδιότητες του οξειδίου καθώς και της διεπιφάνειας $\text{Si} - \text{SiO}_2$ επηρεάζουν καθοριστικά τις ηλεκτρικές χαρακτηριστικές και τη λειτουργία των κυκλωμάτων που κατασκευάζονται με βάση τη δομή MOS. Έτσι κρίνεται απαραίτητος ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός τόσο του οξειδίου SiO_2 , όσο και της επιφάνειας του ημιαγωγού Si της διόδου MOS. Ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός γίνεται με τη βοήθεια μετρήσεων των χαρακτηριστικών χωρητικότητας - τάσης C(V).

Η χαρακτηριστική C-V (Σχήμα 2), χωρίζεται σε τρεις περιοχές: αναστροφή, απογύμνωση και συσσώρευση. Ανάλογα με τον τύπο του ημιαγωγίμου

υποστρώματος οι χαρακτηριστικές έχουν σχέση αντικειμένου-ειδώλου ως προς την εφαρμοζόμενη τάση.



Σχήμα 2. Χαρακτηριστική C-V a) για ημιαγωγό τύπου-p, b) για ημιαγωγό τύπου-n.

i. Περιοχή συσσώρευσης

Για έναν ημιαγωγό τύπου p η συσσώρευση λαμβάνεται όταν στην πύλη εφαρμοστούν αρνητικές τιμές της τάσης. Η αρνητική τάση προκαλεί τη συγκέντρωση οπών (φορείς πλειονότητας) κάτω από το οξειδίο της πύλης στην επαφή οξειδίου-ημιαγωγού. Στην περιοχή αυτή των τάσεων ο ημιαγωγός βρίσκεται στην συσσώρευση και η μετρούμενη χωρητικότητα παραμένει σταθερή και αντιστοιχεί στη χωρητικότητα του οξειδίου C_{ox} . Έτσι είναι δυνατός ο υπολογισμός του πάχους του οξειδίου με βάση την τιμή της μετρούμενης χωρητικότητας.

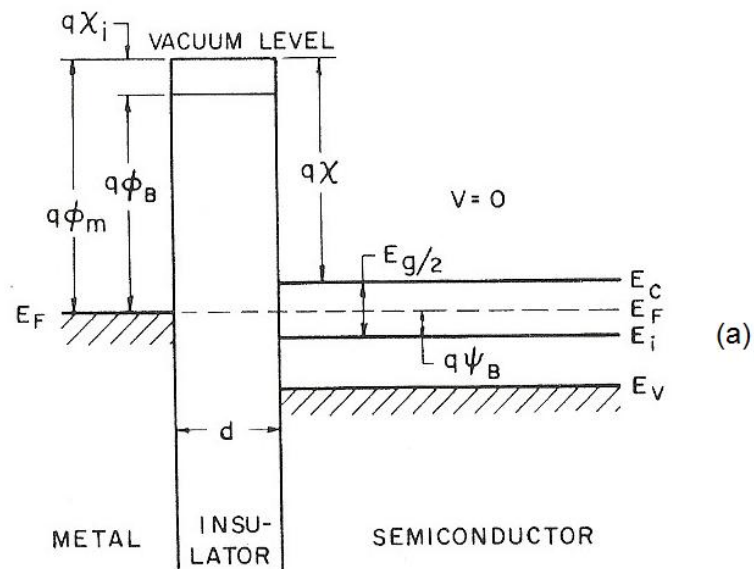
ii. Περιοχή απογύμνωσης

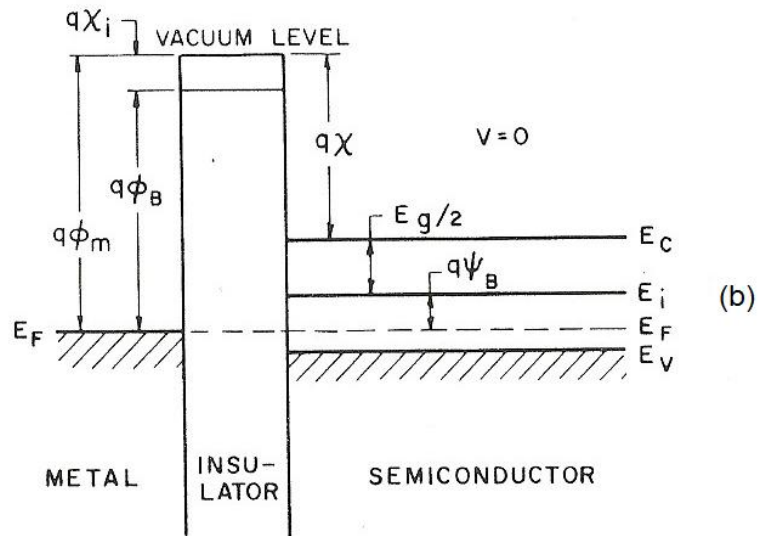
Όταν η συνεχής τάση μεταξύ μετάλλου πύλης και υποστρώματος μεταβαίνει προς θετικές τιμές, η χωρητικότητα δεν ανταποκρίνεται στο πρότυπο ενός πυκνωτή με παράλληλους οπλισμούς, όπως συμβαίνει στην περιοχή της συσσώρευσης. Αυτό συμβαίνει γιατί με την εφαρμογή θετικής πόλωσης στην πύλη απωθεί τις οπές από την επαφή οξειδίου-ημιαγωγού και δημιουργείται

