

*LC-Meter*  
*Selfinduction and Capacity calculate device*



*Students:*

*Nick Konstantakis*  
*Vasilis Giokas*

*Chania 2005*



## *Prologue*

The LC-Meter is an electrical device, which can calculate with accuracy self induction and capacity. The circuit's principle operation is based on selfinduction or capacity's specifications in L-C circuit on strength of resonance's frequency.

The LC-Meter calculate automatically in compination with a micro-controller and a specialy PIC18F242.

The usage of LC-Meter is to calculate ellements( capacitors or coils) in high frequency circuit, for example in case we have to resonate an oscillator or an RF filter .

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	Σελίδα
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	6
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	7
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8

## ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ: Αρχές λειτουργίας

1.1. Αρχές μέτρησης.....	10
1.2. Μέτρηση με χρήση ταλαντωτή L-C.....	10
1.2.1. Βελτιστοποιημένη μέθοδος μέτρησης Χωρητικότητας με χρήση ταλαντωτή L-C.....	11
1.2.2. Βελτιστοποιημένη μέθοδος μέτρησης Αυτεπαγωγής με χρήση ταλαντωτή L-C.....	13
1.3. Μέτρηση χωρητικότητας με χρήση ασταθούς πολυδονητή.....	14
1.3.1. Βελτιστοποιημένη μέθοδος μέτρησης Χωρητικότητας με χρήση ασταθούς πολυδονητή.....	15

## ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ: Περιγραφή του κυκλώματος

2.1. Διάγραμμα βαθμίδων του LC-Meter.....	17
2.2. Ανάλυση κυκλώματος.....	18
2.2.1. Ταλαντωτής OSC-1.....	20
2.2.2. Ταλαντωτής OSC-2.....	22
2.2.3. Ταλαντωτής OSC-3.....	22
2.3. Πειραματικές μετρήσεις που σχετίζονται με τους ταλαντωτές.....	24

## ΜΕΡΟΣ ΤΡΙΤΟ: Περιγραφή του λογισμικού & του αλγόριθμου λειτουργίας

3.1. Διάγραμμα ροής του προγράμματος.....	28
3.2. Το πρόγραμμα.....	29
3.2.1. Ρουτίνα Main.....	30
3.2.2. Αλγόριθμος μέτρησης συχνότητας.....	34

## ΜΕΡΟΣ ΤΕΤΑΡΤΟ: Ακρίβεια και σφάλματα

4.1. Μέγιστη θεωρητική ακρίβεια στη μέτρηση αυτεπαγωγής.....	37
4.2. Μέγιστη θεωρητική ακρίβεια, μέτρησης χωρητικότητας στον OSC-2.....	37
4.3. Μέγιστη θεωρητική ακρίβεια, μέτρησης χωρητικότητας στον OSC-3.....	38
4.4. Εκτίμηση της πραγματικής ακρίβειας στην μέτρηση αυτεπαγωγής.....	39

4.5. Εκτίμηση της πραγματικής ακρίβειας στην μέτρηση χωρητικότητας στον OSC-2.....	40
4.6. Εκτίμηση της πραγματικής ακρίβειας στην μέτρηση χωρητικότητας στον OSC-3.....	42

**ΜΕΡΟΣ ΠΕΜΠΤΟ:** Τυπωμένο κύκλωμα και κατασκευή

5.1. Δημιουργία τυπωμένου κυκλώματος (Printed Circuit Board).....	45
5.2. Υλοποίηση του τυπωμένου κυκλώματος σε πλακέτα.....	45
5.3. Παράθεση διαφανειών για υλοποίηση κατασκευής.....	45

**ΜΕΡΟΣ ΕΚΤΟ:** Βαθμονόμηση της συσκευής

6.1. Τρόπος βαθμονόμησης του LC-Meter.....	47
6.2. Σχολιασμός του τρόπου βαθμονομήσεις.....	48

**ΜΕΡΟΣ ΕΒΔΟΜΟ:** Εγχειρίδιο χρήσης του LC-Meter

Εγχειρίδιο χρήσης.....	51
------------------------	----

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	55
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΔΙΣΚΟΥ.....	56

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Στον κ. Αδαμίδη Γεώργιο, εργαστηριακό καθηγητή του τμήματος Ηλεκτρονικής του ΤΕΙ Κρήτης (παράρτημα Χανίων), για την καθοδήγηση, την αμέριστη συμπαράσταση, την ανεκτίμητη βοήθεια που προσέφερε σε όλους τους τομείς, που ενέπνευσε την αρχική ιδέα και τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσε. Επίσης το ΤΕΙ Κρήτης (παράρτημα Χανίων) για την οικονομική υποστήριξη.

## Περίληψη

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ο σχεδιασμός, η κατασκευή και η βαθμονόμηση μιας ηλεκτρονικής συσκευής αυτοματοποιημένης μέτρησης χωρητικότητας και αυτεπαγωγής (LC-Meter) στο Εργαστήριο Μικροκυματικών Επικοινωνιών και Ηλεκτρομαγνητικών Εφαρμογών του Τ.Ε.Ι Κρήτης (παράρτημα Χανίων). Η προσπάθειά μας επικεντρώνεται στους παρακάτω στόχους:

- Υλοποίηση συσκευής μέτρησης της χωρητικότητας πυκνωτών οποιουδήποτε τύπου, με ταυτόχρονη δυνατότητα μέτρησης της αυτεπαγωγής πηνίων οποιουδήποτε τύπου, σε όσο το δυνατό ευρύτερη περιοχή τιμών και με όσο το δυνατό μεγαλύτερη ακρίβεια.
- Αυτοματοποιημένη μέτρηση με το πάτημα ενός πλήκτρου.
- Μικρό μέγεθος και βάρος συσκευής.
- Μικρό κόστος
- Απουσία μηχανικών μερών
- Απεικόνιση σε οθόνη χαρακτήρων τύπου υγρού κρυστάλλου (LCD).
- Χρήση μικροεπεξεργαστή για ακριβείς αριθμητικούς υπολογισμούς με χρήση αριθμών κινητής υποδιαστολής 32-bit (32 bit floating point number, representation according to IEEE 754 standard for single precision floats)

Η παρουσίαση της εργασίας γίνεται σε 7 ενότητες. Στην πρώτη ενότητα παρουσιάζονται οι γενικές αρχές λειτουργίας. Στην δεύτερη ενότητα το κύκλωμα με σύντομη θεωρητική ανάλυση. Στην τρίτη ενότητα παρουσιάζεται το λογισμικό που αναπτύξαμε για τον προγραμματισμό του μικροεπεξεργαστή που περιέχεται στην συσκευή. Στην τέταρτη ενότητα πραγματοποιούμε μια μικρή διερεύνηση για την ακρίβεια μέτρησης και τα σφάλματα μέτρησης της συσκευής. Στην πέμπτη ενότητα περιλαμβάνεται μία σύντομη παρουσίαση του τυπωμένου κυκλώματος (printed circuit board) καθώς και η διαδικασία κατασκευής. Στην έκτη ενότητα παρουσιάζεται η διαδικασία βαθμονόμησης της συσκευής (calibration), ενώ στην έβδομη ενότητα παραθέτουμε ένα σύντομο εγχειρίδιο χρήσης της συσκευής που αναπτύξαμε.

## Εισαγωγή

Τα διάφορα εξαρτήματα που κυκλοφορούν στο εμπόριο εμπεριέχουν ανοχές. Σε ορισμένες όμως περιπτώσεις χρειάζεται επακριβής γνώση της τιμής των εξαρτημάτων αυτών. Για παράδειγμα, σε όλους όσους ασχολούνται με ταλαντωτές ή με κατασκευές υψηλών συχνοτήτων, έχει παραστεί η ανάγκη για επακριβή γνώση της τιμής των πυκνωτών ή των πηνίων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στις κατασκευές προκειμένου να προβλεφτεί με ακρίβεια η συμπεριφορά που σχετίζεται με την κεντρική συχνότητα λειτουργίας, την συχνότητα συντονισμού ή ταλάντωσης, το εύρος ζώνης κ.λ.π. Επομένως γεννάται αυτομάτως το ερώτημα : «Είναι δυνατό να αναπτυχθεί μία μικρού κόστους συσκευή που να μπορεί να μετρήσει με ακρίβεια τιμές αυτεπαγωγής ή χωρητικότητας προκειμένου να σταθεί χρήσιμο εργαλείο για όλους αυτούς που ασχολούνται με κατασκευές ταλαντωτών και ραδιοκυκλωμάτων;»

Το ερώτημα αυτό απασχόλησε κι εμάς και στάθηκε το έναυσμα προκειμένου να ξεκινήσουμε το εγχείρημα μας. Μάλιστα, το ενδιαφέρον μας ενισχύθηκε επιπλέον όταν μάθαμε ότι υπήρχε άμεση ανάγκη για μια τέτοια συσκευή στα εργαστήρια του ΤΕΙ και ειδικότερα στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένου ηλεκτρομαγνητισμού όπως επίσης και στο Εργαστήριο Μικροκυματικών Επικοινωνιών και Ηλεκτρομαγνητικών Εφαρμογών.

Γνωρίζουμε φυσικά ότι αναμφίβολα μία γέφυρα whetstone είναι θεωρητικά ο ακριβέστερος τρόπος για την μέτρηση αντιστάσεων, πυκνωτών και πηνίων, ωστόσο στην πράξη οι περισσότερες εκδόσεις γέφυρας wheatstone που κυκλοφορούν στο εμπόριο προορίζονται αποκλειστικά για την μέτρηση αντιστάσεων ενώ ακόμη και κάποιες ειδικές εκδόσεις που προορίζονται για μέτρηση αυτεπαγωγής ή χωρητικότητας είναι εξαιρετικά δύσχρηστες και ογκώδεις και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως φορητές συσκευές. Επιπλέον, οι διατάξεις τύπου Γέφυρας wheatsone είναι μηχανικές διατάξεις που φθιρόνται εύκολα, κοστίζουν αρκετά και δεν παύουν να είναι λιγάκι «old fashion». Χωρίς να θέλουμε λοιπόν να προσβάλλουμε το κύριο «Wheatstone» και χωρίς να θέλουμε να αμφισβητήσουμε κατ' ουδεμίαν την αξιοπιστία του, θα θέλαμε απλώς να επισημάνουμε ότι καθότι η τεχνολογία έχει προχωρήσει λιγάκι κάναμε μία προσπάθεια να φτιάξουμε μία μοντέρνα-σύγχρονη, ελαφριά, φορητή, ακριβής και σχετικά χαμηλού κόστους συσκευή, πλήρως ηλεκτρονική (χωρίς μηχανικά μέρη). Ίσως να μην μπορέσουμε ποτέ να απαντήσουμε στο ερώτημα αν η δική μας συσκευή είναι καλύτερη από τη γέφυρα Wheatstone, πάντως το μόνο σίγουρο είναι ότι η δική μας μοντέρνα συσκευή απαιτεί μια «old fashion» γέφυρα wheatstone για την αρχική της βαθμονόμηση.



*ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ*  
*ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ*

## 1. 1 Αρχή μέτρησης

Η τιμή της αυτεπαγωγής ενός πηνίου καθώς και η τιμή της χωρητικότητας ενός πυκνωτή αποτελούν φυσικές ποσότητες που μπορούν να προσδιοριστούν έμμεσα από μετρήσεις παραμέτρων λειτουργίας κυκλωμάτων στα οποία εμπεριέχεται το άγνωστο στοιχείο (πυκνωτής ή πηνίο). Τέτοιου είδους παράμετροι, που μπορούν εύκολα να μετρηθούν, είναι το πλάτος και η συχνότητα κάποιου ηλεκτρικού σήματος. Εντούτοις η διαδικασία μέτρησης της συχνότητας κάποιου ηλεκτρικού σήματος είναι κάτι το οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί με εξαιρετική ακρίβεια και ευκολία από ένα ψηφιακό κύκλωμα και ειδικότερα από έναν μικρο-ελεγκτή, έναντι της διαδικασίας μέτρησης πλάτους κάποιου σήματος που εκ των πραγμάτων προϋποθέτει την διασύνδεση με τον αναλογικό κόσμο μέσω ADC (analog to digital converter).

Η συσκευή που προτείνουμε δομείται γύρω από έναν μικροελεγκτή και επομένως ο τρόπος μέτρησης που επιλέγεται είναι η « μέτρηση μέσω προσδιορισμού της συχνότητας λειτουργίας». Η «μετρούμενη συχνότητα» αναφέρεται στην συχνότητα λειτουργίας κάποιου ταλαντωτή στον οποίο εμπεριέχεται το άγνωστο εξάρτημα που επιθυμούμε να μετρήσουμε (πυκνωτής ή πηνίο). *Επομένως, ανάγουμε την μέτρηση αυτεπαγωγής ή χωρητικότητας κάποιου στοιχείου σε απλή μέτρηση συχνότητας.*

Ο «ταλαντωτής» δύναται να είναι τύπου συντονισμού L-C (παραλλήλου ή σειράς) ή ακόμη κάποιος τύπος ασταθή πολυδονητή. Αμέσως παρακάτω περιγράφεται ο τρόπος μέτρησης άγνωστου πηνίου ή πυκνωτή με χρήση ταλαντωτή παράλληλου συντονισμού τύπου L-C και με χρήση ασταθή πολυδονητή. Οι περιγραφόμενοι τρόποι μέτρησης, φυσικά δεν είναι και οι μοναδικοί. Παρόλο αυτό όμως, επιλέγουμε τους συγκεκριμένους, διότι κρίνουμε ότι ταιριάζουν κατά τον καλύτερο τρόπο στην δική μας εφαρμογή.

## 1. 2 Μέτρηση με χρήση ταλαντωτή L-C

Η συχνότητα λειτουργίας  $F$ , ενός ταλαντωτή συντονισμού L-C δίνεται από τη σχέση :

$$F = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (1)$$

Μετρώντας τη συχνότητα λειτουργίας του ταλαντωτή και επιλύοντας τη σχέση (1) μπορούμε να προσδιορίσουμε είτε το άγνωστο στοιχείο  $C$ , δεδομένου του  $L$  ή το άγνωστο στοιχείο  $L$ , δεδομένου του  $C$ . Στην πράξη, παρόλο που από μαθηματικής σκοπιάς όλα φαντάζουν ιδανικά, η παραπάνω μεθοδολογία δεν μπορεί να εφαρμοστεί κατευθείαν σε ένα πραγματικό κύκλωμα διότι εξαιτίας της στοχαστικής ολίσθησης συχνότητας που συμβαίνει σε κάθε πραγματικό ταλαντωτή L-C η μέτρηση δεν θα έχει επαναληψιμότητα. Η απροσδιοριστία στην συχνότητα, λόγω της ολίσθησης, συνιστά απροσδιοριστία στον υπολογισμό των στοιχείων  $L$  ή  $C$ , κάτι που αποτελεί πρόβλημα κυρίαρχα στην περίπτωση που επιθυμούμε να μετρήσουμε μικρής τιμής χωρητικότητα ή αυτεπαγωγή, που εγγίζει τα όρια της απροσδιοριστίας. Ένα κύκλωμα που θα κατασκευαζόταν προκειμένου να υλοποιήσει την παραπάνω μεθοδολογία μέτρησης θα ήταν πολύ ευάλωτο σε θερμοκρασιακές μεταβολές, σε μεταβολές της τάσης τροφοδοσίας, στην γήρανση των

στοιχείων του κυκλώματος και δεν θα είχε ικανοποιητική ακρίβεια σε περιοχή τιμών μέτρησης πλησίον του 0, ούτε επαναληψιμότητα στη μέτρηση.

Για παράδειγμα, σε συσκευή που θα είχε σχεδιαστεί έτσι ώστε να μετράει έναν άγνωστο πυκνωτή  $C_Y$  με βάση την μεθοδολογία της ενότητας 1.2, για δύο τυχούσες χρονικές στιγμές  $t_1$  και  $t_2$  θα ήταν

$$F(t_1) \neq F(t_2) \Rightarrow C(t_1) \neq C(t_2) \quad (2)$$

Όπου  $C(t_1)$  η μετρούμενη τιμή χωρητικότητας για τον πυκνωτή  $C_Y$  την στιγμή που η μέτρηση πραγματοποιείται σε χρόνο  $t_1$  και  $C(t_2)$  η μετρούμενη τιμή χωρητικότητας για τον πυκνωτή  $C_Y$  την στιγμή που η μέτρηση πραγματοποιείται σε χρόνο  $t_2$ .

Δηλαδή, η συσκευή για τον ίδιο άγνωστο πυκνωτή θα μετρούσε διαφορετική τιμή χωρητικότητας σε δύο τυχούσες χρονικές στιγμές (απουσία επαναληψιμότητας στη μέτρηση = απροσδιοριστία)

Καθόσον επιθυμούμε να φτιάξουμε μία συσκευή μέτρησης υψηλής ακρίβειας, επινοούμε βελτιστοποιημένη τροποποιημένη έκδοση της παραπάνω μεθοδολογίας που υπερνικά τα προαναφερθέντα προβλήματα.

### 1.2.1 Βελτιστοποιημένη μέθοδος μέτρησης χωρητικότητας με χρήση ταλαντωτή L-C

Σε ταλαντωτή L-C με στοιχεία L και  $C=C_{ref}$ , θεωρούμε ότι το στοιχείο  $C_{ref}$  είναι γνωστό. Εφαρμόζοντας την σχέση (1) βρίσκουμε ότι η συχνότητα λειτουργίας του ταλαντωτή F, είναι:

$$F = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C_{ref}}} \quad (3)$$

Αν υποθέσουμε ότι ένας άγνωστος πυκνωτής  $C_x$  συνδέεται παράλληλα με τον  $C_{ref}$ , η συχνότητα λειτουργίας του ταλαντωτή θα μεταβληθεί και θα λάβει την νέα τιμή  $F_x$ :

$$F_x = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot (C_{ref} + C_x)}} \quad (4)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις σχέσεις (3) (4) και επιλύοντας ως προς  $C_x$  βρίσκουμε:

$$C_x = C_{ref} \left( \frac{F^2}{F_x^2} - 1 \right) \quad (5)$$

Επομένως, μετρώντας τις συχνότητες F και  $F_x$  μπορούμε έμμεσα να προσδιορίσουμε την τιμή του άγνωστου πυκνωτή  $C_x$ . Η διαφορά της παραπάνω μεθόδου σε σχέση με αυτή που αναφέρθηκε στην ενότητα 1.2 έγκειται στο παρακάτω σημείο:

Φτιάχνοντας μία συσκευή που υλοποιεί την βελτιστοποιημένη μέθοδο χωρητικότητας μπορούμε να εξασφαλίσουμε επαναληψιμότητα στη μέτρηση και να εξαλείψουμε την απροσδιοριστία που οφείλεται σε ολίσθηση του ταλαντωτή με την προϋπόθεση οι μετρήσεις των  $F$  και  $F_x$  να γίνουν με ελάχιστη χρονική διαφορά ( η δεύτερη μέτρηση αμέσως μετά την πρώτη). Η εξήγηση παρατίθεται αμέσως παρακάτω:

Έστω  $F(t_1)$ ,  $F_x(t_1+\delta t)$  οι τιμές των  $F$  και  $F_x$  που μετρούνται σε χρονική στιγμή  $t_1$  με χρονική διαφορά  $\delta t$ , με απώτερο σκοπό τον προσδιορισμό της χωρητικότητας αγνώστου στοιχείου  $C_Y$  και  $F(t_2)$ ,  $F_x(t_2+\delta t)$  οι τιμές των  $F$  και  $F_x$  που μετρούνται για το ίδιο εξάρτημα  $C_Y$  σε χρονική στιγμή  $t_2$  με χρονική διαφορά επίσης  $\delta t$ , στον ίδιο πάντοτε ταλαντωτή. Αν κατά το χρονικό διάστημα  $t_2 - t_1$  ο ο ταλαντωτής ολισθήσει κατά ποσοστό  $A\%$  τότε θα ισχύουν οι σχέσεις:

$$F(t_2) = F(t_1) \cdot A\% \quad (6)$$

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} [F_x(t_2 + \delta t)] = F_x(t_1 + \delta t) \cdot A\% \quad (7)$$

Επομένως για τυχόν  $C_Y$  και όταν  $\delta t \rightarrow 0$ :

$$\frac{F(t_2)}{F_x(t_2 + \delta t)} = \frac{F(t_1) \cdot A\%}{F_x(t_1 + \delta t) \cdot A\%} = \frac{F(t_1)}{F_x(t_1 + \delta t)} = \text{σταθ. για κάθε ζεύγος } t_1, t_2 \quad (8)$$

Συνδυάζοντας την σχέση (8) με τη σχέση (5) βρίσκουμε ότι για  $\delta t \rightarrow 0$  :

$$C_X(t_2) = C_X(t_1) = C_X \text{ για κάθε } t_1, t_2 \quad (9)$$

Που σημαίνει ότι η συσκευή μέτρησης που υλοποιεί την βελτιστοποιημένη μέθοδο μέτρησης, μετρώντας τυχόν άγνωστο εξάρτημα  $C_Y$  θα υπολογίζει πάντοτε την τιμή χωρητικότητας  $C_X$  ανεξάρτητα από την χρονική στιγμή της μέτρησης και την ολίσθηση του ταλαντωτή, αρκεί  $\delta t \rightarrow 0$  ( δηλαδή επιτυγχάνεται μέτρηση με επαναληψιμότητα και ανεξάρτητα της ολίσθησης του ταλαντωτή).

### 1.2.2 Βελτιστοποιημένη μέθοδος μέτρησης αυτεπαγωγής με χρήση ταλαντωτή L-C

Σε ταλαντωτή L-C με στοιχεία C και  $L=L_{ref}$ , θεωρούμε ότι το στοιχείο  $L_{ref}$  είναι γνωστό. Εφαρμόζοντας την σχέση (1) βρίσκουμε ότι η συχνότητα λειτουργίας του ταλαντωτή F, είναι:

$$F = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{ref} \cdot C}} \quad (10)$$

Αν υποθέσουμε ότι ένα άγνωστο πηνίο  $L_x$  συνδέεται σε σειρά με το  $L_{ref}$  και δίχως να παρουσιάζει μαγνητική σύζευξη με αυτό, η συχνότητα λειτουργίας του ταλαντωτή θα μεταβληθεί και θα λάβει την νέα τιμή  $F_x$ :

$$F_x = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{C \cdot (L_{ref} + L_x)}} \quad (11)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις σχέσεις (3) (4) και επιλύοντας ως προς  $L_x$  βρίσκουμε:

$$L_x = L_{ref} \left( \frac{F^2}{F_x^2} - 1 \right) \quad (12)$$

Επομένως, μετρώντας τις συχνότητες F και  $F_x$  μπορούμε έμμεσα να προσδιορίσουμε την τιμή αυτεπαγωγής του άγνωστου πηνίου  $L_x$ , τη στιγμή που αυτό παρουσιάζει μηδενική μαγνητική σύζευξη με το  $L_{ref}$ . Σύμφωνα με τον συλλογισμό που αποδείξαμε στην παράγραφο 1.2.1 (σχέσεις (6) (7) (8) (9)), έτσι κι εδώ αποδεικνύεται με βάση τις σχέσεις (13) (14) (15) και (16) ότι :

*Φτιάχνοντας μία συσκευή που υλοποιεί την βελτιστοποιημένη μέθοδο μέτρησης αυτεπαγωγής μπορούμε να εξασφαλίσουμε επαναληψιμότητα στη μέτρηση και να εξαλείψουμε την απροσδιοριστία που οφείλεται σε ολίσθηση του ταλαντωτή με την προϋπόθεση οι μετρήσεις των F και  $F_x$  να γίνουν με ελάχιστη χρονική διαφορά ( η δεύτερη μέτρηση αμέσως μετά την πρώτη).*

Απόδειξη: Έστω  $F(t_1)$ ,  $F_x(t_1+\delta t)$  οι τιμές των F και  $F_x$  που μετρούνται σε χρονική στιγμή  $t_1$  με χρονική διαφορά  $\delta t$ , με απώτερο σκοπό τον προσδιορισμό της αυτεπαγωγής αγνώστου στοιχείου  $L_Y$  και  $F(t_2)$ ,  $F_x(t_2+\delta t)$  οι τιμές των F και  $F_x$  που μετρούνται για το ίδιο εξάρτημα  $L_Y$  σε χρονική στιγμή  $t_2$  με χρονική διαφορά επίσης  $\delta t$ , στον ίδιο πάντοτε ταλαντωτή. Αν κατά το χρονικό διάστημα  $(t_2 - t_1)$  ο ο ταλαντωτής ολισθήσει κατά ποσοστό A% τότε θα ισχύουν οι σχέσεις:

$$F(t_2) = F(t_1) \cdot A\% \quad (13)$$

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} [F_x(t_2 + \delta t)] = F_x(t_1 + \delta t) \cdot A\% \quad (14)$$

Επομένως για τυχόν  $L_Y$  και όταν  $\delta t \rightarrow 0$ :

$$\frac{F(t_2)}{F_x(t_2 + \delta t)} = \frac{F(t_1) \cdot A\%}{F_x(t_1 + \delta t) \cdot A\%} = \frac{F(t_1)}{F_x(t_1 + \delta t)} = \text{σταθ. για κάθε ζεύγος } t_1, t_2 \quad (15)$$

Συνδυάζοντας την σχέση (15) με τη σχέση (12) βρίσκουμε ότι για  $\delta t \rightarrow 0$  :

$$L_x(t_2) = L_x(t_1) = L_x \text{ για κάθε } t_1, t_2 \quad (16)$$

Που σημαίνει ότι η συσκευή μέτρησης που υλοποιεί την βελτιστοποιημένη μέθοδο μέτρησης, μετρώντας τυχόν άγνωστο εξάρτημα  $L_x$  θα υπολογίζει πάντοτε την τιμή χωρητικότητας  $L_x$  ανεξάρτητα από την χρονική στιγμή της μέτρησης και την ολίσθηση του ταλαντωτή, αρκεί  $\delta t \rightarrow 0$  ( δηλαδή επιτυγχάνεται μέτρηση με επαναληψιμότητα και ανεξάρτητα της ολίσθησης του ταλαντωτή).