μια περιοχή κενή από φορείς κάτω από το οξειδίο της πύλης. Έτσι λαμβάνει χώρα η ύπαρξη δύο χωρητικοτήτων συνδεδεμένων σε σειρά. Η πρώτη είναι αυτή του οξειδίου και η δεύτερη είναι αυτή της περιοχής απογύμνωσης. Καθώς η τάση στην πύλη λαμβάνει όλο και πιο θετικές τιμές, η ζώνη απογύμνωσης διεισδύει βαθύτερα στον ημιαγωγό και η χωρητικότητα απογύμνωσης ελαττώνεται με αποτέλεσμα να παρατηρείται η αρνητική κλίση στην χαρακτηριστική καμπύλη.

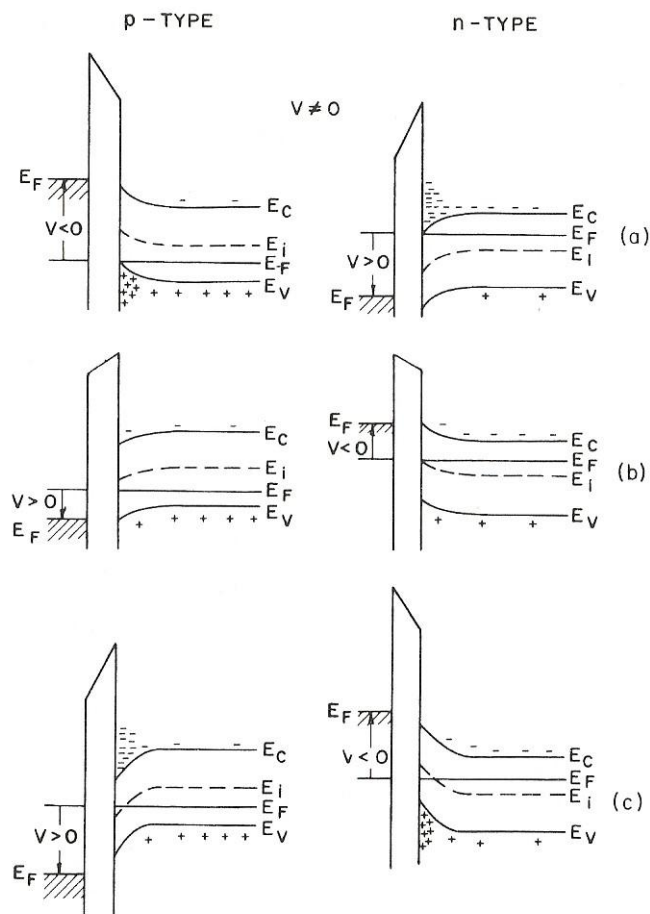
iii. Περιοχή αναστροφής

καθώς η τάση στην πύλη να αυξάνει προς ακόμη θετικότερες τιμές (μετά την τάση κατωφλίου), έλκονται ηλεκτρόνια τα οποία αποτελούν φορείς μειονότητας στο υπόστρωμα και τα οποία, συγκεντρώνονται στην επαφή οξειδίου-ημιαγωγού και δημιουργούν ένα στρώμα το οποίο ονομάζεται στρώμα αναστροφής, επειδή η εγγύτερη περιοχή στην επαφή οξειδίου-ημιαγωγού από τύπου p έγινε τύπου n . Ο λόγος για τον οποίο η χωρητικότητα λαμβάνει σταθερή τιμή πέρα από μια τάση και μετά είναι ότι οι περισσότεροι από τους διαθέσιμους φορείς μειονότητας βρίσκονται στο στρώμα αναστροφής και περαιτέρω αύξηση της τάσης δεν οδηγεί σε επέκταση της ζώνης απογύμνωσης βαθύτερα στον ημιαγωγό.