### 1.3 Μέτρηση χωρητικότητας με χρήση ασταθούς πολυδονητή

Η συχνότητα  $F$  λειτουργίας ασταθούς πολυδονητή δίνεται από μία σχέση της μορφής:

$$F = f(R_1, R_2, \dots, R_n, C_1, C_2, \dots, C_k) \quad (17)$$

Όπου  $R_1, R_2, \dots, R_n$ , ωμικές αντιστάσεις και  $C_1, C_2, \dots, C_k$ , οι πυκνωτές στο κύκλωμα του ασταθούς πολυδονητή. Η μορφή της συνάρτησης  $f$ , καθώς επίσης το πλήθος των ωμικών αντιστάσεων ( $n$ ) καθώς και το πλήθος ( $k$ ) των πυκνωτών ποικίλει από κύκλωμα σε κύκλωμα.

Θεωρητικά, αν μετρήσουμε την συχνότητα λειτουργίας του ταλαντωτή και δεδομένων των  $R_1, R_2, \dots, R_n$  και των  $C_1, C_2, \dots, C_{k-1}$  μπορούμε να προσδιορίσουμε την τιμή τυχόν αγνώστου πυκνωτή που θα τοποθετηθεί στην θέση του  $C_k$ . Στην πράξη όμως κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό διότι προϋποθέτει την γνώση αρκετών στοιχείων του κυκλώματος που ενδέχεται να «υποφέρουν» από θερμοκρασιακές ανοχές.

Προκειμένου να απλοποιήσουμε κάπως τα πράγματα, μπορούμε να επιλέξουμε την υλοποίηση ενός ασταθούς πολυδονητή με τον ελάχιστο δυνατό αριθμό στοιχείων  $R$  και  $C$ . Για παράδειγμα, μπορούμε να επιλέξουμε έναν ασταθή πολυδονητή που υλοποιείται με δύο αντιστάσεις και έναν πυκνωτή. Ένας τέτοιος ασταθής πολυδονητής μπορεί να υλοποιηθεί πολύ εύκολα κάνοντας χρήση του πασίγνωστου ολοκληρωμένου κυκλώματος 555 και η λειτουργία του διέπεται από σχέση της μορφής:

$$F = f(R_1, R_2, C) = \frac{1}{X \cdot (Y \cdot R_1 + Z \cdot R_2) \cdot C} \quad (18)$$

Όπου  $X, Y, Z$  σταθερές.

Χρησιμοποιώντας τη σχέση (18), και πραγματοποιώντας μία μέτρηση της συχνότητας  $F$  του ασταθούς πολυδονητή τύπου 555, μπορούμε εύκολα λύνοντας την σχέση (18) να υπολογίσουμε την τιμή αγνώστου πυκνωτή που θα τοποθετηθεί στην θέση του  $C$ , δεδομένων των  $R_1$  και  $R_2$ . Στην πράξη, παρόλο που από μαθηματικής απόψεως όλα φαντάζουν ιδανικά, η παραπάνω μεθοδολογία δεν μπορεί να εφαρμοστεί κατευθείαν σε ένα

πραγματικό κύκλωμα ασταθή πολυδονητή εξαιτίας και πάλι της στοχαστικής ολίσθησης συχνότητας που συμβαίνει σε κάθε πραγματικό ταλαντωτή, όπως ακριβώς έχει περιγραφεί στην ενότητα 1.2. Η θερμική ολίσθηση της συχνότητας του ταλαντωτή θα καθιστούσε τη μέτρηση μη – επαναλήψιμη και θα εισήγαγε και πάλι μία απροσδιοριστία, σύμφωνα με αυτά που έχουν ειπωθεί στην ενότητα 1.2.

Προκειμένου να καταστήσουμε την διαδικασία της μέτρησης ανεξάρτητη από τη θερμική ολίσθηση του ταλαντωτή, επινοούμε μια βελτιστοποιημένη μεθοδολογία μέτρησης. Η μεθοδολογία αυτή περιγράφεται αμέσως παρακάτω.

### 1.3.1 Βελτιστοποιημένη μέθοδος μέτρησης χωρητικότητας με χρήση ασταθούς πολυδονητή τύπου 555.

Σε ασταθή πολυδονητή τύπου 555 με στοιχεία  $R_1$ ,  $R_2$  και  $C=C_{ref}$ , θεωρούμε ότι το στοιχείο  $C_{ref}$  είναι γνωστό. Εφαρμόζοντας την σχέση (18) βρίσκουμε ότι η συχνότητα λειτουργίας του ταλαντωτή  $F$ , είναι:

$$F = f(R_1, R_2, C) = \frac{1}{X \cdot (Y \cdot R_1 + Z \cdot R_2) \cdot C_{ref}} \quad (19)$$

Αν υποθέσουμε ότι ένας άγνωστος πυκνωτής  $C_x$  συνδέεται παράλληλα με τον  $C_{ref}$ , η συχνότητα λειτουργίας του ταλαντωτή θα μεταβληθεί και θα λάβει την νέα τιμή  $F_x$ :

$$F_x = \frac{1}{X \cdot (Y \cdot R_1 + Z \cdot R_2) \cdot (C_{ref} + C_x)} \quad (20)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις σχέσεις (12) (13) και επιλύοντας ως προς  $C_x$  βρίσκουμε:

$$C_x = C_{ref} \left( \frac{F}{F_x} - 1 \right) \quad (21)$$

Επομένως, μετρώντας τις συχνότητες  $F$  και  $F_x$ , είμαστε σε θέση από τον λόγο  $F/F_x$  να υπολογίσουμε την άγνωστη χωρητικότητα  $C_x$ .

Κατά παρόμοιο συλλογισμό με αυτόν που ειπώθηκε στην παράγραφο 1.2.1 (σχέσεις 6, 7,8 και 9), φτιάχνοντας μία συσκευή που υλοποιεί την παραπάνω μέθοδο μέτρησης χωρητικότητας με χρήση ασταθούς πολυδονητή τύπου 555, μπορούμε να εξασφαλίσουμε επαναληψιμότητα στη μέτρηση και να εξαλείψουμε την απροσδιοριστία που οφείλεται σε ολίσθηση του ταλαντωτή, με την προϋπόθεση οι μετρήσεις των  $F$  και  $F_x$  να γίνουν με ελάχιστη χρονική διαφορά ( η δεύτερη μέτρηση αμέσως μετά την πρώτη).

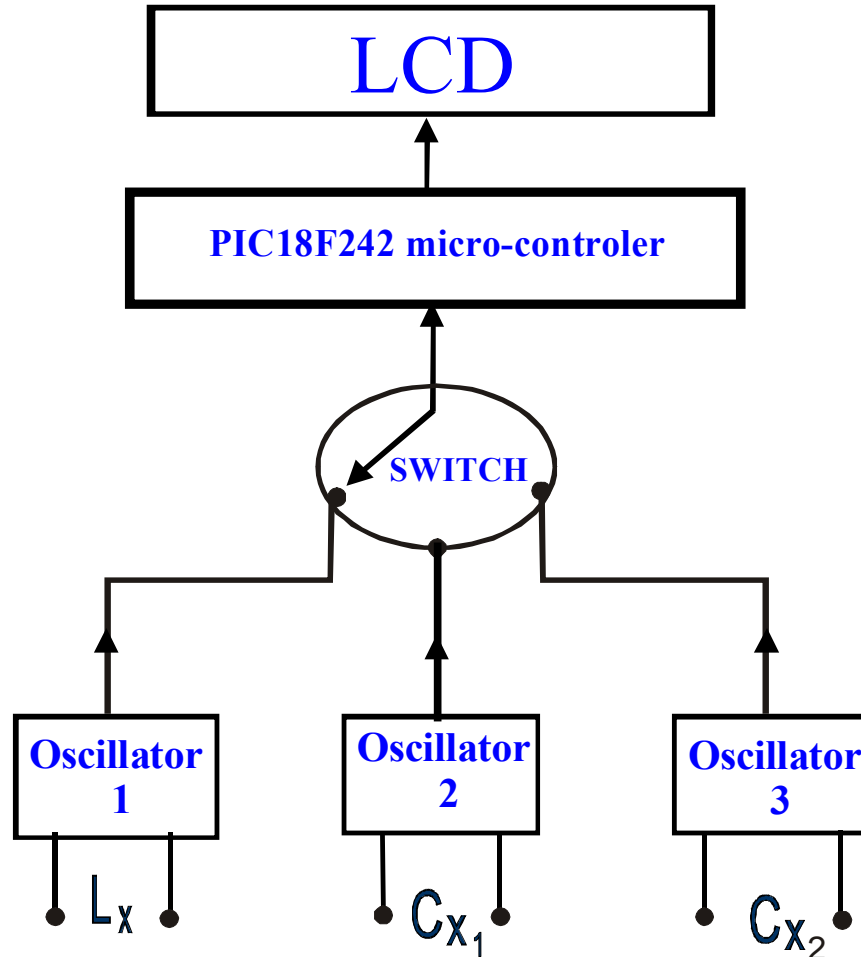
*ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ*

**Περιγραφή του κυκλώματος**



## 2.1) Διάγραμμα βαθμίδων του LC-Meter

Στο σχήμα 1 εικονίζεται το απλοποιημένο διάγραμμα βαθμίδων (block diagram) της συσκευής μας.



Σχήμα 1.  
(Απλοποιημένο διάγραμμα βαθμίδων της συσκευής)

Χρησιμοποιούμε μια οθόνη υγρού κρυστάλλου συμβατή με το HD44780 της Hitachi (HD 44780 based, Character-LCD) η οποία τροφοδοτείται με τάση 5V και είναι τύπου 2X16, δηλαδή δυνατότητας απεικόνισης 2 γραμμών με 16 χαρακτήρες ανά γραμμή. Στην οθόνη απεικονίζονται οι μετρούμενες τιμές αυτεπαγωγής ή χωρητικότητας των στοιχείων που συνδέονται στους ακροδέκτες  $L_x$ ,  $C_{x1}$  και  $C_{x2}$ , καθώς και κάποια βοηθητικά μηνύματα. Η διασύνδεση της οθόνης με τον επεξεργαστή γίνεται διαμέσου ενός διαύλου δεδομένων 4bit. Η συγκεκριμένη οθόνη είναι δυνατό να οδηγηθεί είτε διαμέσου interface 4<sup>bit</sup> είτε διαμέσου interface 8 bit. Στο κύκλωμα μας χρησιμοποιούμε την πρώτη περίπτωση. Η LCD συνδέεται στην Θύρα B (port B) του μικροεπεξεργαστή.[1]

Χρησιμοποιούμε έναν RISC (reduced instruction set computer), ανώτερης κλάσης, 8bit μικροεπεξεργαστή τύπου PIC, της Microchip. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούμε τον PIC18F242. Ο μικροεπεξεργαστής αυτός, παρόλο που είναι 8bit, περιέχει εσωτερικά του έναν 16bit ασύγχρονο counter πλήρως ελεγχόμενο μέσω software[2]. Ο ασύγχρονος counter του

μικροεπεξεργαστή συνδέεται διαμέσου μεταγωγού σε τρεις ταλαντωτές, τους Oscillator 1, Oscillator 2 και Oscillator 3. Ο 1<sup>ος</sup> και ο 2<sup>ος</sup> ταλαντωτής είναι τύπου L-C και χρησιμοποιούνται για μέτρηση πηνίων και πυκνωτών, αντίστοιχα.

Τα άγνωστα πηνία που θέλουμε να μετρήσουμε προσαρμόζονται στους τερματικούς ακροδέκτες  $L_x$ , ενώ οι άγνωστοι πυκνωτές στους τερματικούς ακροδέκτες  $C_{x1}$  ή  $C_{x2}$ .

## 2.2) Ανάλυση του κυκλώματος

Στο σχήμα 2, παρατίθεται το ηλεκτρονικό σχέδιο του κυκλώματος. Με αναφορά λοιπόν το σχήμα 2, παραθέτουμε σύντομη ανάλυση :

Το κύκλωμά μας μπορεί να τροφοδοτηθεί από 7,5 έως 12V από μπαταρία ή τροφοδοτικό δίχως μεγάλες ανάγκες σταθεροποίησης διότι έχουμε προβλέψει η σταθεροποίηση να γίνεται εντός του κυκλώματός μας. Σε σειρά με την τροφοδοσία υπάρχει μια δίοδος προστασίας η οποία προστατεύει το κύκλωμα από τυχόν ανάστροφη σύνδεση της πηγής (μπαταρίας ή τροφοδοτικού). Μετά τη δίοδο προστασίας χρησιμοποιούμε ένα σταθεροποιητή τάσης τύπου 7805 για σταθεροποίηση της τάσης τροφοδοσίας στην τιμή των 5V. Η σταθεροποίηση είναι απαραίτητη προκειμένου να αποτρέψουμε ενδεχόμενη αστάθεια των ταλαντωτών. Επιπλέον, ο κατασκευαστής του Display [3], δίδει ονομαστική τιμή λειτουργίας 5V με εξαιρετικά περιορισμένα όρια ανοχής.

Ο μεταγωγός στο κύκλωμα είναι 4ων θέσεων-15 ακροδεκτών και χρησιμεύει για να μετάγει τη συσκευή από κατάσταση Off σε κατάσταση μέτρησης αυτεπαγωγής στον ταλαντωτή 1, κατάσταση μέτρησης χωρητικότητας στον ταλαντωτή 2 ή κατάσταση μέτρησης χωρητικότητας στον ταλαντωτή 3. Στην πρώτη θέση του μεταγωγού (θέση A) δεν έχουμε συνδέσει τίποτα, με σκοπό η θέση αυτή να χρησιμεύει για την απενεργοποίηση της συσκευής (κατάσταση off). Στις υπόλοιπες θέσεις B,C και D, ο μεταγωγός πραγματοποιεί τα παρακάτω:

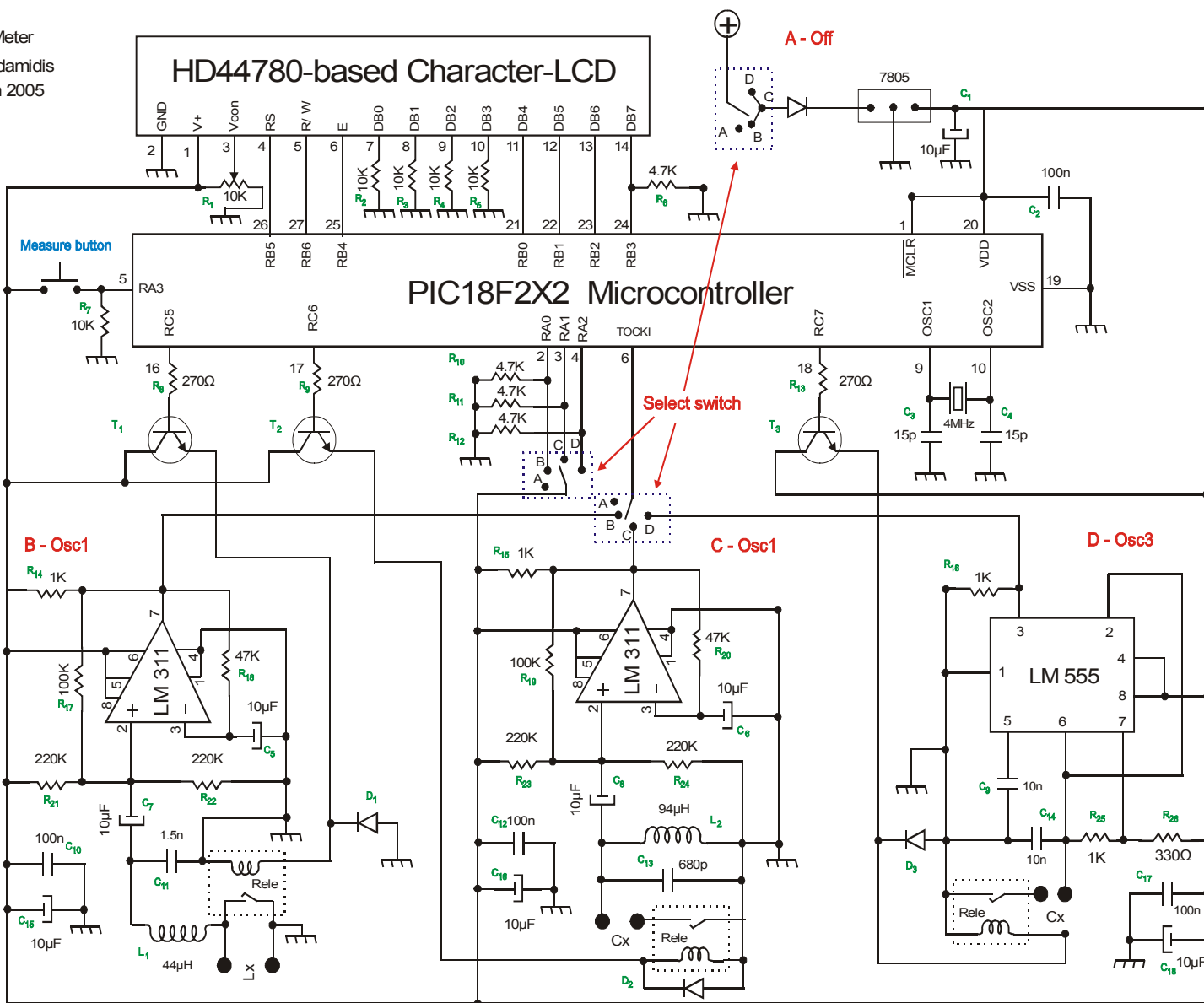
- Συνδέει την τροφοδοσία στο κύκλωμα.
- Συνδέει στον pin 6 (Tocki) του μικρο- επεξεργαστή στους ταλαντωτές 1,2 ή 3, αντίστοιχα. Το pin 6 (Tocki) του μικρο- επεξεργαστή αποτελεί το pin εισόδου του εσωτερικού ασύγχρονου 16bit μετρητή (counter).
- Συνδέει τα pin 2 (RA0), 3 (RA1), ή 4 (RA2) της A- θύρας δεδομένων του μικρο-επεξεργαστή σε λογικό επίπεδο on, αντίστοιχα. Ο μικροεπεξεργαστής, ελέγχοντας την λογική κατάσταση στην οποία βρίσκονται τα pins 2,3 και 4, διαπιστώνει ανά πάσα στιγμή σε ποια θέση (B,C, ή D) βρίσκεται ο μεταγωγός.

Ο κρύσταλλος των 4MHz χρονίζει με ακρίβεια τον μικροεπεξεργαστή. Χρησιμοποιούμε κρύσταλλο απαραίτητα, διότι η ακριβής μέτρηση της συχνότητας των ταλαντωτών προϋποθέτει την ύπαρξη ακριβή χρονισμού.

Τα τρανζίστορ στο κύκλωμα χρησιμεύουν ως διακόπτες για την οδήγηση τριών ηλεκτρονόμων (rele). Ο μικροεπεξεργαστής οδηγεί την βάση των τρανζίστορ μέσω των io- pin 16,17 και 18 προκειμένου ανοιγοκλείνοντας τους ηλεκτρονόμους να συνδέει ή να αποσυνδέει τα προς μέτρηση στοιχεία στους τερματικούς ακροδέκτες  $L_x$ ,  $C_{x1}$  και  $C_{x2}$  με τους ταλαντωτές – κάτι που

L-C Meter  
 By G. Adamidis  
 March 2005

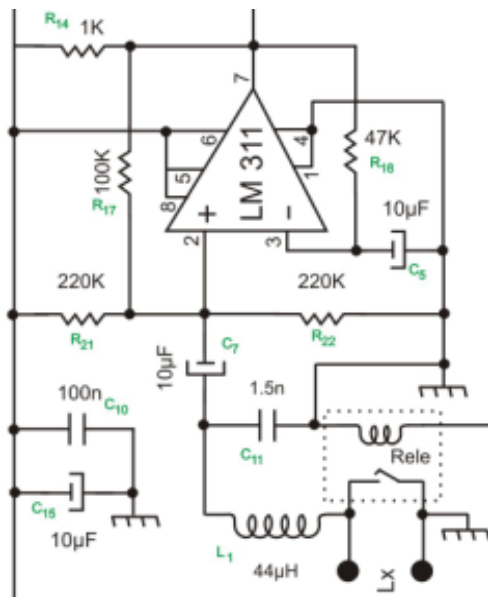
Σχήμα 2.  
 (Ηλεκτρονικό σχέδιο του L-C meter)



Κρίνεται απαραίτητο σύμφωνα με την μεθοδολογία μέτρησης που έχουμε επιλέξει.

### 2.2.1 Ταλαντωτής OSC-1

Ο 1<sup>ος</sup> ταλαντωτής χρησιμοποιείται για την μέτρηση αγνώστων αυτεπαγωγών που συνδέονται στους τερματικούς ακροδέκτες  $L_x$ . Ο



συγκεκριμένος ταλαντωτής αναφέρεται σε φυλλάδιο πληροφοριών του ολοκληρωμένου LM 311 της National Semiconductor [4]. Η συχνότητα λειτουργίας του, διέπεται από τη σχέση (1) με  $L=L_1+L_x$  και  $C=C_{11}$ , ή  $L=L_1$  και  $C=C_{11}$ , αναλόγως της κατάστασης του ηλεκτρονόμου. Η συγκεκριμένη τοπολογία προσφέρει επιπλέον τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Δυνατότητα λειτουργίας σε μεγάλη περιοχή συχνοτήτων.
- Παραγωγή τετραγωνικής κυματομορφής σε στάθμη TTL.
- Ελάχιστη πολυπλοκότητα και μικρό μέγεθος.

Ο συγκεκριμένος ταλαντωτής παρότι είναι τύπου L-C, δεν ανήκει σε καμία από τις γνωστές κατηγορίες colpitts, hartley. Θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ένας «συντονισμένος ασταθής πολυδονητής». Η λειτουργία του, συνοπτικά, έχει ως εξής:

Τα στοιχεία  $R_{18}$ ,  $C_5$ ,  $R_{14}$ ,  $R_{21}$  και  $R_{22}$  χρησιμοποιούνται για την πόλωση του τελεστικού ενισχυτή LM 311, έτσι ώστε αυτός να λειτουργεί ως συγκριτής με κατώφλι στα 2,5V (η τάση στην μη αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού βρίσκεται κοντά στα 2.5V, δεδομένου του διαιρέτη τάσης  $R_{21}$  και  $R_{22}$ ).

Κατά την στιγμή της έναρξης του ταλαντωτή, η έξοδος του τελεστικού βρίσκεται στον θετικό κόρο, τη στιγμή που ο πυκνωτής  $C_5$  είναι αφόρτιστος. Ο  $C_5$  ξεκινά να φορτίζεται μέσω της αντίστασης  $R_{18}$  έως ότου η τάση στα άκρα του, γίνει ίση με την τάση στην μη αναστρέφουσα είσοδο του συγκριτή (2,5V). Τότε ο συγκριτής αλλάζει κατάσταση οριακά και μεταπίπτει στον αρνητικό κόρο. Η απότομη αλλαγή της κατάστασης του συγκριτή από τον θετικό στον αρνητικό κόρο διεγείρει το συντονισμένο κύκλωμα L-C μέσω της αντίστασης  $R_{17}$  και τον αναγκάζει να «ηχήσει» (ringing) στη συχνότητα συντονισμού του. Η παροδική κυματομορφή (ringing) που γεννάται από το κύκλωμα LC στη συχνότητα συντονισμού του, προστίθεται στην DC στάθμη των 2.5V της μη αναστρέφουσας εισόδου του συγκριτή και αναγκάζει τον συγκριτή σε αλλαγή κατάστασης από τον αρνητικό στον θετικό κόρο. Η νέα απότομη αλλαγή κατάστασης από τον αρνητικό στον θετικό κόρο προκαλεί ένα νέο «ringing» του συντονισμένου κυκλώματος L-C που αναγκάζει εκ νέου τον συγκριτή σε αλλαγή κατάστασης. Το φαινόμενο συνεχίζεται επ' άπειρο με περιοδικότητα που αντιστοιχεί στην συχνότητα συντονισμού του κυκλώματος L-C. Κατά αυτόν τον τρόπο το κύκλωμα λειτουργεί ως ταλαντωτής L-C τετραγωνικής κυματομορφής ανάμεσα στις στάθμες του θετικού και του αρνητικού κόρου που παρεμπιπτόντως, για το συγκεκριμένο κύκλωμα, αντιστοιχούν σε λογικές στάθμες TTL.

Πέρα από την παραπάνω περιγραφική ανάλυση, η συχνότητα λειτουργίας του παραπάνω ταλαντωτή μπορεί να υπολογιστεί και μαθηματικά με εφαρμογή του κριτηρίου ταλάντωσης του “Barkhausen”, ως παρακάτω[5]:

Ο θετικός βρόχος ανάδρασης του ταλαντωτή σχηματίζεται από τα στοιχεία  $R_{17}$ ,  $C_7$ ,  $C_{11}$  και  $L$  (όπου  $L=L_1$  ή  $L_1+L_x$ , αναλόγως της κατάστασης του ηλεκτρονόμου). Θεωρώντας ως είσοδο του βρόχου ανάδρασης το pin 7 του συγκριτή (pin εξόδου του τελεστικού) και ως έξοδο του βρόχου ανάδρασης το pin 2 του συγκριτή (μη αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού), μπορούμε να βρούμε τη συνάρτηση μεταφοράς του βρόχου ανάδρασης  $H(F)$  που είναι:

$$H(F) = \frac{u_2}{u_7} = \frac{R_{\alpha\pi} + Z_1 + Z_2 // Z_3}{R_{17} + (Z_1 + Z_2 // Z_3)} \quad (22)$$

Όπου  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  η μιγαδική αντίσταση των στοιχείων  $C_7$ ,  $L$  και  $C_{11}$  αντίστοιχα. Όπου  $R_{\alpha\pi}$  μια ωμική αντίσταση απωλειών που θεωρούμε ότι βρίσκεται σε σειρά με τον  $C_7$ .