Σχήμα 3. Ενεργειακό διάγραμμα για ιδανική MIS δίοδο με $V=0$. α) για ημιαγωγό τύπου-n, β) για ημιαγωγό τύπου-p.



Σχήμα 4. Ενεργειακό διάγραμμα για ιδανική MIS δίοδο με $V \neq 0$, για τις ακόλουθες περιπτώσεις: α) συσσώρευση, β) απογύμνωση, γ) αναστροφή.

Υπολογισμός παραμέτρων

Από τις καμπύλες χωρητικότητας- τάσης μιας διάταξης MIS, εξάγεται ένας σημαντικός αριθμός παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τη δομή. Οι πληροφορίες που μπορούν να εξαχθούν έχουν σχέση με τυπικές παραμέτρους της δομής MIS (πάχος οξειδίου, τάση επιπέδων ζωνών κλπ), με παραμέτρους για φορτία στο οξειδίο (πυκνότητα διεπιφανειακών καταστάσεων, πυκνότητα ιόντων) και τέλος παραμέτρους που σχετίζονται με τις προσμίξεις.

Υπολογισμός πάχους οξειδίου

Όταν το πάχος του διηλεκτρικού (ή οξειδίου) είναι μεγαλύτερο από 5nm, η εξαγωγή της τιμής αυτού είναι σχετικά απλή, αφού αυτό που χρειάζεται να γνωρίζει κανείς είναι η τιμή της χωρητικότητας στην περιοχή της συσσώρευσης, και την επιφάνεια που καλύπτει η πύλη. Η σχέση που δίνει το πάχος του οξειδίου είναι η παρακάτω

$$t_{ox} = \frac{A \varepsilon_o \varepsilon_{ox}}{C_{ox}} \quad (1)$$

όπου t_{ox} είναι το πάχος οξειδίου (nm), A το εμβαδόν της πύλης (cm^2), ε_{ox} η διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού (ή οξειδίου), ε_o είναι η ηλεκτρική επιδεκτικότητα του κενού (F/cm) και C_{ox} η τιμή της χωρητικότητας στη συσσώρευση (pF). Ο υπολογισμός της τιμής του πάχους του οξειδίου με τον τρόπο αυτό δίνει αποτελέσματα με πολύ μεγάλη ακρίβεια, με την προϋπόθεση φυσικά ότι η μετρούμενη τιμή της χωρητικότητας αντιστοιχεί στην χωρητικότητα του οξειδίου (περιοχή ισχυρής συσσώρευσης). Στην περίπτωση λεπτών οξειδίων (<5nm), η χωρητικότητα στη συσσώρευση δε φτάνει σε κόρο και ο υπολογισμός του πάχους του οξειδίου με βάση τη σχέση (1), δεν οδηγεί σε σωστά αποτελέσματα.

Υπολογισμός χωρητικότητας και τάσης επιπέδων ζωνών

Η τάση επιπέδων ζωνών εκφράζει την τάση στην πύλη του πυκνωτή που αντιστοιχεί σε άρση της κάμψης των ενεργειακών ζωνών σε μια επαφή MIS. Όταν εφαρμοστεί τάση επιπέδων ζωνών, το επιφανειακό δυναμικό γίνεται

μηδέν. Ένας απλός τρόπος να προσδιοριστεί η τάση αυτή είναι μέσα από την καμπύλη χωρητικότητας- τάσης, με γνωστή την χωρητικότητα επιπέδων ζωνών. Δύο είναι οι βασικές σχέσεις από τις οποίες λαμβάνονται οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν την χωρητικότητα MIS. Από την πρώτη εξάγεται το εξωγενές μήκος Debye και με βάση αυτή την τιμή, από τη δεύτερη εξάγεται η χωρητικότητα επιπέδων ζωνών. Οι δύο σχέσεις είναι οι παρακάτω

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_s kT}{q^2 N_x}} \quad (2)$$

$$C_{fb} = \frac{C_{ox} \epsilon_s A / \lambda_D}{C_{ox} + \epsilon_s A / \lambda_D} \quad (3)$$

όπου λ_D το μήκος Debye, ϵ_s η ηλεκτρική επιδεκτικότητα του υποστρώματος (F/cm), k η σταθερά Boltzmann (J/K), T η θερμοκρασία (K), q το φορτίο του ηλεκτρονίου (Cb) και N_x , η συγκέντρωση προσμίξεων τύπου «αποδεκτών» σε ημιαγωγό τύπου-p ή προσμίξεων τύπου «δοτών» σε ημιαγωγό τύπου-n (N_A ή N_D αντίστοιχα), A το εμβαδόν της πύλης (cm^2) και C_{ox} η χωρητικότητα του οξειδίου πύλης (pF). Ο υπολογισμός της χωρητικότητας επιπέδων ζωνών C_{fb} (pF), γίνεται εύκολα με τη χρήση των ανωτέρων τύπων. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι ο προσδιορισμός του C_{fb} με βάση τη σχέση (3), δεν είναι σωστός στη περίπτωση όπου η πυκνότητα παγίδων διεπιφανειακών καταστάσεων D_{it} , είναι μεγαλύτερη από 10^{12} – $10^{13} cm^{-2}$.