Δεδομένου ότι ο τελεστικός ενισχυτής έχει πραγματική απολαβή  $A$ , προκειμένου να έχουμε ταλαντώσεις θα πρέπει η συνάρτηση μεταφοράς  $H(F)$  του δικτύματος ανάδρασης να είναι πραγματική (φανταστικό μέρος μηδέν). Αυτό συμβαίνει μόνο όταν  $Z_1 + Z_2 // Z_3 \rightarrow 0$  δηλαδή όταν :

$$Z_1 + Z_2 // Z_3 = \frac{1}{i \cdot 2 \cdot \pi \cdot F} \left( \frac{1}{C_7} + \frac{1}{\frac{C}{L} (2 \cdot \pi \cdot F \cdot L - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{11}})} \right) \rightarrow 0 \quad (23)$$

$$\text{Η σχέση (27) αληθεύει όταν } C_7 \rightarrow \infty \text{ και } (2 \cdot \pi \cdot F \cdot L - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{11}}) = 0 \quad (24)$$

Η σχέση (24) μεταπίπτει περαιτέρω σε  $F = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C_{11}}}$ , που είναι

ισοδύναμη με την σχέση (1) και δίνει την συχνότητα λειτουργίας του ταλαντωτή με την προϋπόθεση  $C_7 \rightarrow \infty$  - (δηλαδή ο  $C_7$  πρέπει να επιλεγεί να έχει όσο το δυνατό μεγαλύτερη τιμή για να δρα ως πυκνωτής σύζευξης).

### 2.2.2) Ταλαντωτής OSC-2

Ο 2<sup>ος</sup> ταλαντωτής χρησιμοποιείται για την μέτρηση αγνώστων πυκνωτών που συνδέονται στους τερματικούς ακροδέκτες C<sub>x1</sub>. Ο συγκεκριμένος ταλαντωτής είναι ουσιαστικά όμοιος με τον OSC-1 που περιγράφηκε στην ενότητα 2.2.1. Η συχνότητα λειτουργίας του, διέπεται από τη σχέση (1) με  $L=L_2$  και  $C=C_{13}$ , ή  $L=L_2$  και  $C=C_{13}+C_x$  αναλόγως της κατάστασης του ηλεκτρονόμου. Παρόλο που ο OSC-2 είναι ουσιαστικά όμοιος με τον OSC-1, οι τιμές των εξαρτημάτων του διαφέρουν από τον OSC-2. Αυτό είναι αναγκαίο για τους παρακάτω λόγους:

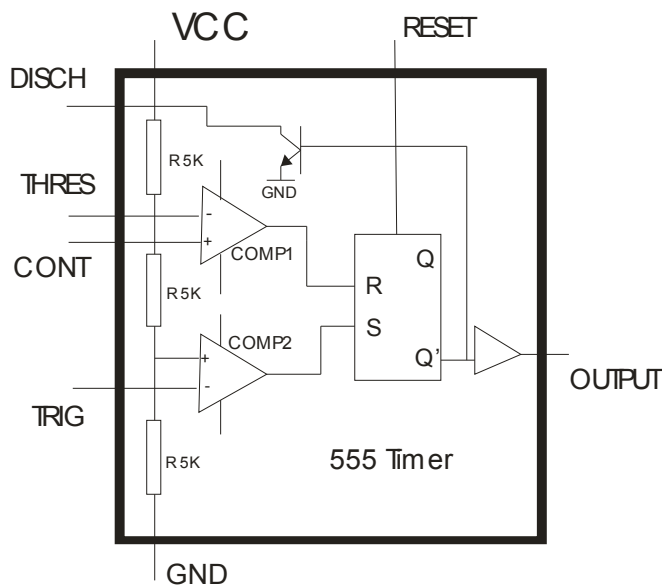
- Ο OSC-1 και ο OSC-2 έχουν βελτιστοποιηθεί για μέγιστη σταθερότητα στην ίδια περιοχή συχνοτήτων (από μερικές δεκάδες KHz – έως 655, 532 KHz περίπου). Ο περιορισμός για τη ελάχιστη συχνότητα λειτουργίας τους προέρχεται από το ίδιο το κύκλωμα ( οι ταλαντωτές L-C παρουσιάζουν αστάθεια στις χαμηλές συχνότητες όπου ο παράγοντας ποιότητας του συντονισμένου κυκλώματος L-C τείνει στο μηδέν) , ενώ ο περιορισμός για την μέγιστη συχνότητα λειτουργίας προέρχεται από τον counter του επεξεργαστή (σε συχνότητα μεγαλύτερη από 655,32 KHz, ο 16-bit counter υπερχειλίζει σε λιγότερο από 0.1sec).
- Προκειμένου τώρα να έχουμε ακρίβεια στη μέτρηση άγνωστων αυτεπαγωγών και πυκνωτών, και για λόγους που έχουν να κάνουν με τον αλγόριθμο μέτρησης και την διακριτική ικανότητα του counter (16 bit) θα πρέπει να επιλέξουμε όσο το δυνατό μικρότερη τιμή για το στοιχείο αναφοράς (reference element) που υπάρχει σε κάθε ταλαντωτή. Το στοιχείο αναφοράς στον πρώτο ταλαντωτή είναι το L<sub>1</sub> , ενώ στον δεύτερο ταλαντωτή ο C<sub>13</sub>. Επομένως στον πρώτο ταλαντωτή πρέπει να έχουμε μικρή τιμή αυτεπαγωγής στο πηνίο αναφοράς L<sub>1</sub> και μεγάλη τιμή χωρητικότητας στον πυκνωτή C<sub>11</sub>, ενώ αντιθέτως στον δεύτερο ταλαντωτή πρέπει να έχουμε μικρή τιμή χωρητικότητας για τον πυκνωτή αναφοράς C<sub>13</sub> και μεγάλη τιμή αυτεπαγωγής για το πηνίο L<sub>2</sub> (προκειμένου να έχουμε παράλληλα, τόσο ακρίβεια στη μέτρηση, όσο και λειτουργία στην ίδια περιοχή συχνοτήτων) .

### 2.2.3) Ταλαντωτής OSC –3

Ο ταλαντωτής OSC – 3 δομείται γύρω από το ολοκληρωμένο 555. Είναι ένας ασταθής πολυδονητής που μπορεί να λειτουργεί με ακρίβεια ακόμη και σε εξαιρετικά χαμηλές συχνότητες (μικρότερες ακόμη και από ένα Hz) στις οποίες οι ταλαντωτές L-C αδυνατούν να λειτουργήσουν. Κρίναμε απαραίτητη την ύπαρξη του OSC-3 στην συσκευή μας, προκειμένου αυτή να μπορεί να μετρήσει με ακρίβεια πυκνωτές μεγάλης χωρητικότητας – κάτι που είναι αδύνατο να γίνει στον OSC-2

Το ολοκληρωμένο 555 ανήκει στην μικρή οικογένεια των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων τύπου «timers» (χρονιστές). Οι χρονιστές είναι ολοκληρωμένα κυκλώματα ειδικά σχεδιασμένα ώστε με ένα ελάχιστο αριθμό εξωτερικών στοιχείων να είναι δυνατή η υλοποίηση κυκλωμάτων μονοσταθών

και ασταθών πολυδονητών. Ιστορικό και αρκετά δημοφιλές μέλος της οικογένειας αυτής είναι και ο χρονιστής 555. Παρουσιάστηκε το 1972 από signetics και από τότε έχει χρησιμοποιηθεί σε αναρίθμητες εφαρμογές



Σχήμα 3

***Το βασικό δομικό διάγραμμα του χρονιστή 555:***

Το βασικό χρονικό διάγραμμα του χρονιστή 555 φαίνεται στο σχήμα 3. Σε αυτό περιλαμβάνονται:

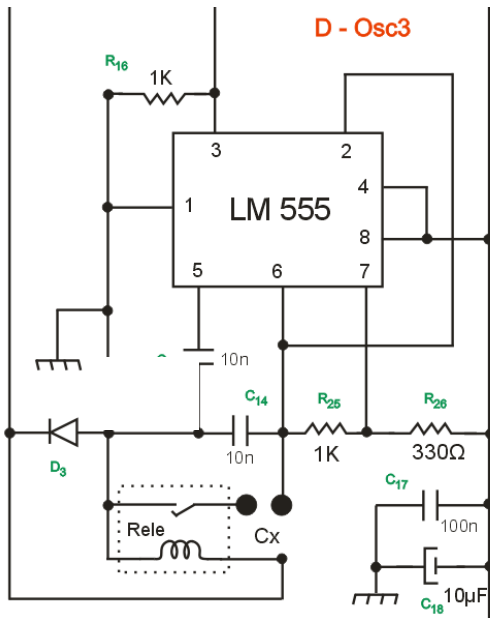
- α) Ένας ωμικός διαιρητής τάσης
- β) Δύο αναλογικοί ασύγκριτες
- γ) Ένα R-S flip-flop
- δ) Ένα τρανζίστορ σε λειτουργία διακόπτη
- ε) Μια βαθμίδα απομονωτή-αντιστροφέα.

Με τον εν σειρά συνδυασμό τριών αντιστατών  $R=5k$ , υλοποιείται ένας διαιρέτης τάσης μεταξύ των ακροδεκτών της τάσης τροφοδοσίας του ολοκληρωμένου κυκλώματος. Μέσου αυτού εφαρμόζεται μια τάση ίση με  $2V_{CC}/3$  στην αναστρέφουσα είσοδο του συγκριτή comp1 και μια άλλη ίση με  $V_{CC}/3$  στην μη αναστρέφουσα είσοδο του συγκριτή comp2. Και οι δυο αυτές τάσεις δρουν ως τάσεις αναφοράς. Οι τάσεις αυτές μπορούν να λάβουν και μικρότερες τιμές εφαρμόζοντας μια εξωτερική τάση στον ακροδέκτη ελέγχου(control) του χρονιστή ο οποίος βρίσκεται συνδεδεμένος στο κοινό κόμβο των δυο άνω αντιστατών του διαιρητή. Η τάσεις προς σύγκριση οδηγούνται στους συγκριτές μέσω των ακροδεκτών κατωφλίου(THRESHOLD) και σκανδαλισμού(TRIGGER) του χρονιστή. Οι εξόδοι των συγκριτών COMP1 και COMP2 συνδέονται στις εισόδους R και S, αντίστοιχα, του Flip-Flop και καθορίζουν την λειτουργία του σύμφωνα με το πίνακα αληθείας που παρουσιάζεται παρακάτω (πίνακας 1). Κατά προτεραιότητα όμως η λογική κατάσταση των εξόδων του Flip-Flop ελέγχεται από την είσοδο επανατοποθέτησης(reset), η οποία και αρχικοποιεί το ολοκληρωμένο (clear - reset) όταν οδηγηθεί σε χαμηλή στάθμη.

**Πίνακας 1** (Πίνακας αληθείας του RS flip –flop εντός του 555)

C1	R	S	Q	/Q	Κατάσταση
L	X	X	L	H	Εκκαθάριση
H	0	0	Q	/Q	Μνήμης
H	0	1	0	1	Τοποθέτησης
H	1	0	1	0	Επανατοποθέτησης
H	1	1	?	?	Απροσδιόριστη

Το 555 μπορεί να λειτουργήσει είτε ως μονοσταθής είτε ως ασταθής πολυδονητής. Στον ταλαντωτή OSC-3 του κυκλώματος μας, χρησιμοποιούμε το 555 σε συνδεσμολογία ασταθή πολυδονητή. Το κύκλωμα παράγει τετραγωνική κυματομορφή σε λογικά επίπεδα TTL και η συχνότητα λειτουργίας του δίνεται από τη σχέση (25), η οποία είναι μία σχέση της ίδιας μορφής με την (20).



$$F = \frac{1}{(\ln 2) \cdot (R_A + 2R_B)} \cdot \frac{1}{C} \quad (25)$$

Με  $R_A = R_{26}$ ,  $R_B = R_{25}$   
 και  $C = C_{14}$  ή  $C = C_{14} + C_{X2}$   
 (αναλόγως της κατάστασης  
 του ηλεκτρονόμου)

Δεδομένου ότι υπάρχει εκτενής βιβλιογραφία σχετικά με το 555, δεν θα παραθέσουμε την απόδειξη της σχέσης (25). Εξάλλου κάποιος μπορεί να ανατρέξει απευθείας στο φυλλάδιο πληροφοριών (LM555 datasheet) που παραθέτουμε στο CD, που συνοδεύει την εργασία[6].

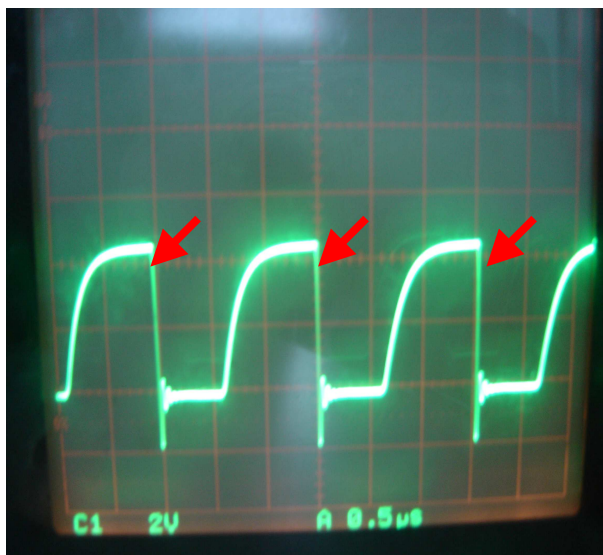
### 2.3) Πειραματικές μετρήσεις που σχετίζονται με τους ταλαντωτές

Προκειμένου να βελτιστοποιήσουμε τις επιδόσεις των ταλαντωτών του κυκλώματος μας, κατασκευάσαμε αρχικά κάποια πρότυπα. Στη συνέχεια πραγματοποιήσαμε μετρήσεις στα πρότυπα κυκλώματα, προκειμένου να μελετήσουμε τα χαρακτηριστικά τους αλλά και να τα βελτιστοποιήσουμε. Η βελτιστοποίηση έγινε για μέγιστη δυνατή σταθερότητα (αμελητέα ολίσθηση συχνότητας), για επίτευξη σημάτων συμβατών με TTL στάθμες στις εξόδους του κάθε ταλαντωτή και για επίτευξη αμιγούς τετραγωνικής κυματομορφής με απότομα μεταβαλλόμενα θετικά και αρνητικά μέτωπα παλμού - άπειρης κλίσης.

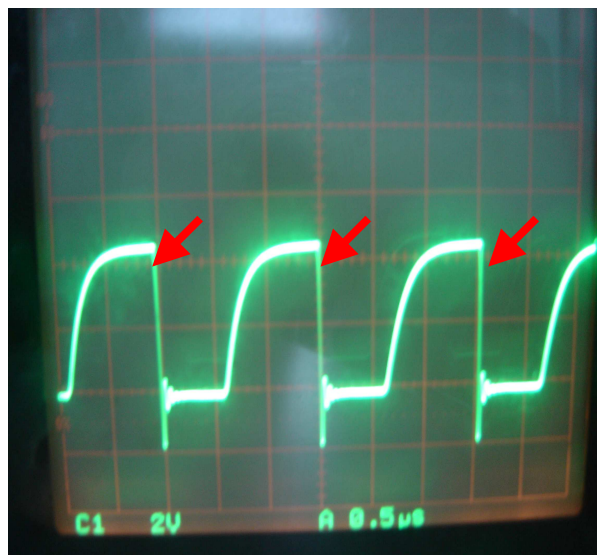


Στη συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικά οι κυματομορφές λειτουργίας των βελτιστοποιημένων κυκλωμάτων που επιτύχαμε και σχολιάζονται κάποια αξιόλογα σημεία :

Σχήμα4 - Ταλαντωτής (1)



Σχήμα 5 - Ταλαντωτής (2)



Η ελεύθερη συχνότητα του πρώτου ταλαντωτή καθορίστηκε στα  $F=646.6\text{KHz}$ , ενώ η ελεύθερη συχνότητα ταλάντωσης του δεύτερου ταλαντωτή είναι  $F=642.5\text{KHz}$ . Από τα παραπάνω σχήματα διαπιστώνουμε ότι:

- Και ο OSC-1 αλλά και ο OSC-2 λειτουργούν σε λογικές στάθμες TTL.
- Οι κυματομορφές των OSC-1 και OSC-2, στην ελεύθερη συχνότητα ταλάντωσης τους δεν είναι ιδανικές «τετραγωνικές» κυματομορφές. Παρατηρούμε ότι υπάρχει πρόβλημα κατά το ανιόν μέτωπο του παλμού, το οποίο δεν είναι απότομο. Απεναντίας ουδέν πρόβλημα υπάρχει στο κατιόν μέτωπο του παλμού.

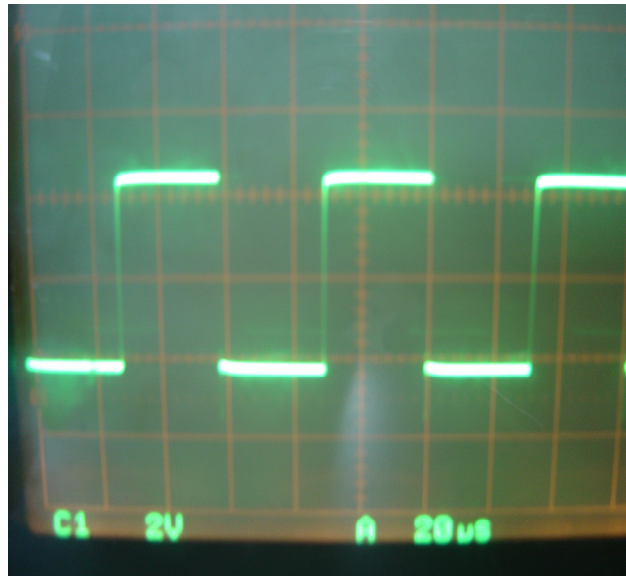
Βάσει των παραπάνω παρατηρήσεων αποφασίζουμε η μέτρηση της συχνότητας των ταλαντωτών να γίνεται από τον μικροεπεξεργαστή, με τον εσωτερικό του counter να μετρά παλμούς μόνο στο κατιόν μέτωπο των κυματομορφών . Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται μέσω software.

Στο σχήμα 6, εικονίζεται η κυματομορφή εξόδου του OSC-3, όπως αυτή μετρήθηκε με παλμογράφο στην ελεύθερη συχνότητα  $F=58.25\text{KHz}$  του ταλαντωτή. Από το σχήμα 6, παρατηρούμε ότι:

- Η κυματομορφή εξόδου του OSC-3 αντιστοιχεί σε λογικές στάθμες TTL.
- Η κυματομορφή εξόδου του OSC-3 παρουσιάζει τέλεια χαρακτηριστικά τόσο στο ανιόν όσο και στο κατελθόν μέτωπο των παλμών.

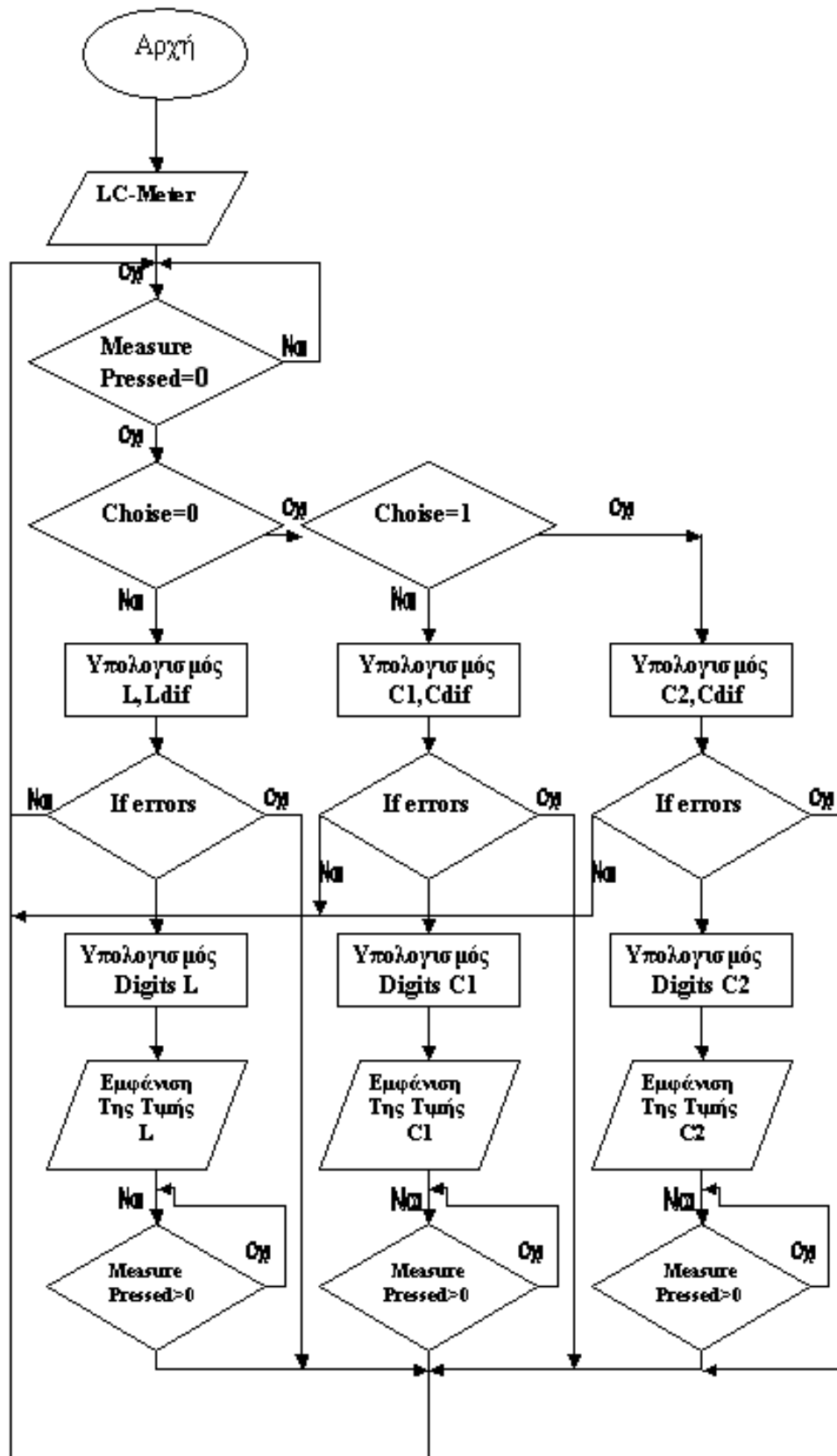
Βάσει των παραπάνω παρατηρήσεων συμπεράνουμε ότι η μέτρηση της συχνότητας του OSC-3 μπορεί να γίνεται από τον μικροεπεξεργαστή, με τον εσωτερικό του counter να μετρά παλμούς είτε στο ανιόν είτε στο κατελθόν μέτωπο της κυματομορφής του OSC-3 . Λεπτομερέστερη μελέτη της κυματομορφής, κατόπιν μεγέθυνσης του σχήματος 6, αποδεικνύει ότι το κατελθόν μέτωπο είναι ελαφρώς πιο απότομο από ότι το ανιόν . Για τον λόγο αυτό αποφασίζουμε τελικά η μέτρηση της συχνότητας του ταλαντωτή 3 να γίνεται με απαρίθμηση παλμών από τον counter του μικροελεγκτή κατά το κατελθόν μέτωπο.

**Σχήμα 6 - Ταλαντωτής (3)**



*ΜΕΡΟΣ ΤΡΙΤΟ***Περιγραφή του λογισμικού & του  
αλγόριθμου λειτουργίας**

## 3.1) Διάγραμμα ροής του προγράμματος



Όπως διακρίνεται στο διάγραμμα ροής του προγράμματος, ο μικροεπεξεργαστής εκτελεί ένα ατέρμονο βρόχο κατά τον οποίο ελέγχει συνεχώς αν έχει πατηθεί το πλήκτρο «measure» από τον χρήστη (βλ. ηλεκτρονικό σχηματικό – σχήμα 2). Ο έλεγχος αυτός γίνεται μέσω της ρουτίνας Measure\_pressed. Αν διαπιστωθεί ότι ο χρήστης έχει πατήσει το πλήκτρο «measure» τότε ο μικροεπεξεργαστής «ξεφεύγει» από το ατέρμονο loop και εκτελεί την συνάρτηση «choise». Η «choise» επιστρέφει μία τιμή αναλόγως με τη θέση του μεταγωγού (βλ. ηλεκτρονικό σχηματικό – σχήμα 2). Στη συνέχεια, αναλόγως με το αποτέλεσμα που έχει επιστρέψει η «choise» (δηλαδή αναλόγως της θέσης του μεταγωγού) ο επεξεργαστής αποφασίζει αν θα προχωρήσει σε μέτρηση του αγνώστου στοιχείου  $L_x$ , του  $C_{x1}$  ή του  $C_{x2}$ .