Ο πειραματικός προσδιορισμός της τάσης επιπέδων V_{fb} ζωνών γίνεται με βάση την καμπύλη χωρητικότητας-τάσης βρίσκοντας σε ποια τιμή της τάσης αντιστοιχεί η τιμή της χωρητικότητας επιπέδων ζωνών, της οποίας ο υπολογισμός περιγράφηκε νωρίτερα.

Υπολογισμός τάσης κατωφλίου

Η τάση κατωφλίου V_{th} μιας δομής MOS είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος και η χρήση της σε δομές τρανζίστορ MOSFET καθορίζει το πότε ξεκινά η αγωγή ηλεκτρικού ρεύματος στο κανάλι του τρανζίστορ. Ως τάση κατωφλίου V_{th} ορίζεται η τάση εκείνη στην οποία το επιφανειακό δυναμικό ϕ_s έχει λάβει

διπλάσια τιμή από αυτή του bulk δυναμικού ϕ_b . Ο υπολογισμός της τάσης κατωφλίου V_{th} (V) γίνεται μέσα από τη σχέση:

$$V_{th} = \pm \left(\frac{A}{C_{ox}} \sqrt{4\varepsilon_s q |N_{bulk}| |\phi_b|} + 2|\phi_b| \right) + V_{fb} \quad (4)$$

όπου A το εμβαδόν της πύλης (cm^2), C_{ox} η τιμή της χωρητικότητας στη συσσώρευση (ρF), ε_s η ηλεκτρική επιδεκτικότητα του υποστρώματος (F/cm), q το φορτίο του ηλεκτρονίου (Cb), N_{bulk} η συγκέντρωση προσμίξεων στο υπόστρωμα (cm^{-3}), ϕ_b το δυναμικό του υποστρώματος (V) και V_{fb} η τάση επιπέδων ζωνών (V). Το ϕ_b προσδιορίζεται μέσα από τη σχέση:

$$\phi_b = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_{bulk}}{n_i} \right) \quad (5)$$

όπου k η σταθερά Boltzmann (J/K), T η θερμοκρασία (K), q το φορτίο του ηλεκτρονίου (Cb) και n_i η ενδογενής συγκέντρωση φορέων (cm^{-3}).

Υπολογισμός διαφοράς έργων εξόδου μετάλλου-ημιαγωγού

Μαζί με το ενεργό φορτίο στο οξειδίο, η άλλη συνεισφορά που είναι υπεύθυνη για την κάμψη των ζωνών σε μια δομή MIS είναι η διαφορά των έργων εξόδου μετάλλου-ημιαγωγού ή απλούστερα και όπως πιο συχνά συναντάται, έργο εξόδου W_{ms} και εκφράζει την απαιτούμενη ενέργεια για την εξαγωγή ενός ηλεκτρονίου από την πύλη και από το υπόστρωμα. Η σχέση η οποία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του έργου εξόδου είναι η επόμενη:

$$W_{ms} = W_m - \left(W_s + \frac{E_g}{2} - \phi_b \right) \quad (6)$$

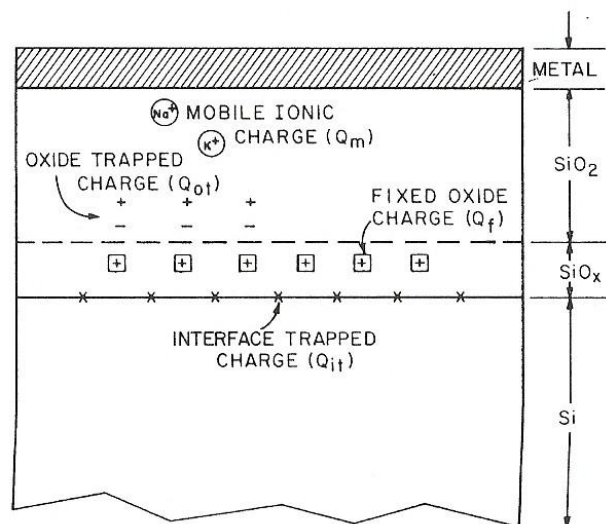
όπου W_m το έργο εξόδου του μετάλλου (V), W_s είναι το έργο εξόδου του υλικού του υποστρώματος ή διαφορετικά η ηλεκτροσυγγένεια (V), E_g το ενεργειακό χάσμα του υποστρώματος (V) και ϕ_b το δυναμικό του