Αν για παράδειγμα ο μεταγωγός είναι στη θέση B (βλ. ηλεκτρονικό σχηματικό – σχήμα 2) ο επεξεργαστής λαμβάνει την απόφαση να μετρήσει το στοιχείο  $L_x$  και για τον λόγο αυτό ακολουθεί η εκτέλεση της ρουτίνας «Υπολογισμός L, Ldiff». Η ρουτίνα «Υπολογισμός L, Ldiff» εκτελεί τον αλγόριθμο μέτρησης και επιστρέφει δυο τιμές, την L που αντιστοιχεί στην τιμή αυτεπαγωγής του εξαρτήματος που βρίσκεται συνδεδεμένο στα τερματικά άκρα  $L_x$  και την Ldiff που αντιστοιχεί στην διαφορά της προηγούμενης τιμής  $L_x$  (που ενδεχομένως είχε μετρηθεί με πάτημα του πλήκτρου measure σε προγενέστερη χρονική στιγμή) με την τρέχουσα τιμή του  $L_x$ . Δηλαδή  $Ldiff = L(t_0) - L(t_1)$  όπου  $t_0 > t_1$ .

Οι υπολογιζόμενες τιμές από την ρουτίνα «Υπολογισμός», στέλνονται στην συνέχεια στην ρουτίνα «errors», η οποία ανιχνεύει για πιθανά αναπάντεχα σφάλματα κατά την μέτρηση (όπως για παράδειγμα στην περίπτωση που κάποιος συνδέσει ένα εξάρτημα με αυτεπαγωγή ή χωρητικότητα έξω από τα όρια ικανότητας μέτρησης της συσκευής). Αν ανιχνευτούν σφάλματα, η ρουτίνα «errors» απεικονίζει κάποιο μήνυμα σφάλματος στην οθόνη LCD.

Στη συνέχεια, την στιγμή που δεν υπάρχουν σφάλματα, οι υπολογιζόμενες τιμές από την ρουτίνα «Υπολογισμός», στέλνονται στην ρουτίνα «Υπολογισμός digits», η οποία ουσιαστικά λαμβάνει αποφάσεις για τον τρόπο απεικόνισης των αποτελεσμάτων της μέτρησης στην οθόνη του υγρού κρυστάλλου. Για παράδειγμα, η ρουτίνα «Υπολογισμός digits» αποφασίζει για τον αριθμό των σημαντικών ψηφίων που θα χρησιμοποιηθούν κατά τη απεικόνιση καθώς και για τις μονάδες (pF, nF,  $\mu F$ , ή mH, H).

Μόλις πραγματοποιηθεί η απεικόνιση, ο επεξεργαστής ελέγχει αν ο χρήστης έχει απελευθερώσει το πλήκτρο «measure». Αν ναι, ο επεξεργαστής επιστρέφει στην αρχή του προγράμματος και σε κατάσταση αναμονής προκειμένου να εκτελέσει κάποια νέα μέτρηση την στιγμή που το πλήκτρο «measure» θα πατηθεί εκ νέου σε επόμενη χρονική στιγμή. Αν όχι, ο επεξεργαστής περιμένει μέχρι ο χρήστης να απελευθερώσει το πλήκτρο «measure». Η διαδικασία αυτή κρίνεται απαραίτητη προκειμένου να αποφευχθούν προβλήματα «αναπήδησης» του διακόπτη measure.

### 3.2) Το πρόγραμμα

Στις σελίδες που ακολουθούν παρατίθεται το πρόγραμμα (λογισμικό) το οποίο εκτελεί ο μικροεπεξεργαστής, μαζί με αρκετά σχόλια που εξηγούν την λειτουργία του, σε κάθε βήμα. Το πρόγραμμα είναι γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού C.

Το πρόγραμμα είναι γραμμένο σε ANSI C. Προτιμήσαμε να γράψουμε το πρόγραμμα σε γλώσσα υψηλού επιπέδου και όχι σε Assembly λόγω της αυξημένης πολυπλοκότητας. Στη συνέχεια χρησιμοποιήσαμε το ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης εφαρμογών MPLAB IDE και τον compiler mcc18 της microchip[7] προκειμένου να μεταγλωττίσουμε το πρόγραμμα σε assembly και στη συνέχεια σε κώδικα μηχανής για να προγραμματίσουμε τον μικροεπεξεργαστή. Η πολυπλοκότητα του προγράμματος απορρέει κυρίως από τις ρουτίνες απεικόνισης αλλά και από τις μαθηματικές ρουτίνες για τους αριθμητικούς υπολογισμούς. Όλοι οι μαθηματικοί υπολογισμοί γίνονται με ακρίβεια 32 bit floating point number representation (according to IEEE 754 standard for single precision floats). Σημειωτέου ότι ο μικροεπεξεργαστής είναι 8-bit, οι μαθηματικές ρουτίνες για υπολογισμούς στα 32bit είναι αρκετά πολύπλοκες σε Assembly.

### 3.2.1) Η ρουτίνα Main

```
void main (void)
{

TRISB=0;
Delay10KTCYx(20);           // wait 0.2s for peripherals to be initialized

//Initialize LCDgures I/O pins used to control HD44780 LCD controller in 4bit
interface and initializes LCD as a 5x7 multiple line.
while( BusyXLCD() );       // waits until LCD not busy
OpenXLCD(FOUR_BIT & LINES_5X7 );

while( BusyXLCD() );       // waits until LCD not busy
WriteCmdXLCD( CURSOR_OFF ); // Cursor off on LCD

while( BusyXLCD() );       // waits until LCD not busy
SetDDRamAddr(0x00);        // Sets LCDs cursor on first position on first line
putsXLCD(Char);           // Displays " L C - M E T E R" on LCD's first line

while( BusyXLCD() );       // waits until LCD not busy
SetDDRamAddr(0x40);        // Sets LCDs cursor on first position on second line
putsXLCD(DisChar);        // Displays "Chania.TEI-Crete" on LCD's second
line

rele(0);                   /* turns off all rele */
ADCON1=6;                  // Set ADCON1 register to 6 - ADCON1 must be 6
or 7 to enable PORTA bits as digital I/O.

TRISA=1;                   // Configure PORTA for input.

// infinite loop starts here
label: while( measurepressed()==0) Delay10KTCYx(10); //waits for measure button
to be pressed
```



Μόλις ενεργοποιηθεί το κύκλωμα του LC Meter, ο μικροεπεξεργαστής εκτελεί την ρουτίνα main. Στην πρώτη γραμμή της main (TRISB=0) αρχικοποιείται ο καταχωρητής TRISB του μικροελεγκτή. Θέτοντας TRISB=0, όλα τα pins της θύρας B του μικροεπεξεργαστή αρχικοποιούνται για ψηφιακή έξοδο (output mode). Στη συνέχεια με την εντολή Delay, προκαλούμε μία καθυστέρηση 200msec προκειμένου να υπάρξει αρκετός χρόνος για να αρχικοποιηθούν τα περιφερειακά (κυρίως το Display module). Με το πέρας της καθυστέρησης, αρχίζει η αρχικοποίηση της LCD οθόνης και στην οθόνη της συσκευής εμφανίζεται το μήνυμα "LC-Meter Chania Tei Crete". Έπειτα με την εκτέλεση της ρουτίνας RELE(0) αρχικοποιούμε όλα τα rele σε κατάσταση off, προκειμένου όλοι οι ταλαντωτές να μεταπέσουν στην ελεύθερη συχνότητα λειτουργίας τους (F). Ακολουθεί η αρχικοποίηση του καταχωρητή ADCON1 στην τιμή 6 και του TRISA στην τιμή 1, έτσι ώστε η θύρας A του μικροεπεξεργαστή να λειτουργεί ως ψηφιακή είσοδος (set PortA to input mode).

Με το πέρας της αρχικοποίησης, ο μικροεπεξεργαστής μεταπίπτει σε έναν ατέρμονο βρόχο και εξετάζει συνέχεια την επιστρεφόμενη τιμή της συνάρτησης measurepressed(). Αν τυχόν πατηθεί το «measure button» από τον χρήστη, ο μικροεπεξεργαστής εκτελεί ένα συγκεκριμένο Block κώδικα από τα συνολικά τρία block κώδικα που περιέχονται στην εντολή switch. Το Block κώδικα που θα εκτελεστεί εξαρτάται από την επιστρεφόμενη τιμή της συνάρτησης choise. Διακρίνονται τρεις περιπτώσεις:

1. Αν η συνάρτηση choise επιστρέψει 0, σημαίνει ότι ο μεταγωγός βρίσκεται στην θέση B (βλ. ηλεκτρονικό σχέδιο του κυκλώματος στο σχήμα 2) και ο χρήστης έχει επιλέξει την μέτρηση αυτεπαγωγής  $L_x$  στον OSC-1, επομένως εκτελείται το block κώδικα που αντιστοιχεί στην case 0.
2. Αν η συνάρτηση choise επιστρέψει 1, σημαίνει ότι ο μεταγωγός βρίσκεται στην θέση C (βλ. ηλεκτρονικό σχέδιο του κυκλώματος στο σχήμα 2) και ο χρήστης έχει επιλέξει την μέτρηση χωρητικότητας  $C_{x1}$  στον OSC-2, επομένως εκτελείται το block κώδικα που αντιστοιχεί στην case 1.
3. Αν η συνάρτηση choise επιστρέψει 2, σημαίνει ότι ο μεταγωγός βρίσκεται στην θέση C (βλ. ηλεκτρονικό σχέδιο του κυκλώματος στο σχήμα 2) και ο χρήστης έχει επιλέξει την μέτρηση χωρητικότητας  $C_{x2}$  στον OSC-3, επομένως εκτελείται το block κώδικα που αντιστοιχεί στην case 2

Μόλις ο επεξεργαστής εισέλθει σε κάποιο από τα 3 πιθανά Block κώδικα αρχίζει να εκτελεί τον αλγόριθμο μέτρησης και απεικόνισης. Δηλαδή:

- Αν εισέλθει στο πρώτο Block κώδικα (case 0) εκτελεί τον βελτιστοποιημένο αλγόριθμο μέτρησης αυτεπαγωγής στον πρώτο ταλαντωτή (OSC-1) με την κλίση της ρουτίνας «meas(1)». Ελέγχει για πιθανά λάθη κατά τη μέτρηση εκτελώντας την ρουτίνα errors () και εφόσον δεν υπάρχουν λάθη απεικονίζει το αποτέλεσμα της μέτρησης στο display, αφού πρώτα υπολογίσει τις μονάδες και το πλήθος των ψηφίων απεικόνισης μέσω της ρουτίνας digit.
- Αν εισέλθει στο δεύτερο Block κώδικα (case 1) εκτελεί τον βελτιστοποιημένο αλγόριθμο μέτρησης χωρητικότητας στον δεύτερο ταλαντωτή (OSC-2) με την κλίση της ρουτίνας «meas(2)». Ελέγχει για πιθανά λάθη κατά τη μέτρηση εκτελώντας την ρουτίνα errors () και



εφόσον δεν υπάρχουν λάθη απεικονίζει το αποτέλεσμα της μέτρησης στο display, αφού πρώτα υπολογίσει τις μονάδες και το πλήθος των ψηφίων απεικόνισης μέσω της ρουτίνας digit.

- Αν εισέλθει στο τρίτο Block κώδικα (case 2) εκτελεί τον βελτιστοποιημένο αλγόριθμο μέτρησης χωρητικότητας στον τρίτο ταλαντωτή (OSC-3) με την κλίση της ρουτίνας «meas(3)». Ελέγχει για πιθανά λάθη κατά τη μέτρηση εκτελώντας την ρουτίνα errors () και εφόσον δεν υπάρχουν λάθη απεικονίζει το αποτέλεσμα της μέτρησης στο display, αφού πρώτα υπολογίσει τις μονάδες και το πλήθος των ψηφίων απεικόνισης μέσω της ρουτίνας digit.

Η απεικόνιση (για περαιτέρω λεπτομέρειες κάποιος μπορεί να ανατρέξει στις ρουτίνες digit() και dis()) γίνεται συνοπτικά όπως παρακάτω :

```
*****
***

//          Example of value, finally displayed on LCDs first line:

// DisChar[x]:   _ _ _ C 1 = 1 0 8 . 8 _ _ p F _
//
//              | | | | | | | | | | | | | | | |
//
//   x:          0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

/*****
***

/*****
***

//          Example of diff, finally displayed on LCDs second line:

// DisChar[x]:   + D i f f = 2 5 6 . 7 _ _ p F _
//
//              | | | | | | | | | | | | | | | |
//
//   x:          0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

/*****
***
```

Στη πρώτη γραμμή της LCD απεικονίζονται 16 χαρακτήρες και στη δεύτερη γραμμή, επίσης άλλοι 16. Στις θέσεις 0, 1, 2, 11, 12, 15 απεικονίζεται ο κενός χαρακτήρας (αφήνονται κενές). Στις θέσεις 3 και 4 απεικονίζεται το όνομα του στοιχείου μας π.χ C1, C2 ή \_L. Στη θέση 5 εμφανίζεται το σύμβολο “=” . Στις θέσεις 6, 7 και 8 απεικονίζονται τα τρία πρώτα ψηφία πριν την υποδιαστολή, στη θέση 9 εμφανίζεται η υποδιαστολή, στις θέσεις 10 και 11 απεικονίζονται τα δυο ψηφία μετά την υποδιαστολή (αν δεν υπάρχει δεύτερο ψηφίο η θέση 11 μένει κενή). Στη θέση 13 απεικονίζεται το πρόθεμα της

μονάδας μέτρησης π.χ p, m, μ ή n και στη θέση 14 εμφανίζει τη κύρια μονάδα f(farad) ή H(Henry).