υποστρώματος (V). Για τυπικές χωρητικότητες (πύλη από αλουμίνιο σε υπόστρωμα πυριτίου), είναι $W_m=4.1\text{eV}$, $W_s=4.15\text{eV}$ και $E_g=1.12\text{eV}$.

Υπολογισμός φορτίων οξειδίου

Τα φορτία που βρίσκονται μέσα στο οξειδίο σε μία δομή MOS είναι το κινητό φορτίο ιόντων Q_m , το παγιδευμένο φορτίο Q_{ot} και το σταθερό φορτίο Q_f (σχήμα 5). Το άθροισμα των φορτίων αυτών αποτελεί το ενεργό φορτίο οξειδίου Q_{eff} , το οποίο δε μεταβάλλεται με την αλλαγή της τάσης με την οποία πολώνεται η πύλη, σε αντίθεση με το παγιδευμένο φορτίο Q_{it} της διεπιφάνειας $Si-SiO_2$. Ο υπολογισμός του Q_{eff} γίνεται με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$Q_{eff} = -C_{ox}(V_{fb} - W_{ms}) \quad (7)$$



Σχήμα 5 : Τα είδη των φορτίων που εμφανίζονται σε πραγματική δίοδο MOS

Εργαστηριακές δραστηριότητες

Τοποθετείστε τη δομή MIS του νιτριδίου (Si_3N_4) στο κελί του *Novocontrol Alpha Analyzer* και εφαρμόζοντας τάση από -15 V έως +15 V, με βήμα 0,1 V, μετρήστε τη χωρητικότητα της δομής εφαρμόζοντας μια επιπρόσθετη ac τάση πλάτους 10 mV στις συχνότητες 1, 10 και 100 kHz.

Από τις μετρήσεις C-V σχεδιάστε τις αντίστοιχες καμπύλες που προκύπτουν για τις παραπάνω συχνότητες, στο πρόγραμμα Origin.

Από τη μορφή των χαρακτηριστικών καμπυλών C-V, βρείτε σε ποιο τύπο ημιαγωγού αντιστοιχεί, π.χ. η καμπύλη του σχήματος ...αφορά σε ημιαγωγό p-τύπου, διότι έχει συσσώρευση (φορείς πλειονότητας) για αρνητικές τιμές πόλωσης.

Βρείτε τη χωρητικότητα του οξειδίου C_{ox} από την περιοχή συσσώρευσης της χαρακτηριστικής,

$$C_{ox} = \dots\dots\dots$$

Υπολογίστε στη συνέχεια τη διηλεκτρική σταθερά του νιτριδίου από τη σχέση (1), με δεδομένα ότι $\epsilon_{ox}=6$ και $A=3,8 \text{ cm}^2$, να υπολογίσετε το πάχος του διηλεκτρικού (νιτριδίου)

$$t = \dots\dots\dots$$

Αφού υπολογίσετε πρώτα το μήκος *Debye* λ_D από τη σχέση (2), αντικαθιστώντας την τιμή του στη σχέση (3), υπολογίστε τη χωρητικότητα επίπεδης ζώνης

$$C_{fb} = \dots\dots\dots$$

Από την καμπύλη χωρητικότητας-τάσης, βρίσκοντας, σε ποια τιμή της τάσης, αντιστοιχεί η τιμή της χωρητικότητας επιπέδων ζωνών C_{fb} , αναζητείστε την τάση επιπέδων ζωνών, $V_{fb} = \dots\dots\dots$

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. "Ηλεκτρονικά συστήματα μετρήσεων", Tran Trien Lang, Επιμέλεια: Θ. Λαόπουλος, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
2. "Electronic measurements and instrumentation", Klaassen B. Klaas, University Press, Cambridge, 2002.
3. "Principles of electrical measurements", S. Tumanski, Taylor & Francis Group, 2006.
4. "Broadband dielectric spectroscopy", F. Kremer and A. Schonhals, Springer-Verlag, Berlin, 2003.
5. "Physics of semiconductors devices", S.M. Sze, John Wiley & Sons, 1981.
6. "Physics of semiconductors devices", J.P. and C.A. Colinge, Kluwer Academic Publishers, 2002.