Στη δεύτερη γραμμή της LCD οθόνης απεικονίζεται με όμοιο τρόπο η diff τιμή, είτε Cdiff είτε Ldiff με τη μόνη διαφορά ότι στις θέσεις 1, 2, 3, 4 εμφανίζεται επιπλέον η συντομογραφική λέξη diff (από το «difference-διαφορά»).

Η diff τιμή αντιστοιχεί στην διαφορά της προηγούμενης τιμής C, ή L(που ενδεχομένως είχε μετρηθεί με πάτημα του πλήκτρου measure σε προγενέστερη χρονική στιγμή) με την τρέχουσα τιμή. Δηλαδή diff =current Value – previous one. Η απεικόνιση της τιμής diff (ουσιαστικά η μεταβολή του μετρούμενου μεγέθους) αποδεικνύεται εξαιρετικά χρήσιμη, στην περίπτωση που κάποιος χρησιμοποιεί τη συσκευή για να συγκρίνει μεταξύ τους κάποιους άγνωστους πυκνωτές ή κάποια πηνία. Επίσης, η απεικόνιση της μεταβολής στη μέτρηση είναι εξίσου χρήσιμη για τον προσδιορισμό του σφάλματος μέτρησης και του συντελεστή ποιότητας του μετρούμενου στοιχείου.

Έχουμε επιλέξει η απεικόνιση να γίνεται με όχι παραπάνω δεκαδικά ψηφία απ' όσα έχουν νόημα – λαμβάνοντας υπόψη το σφάλμα μέτρησης σε διάφορες περιοχές μέτρησης. Συγκεκριμένα η απεικόνιση για τις διάφορες τιμές των υπό μέτρηση εξαρτημάτων γίνεται ως παρακάτω:

Στην περιοχή	0.00pF με 099.99pF	- με δύο δεκαδικά ψηφία
Στην περιοχή	100.0pF to 999.9pF	- με ένα δεκαδικό ψηφίο
Στην περιοχή	1.00nF to 99.99nF	- με δύο δεκαδικά ψηφία
Στην περιοχή	100.0nF to 999.9nF	- με ένα δεκαδικό ψηφίο
Στην περιοχή	1.00μF to 99.99uF	- με δύο δεκαδικά ψηφία
Στην περιοχή	100.0μF to 999.9uF	- με ένα δεκαδικό ψηφίο
Στην περιοχή	0.00μH to 99.99uH	- με δύο δεκαδικά ψηφία
Στην περιοχή	100.0μH to 999.9uH	- με ένα δεκαδικό ψηφίο
Στην περιοχή	1.00mH to 99.99mH	- με ένα δεκαδικά ψηφία
Στην περιοχή	100.0mH to 999.9mH	- με ένα δεκαδικά ψηφία
Στην περιοχή	1.00 H to 99.99 H	- με δύο δεκαδικά ψηφία
Στην περιοχή	100.0 H to 999.9 H	- με δύο δεκαδικά ψηφία

### 3.2.2) Αλγόριθμος μέτρησης της συχνότητας

Προκείμενου να επιτελεστούν οι βελτιστοποιημένοι αλγόριθμοι μέτρησης αυτεπαγωγής και χωρητικότητας που αναφέραμε στις παραγράφους 1.2.1, 1.2.2 και 1.3.1, ο μικροεπεξεργαστής πρέπει να πραγματοποιήσει δύο μετρήσεις συχνότητας για κάθε μέτρηση αυτεπαγωγής ή χωρητικότητας σε έκαστο ταλαντωτή (μία μέτρηση για την ελεύθερη συχνότητα ταλάντωσης F του ταλαντωτή και μία για την συχνότητα Fx στην οποία μεταπίπτει ο ταλαντωτής με την εισαγωγή του αγνώστου υπό μέτρηση στοιχείου στο κύκλωμα).

Οι μετρήσεις συχνότητας γίνονται με χρήση ενός ασύγχρονου counter των 16bit που υπάρχει εντός του επεξεργαστή. Συγκεκριμένα, για τις μετρήσεις συχνότητας που αφορούν τους ταλαντωτές 1 και 2 η μέθοδος μέτρησης συχνότητας έχει ως εξής:

1. Ο επεξεργαστής μηδενίζει τον counter την χρονική στιγμή 0 και στη συνέχεια αναμένει ακριβώς για 0.1sec.
2. Τη στιγμή  $t=0.1\text{sec}$ , ο επεξεργαστής διαβάζει την τιμή του counter.
3. Επαναλαμβάνει τα βήματα 1 και 2 για μία ακόμη φορά και προσθέτει την πρόσφατη τιμή του counter στην προηγούμενη.
4. Διαιρεί το άθροισμα δια του συνολικού χρόνου μέτρησης των 0.2 sec
5. Το αποτέλεσμα της διαίρεσης αντιστοιχεί στην συχνότητα.

Για τις μετρήσεις συχνότητας που αφορούν τον ταλαντωτή 3, η μέθοδος μέτρησης συχνότητας έχει ως εξής:

1. Ο επεξεργαστής μηδενίζει τον counter την χρονική στιγμή 0 και στη συνέχεια αναμένει ακριβώς για 1sec.
2. Τη στιγμή  $t=1\text{sec}$ , ο επεξεργαστής διαβάζει την τιμή του counter.
3. Επαναλαμβάνει τα βήματα 1 και 2 για μία ακόμη φορά και προσθέτει την πρόσφατη τιμή του counter στην προηγούμενη.
4. Διαιρεί το άθροισμα δια του συνολικού χρόνου μέτρησης των 2 sec
5. Το αποτέλεσμα της διαίρεσης αντιστοιχεί στην συχνότητα.

Για περισσότερες λεπτομέρειες, κάποιος μπορεί να ανατρέξει στις ρουτίνες `meas()` και `counter()`.

Λαμβάνοντας υπόψη το χρόνο που διαρκεί η μέτρηση των παλμών, είναι εύκολο να αποδειχτεί ότι η διακριτική ικανότητα στη μέτρηση συχνότητας (resolution) είναι καλύτερη από 5Hz για την περίπτωση των ταλαντωτών 1 & 2 και καλύτερη από 0.5Hz για την περίπτωση του ταλαντωτή 3.

*ΜΕΡΟΣ ΤΕΤΑΡΤΟ*

**Ακρίβεια και σφάλματα**

#### 4.1 Μέγιστη θεωρητική ακρίβεια, στην μέτρηση αυτεπαγωγής

Η μέγιστη θεωρητική ακρίβεια για την περίπτωση μέτρησης αυτεπαγωγής μπορεί να προσδιοριστεί μέσα από μια απλή αριθμητική εφαρμογή της σχέσης (12). Η ζητούμενη μέγιστη θεωρητική ακρίβεια αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή αυτεπαγωγής που μπορεί να μετρηθεί, και μπορεί να υπολογιστεί με ως παρακάτω:

- Αρχικά υπολογίζουμε την θεωρητική συχνότητα ελεύθερης ταλάντωσης  $F$ , του ταλαντωτή 1, από τη σχέση (1) και αντικαθιστώντας τις τιμές των στοιχείων του κυκλώματος σε αυτή. Βρίσκουμε ότι:

$$F = 619,5 \text{ KHz}$$

- Η ελάχιστη διακριτική ικανότητα στην μέτρηση της  $F_x$  είναι 5 Hz (όπως προκύπτει με βάση την παρατήρηση στην ενότητα 3.2.2)
- Η τιμή του στοιχείου αναφοράς στον OSC-1 είναι  $L_{ref} = 44 \mu\text{H}$ .

Αντικαθιστώντας  $F$ ,  $L_{ref}$  και  $F_x = F - 5 \text{ Hz}$  στην σχέση (12), βρίσκουμε ότι η ελάχιστη τιμή αυτεπαγωγής  $L_{min}$ , που μπορεί να μετρηθεί είναι:

$$L_{min} = \left( \left( \frac{619500}{619495} \right)^2 - 1 \right) \cdot 44 \mu\text{H} \Rightarrow L_{min} = 0,0007 \mu\text{H}$$

*Η τιμή  $L_{min}$  εκφράζει την ελάχιστη τιμή αυτεπαγωγής που μπορεί να μετρηθεί θεωρητικά από το κύκλωμα μας και επομένως αντιστοιχεί στο μέγιστο θεωρητικό όριο ακριβείας στη μέτρηση αυτεπαγωγής.*

#### 4.2 Μέγιστη θεωρητική ακρίβεια, μέτρησης χωρητικότητας στον OSC-2

Η μέγιστη θεωρητική ακρίβεια για την περίπτωση μέτρησης άγνωστης χωρητικότητας  $C_{x1}$  στον OSC-2 μπορεί να προσδιοριστεί μέσα από μια απλή αριθμητική εφαρμογή της σχέσης (5). Η ζητούμενη μέγιστη θεωρητική ακρίβεια αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή χωρητικότητας που μπορεί να μετρηθεί, και μπορεί να υπολογιστεί ως παρακάτω:

- Αρχικά υπολογίζουμε την θεωρητική συχνότητα ελεύθερης ταλάντωσης  $F$ , του ταλαντωτή 2, από τη σχέση (1) και αντικαθιστώντας τις τιμές των στοιχείων του κυκλώματος σε αυτή. Βρίσκουμε ότι:

$$F = 629,5 \text{ KHz}$$

- Η ελάχιστη διακριτική ικανότητα στην μέτρηση της  $F_x$  είναι 5 Hz (όπως προκύπτει με βάση την παρατήρηση στην ενότητα 3.2.2)
- Η τιμή του στοιχείου αναφοράς στον OSC-2 είναι  $C_{ref} = 680 \text{ pF}$ .

Αντικαθιστώντας  $F$ ,  $C_{ref}$  και  $F_x = F - 5$  Hz στην σχέση (12), βρίσκουμε ότι η ελάχιστη τιμή χωρητικότητας  $C_{min}$ , που μπορεί να μετρηθεί είναι:

$$C_{min} = \left( \left( \frac{629500}{629495} \right)^2 - 1 \right) \cdot 680 pF \Rightarrow C_{min} = 0,01 pF$$

Η τιμή  $C_{min}$  εκφράζει την ελάχιστη τιμή χωρητικότητας που μπορεί να μετρηθεί θεωρητικά από το κύκλωμα μας και επομένως αντιστοιχεί στην μέγιστη θεωρητική ακρίβεια μέτρησης χωρητικότητας στον OSC-2.

### 4.3 Μέγιστη θεωρητική ακρίβεια, μέτρησης χωρητικότητας στον OSC-3

Η μέγιστη θεωρητική ακρίβεια για την περίπτωση μέτρησης άγνωστης χωρητικότητας  $C_{x2}$  στον OSC-3 μπορεί να προσδιοριστεί μέσα από μια απλή αριθμητική εφαρμογή της σχέσης (21). Η ζητούμενη μέγιστη θεωρητική ακρίβεια αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή χωρητικότητας που μπορεί να μετρηθεί, και μπορεί να υπολογιστεί ως παρακάτω:

- Αρχικά υπολογίζουμε την θεωρητική συχνότητα ελεύθερης ταλάντωσης  $F$ , του ταλαντωτή 3, από τη σχέση (25) και αντικαθιστώντας τις τιμές των στοιχείων του κυκλώματος σε αυτή. Βρίσκουμε ότι:

$$F = 61,918 \text{ KHz}$$

- Η ελάχιστη διακριτική ικανότητα στην μέτρηση της  $F_x$  είναι 0.5 Hz (όπως προκύπτει με βάση την παρατήρηση στην ενότητα 3.2.2)
- Η τιμή του στοιχείου αναφοράς στον OSC-2 είναι  $C_{ref} = 10 \text{ nF}$ .

Αντικαθιστώντας  $F$ ,  $C_{ref}$  και  $F_x = F - 0.5$  Hz στην σχέση (12), βρίσκουμε ότι η ελάχιστη τιμή χωρητικότητας  $C_{min}$ , που μπορεί να μετρηθεί είναι:

$$C_{min} = \left( \left( \frac{61918}{61917,5} \right) - 1 \right) \cdot 1000 pF \Rightarrow C_{min} = 0,08 pF$$

Η τιμή  $C_{min}$  εκφράζει την ελάχιστη τιμή χωρητικότητας που μπορεί να μετρηθεί θεωρητικά από το κύκλωμα μας και επομένως αντιστοιχεί στην μέγιστη θεωρητική ακρίβεια μέτρησης χωρητικότητας στον OSC-3.

#### 4.4 Εκτίμηση της πραγματικής ακρίβειας στην μέτρηση αυτεπαγωγής

Το μεγαλύτερο σφάλμα κατά τη μέτρηση τυχούσας αυτεπαγωγής στην συσκευή μας, προέρχεται από την πιθανή ολίσθηση συχνότητας του ταλαντωτή OSC-1 στο χρονικό διάστημα που περνά από τη μέτρηση της συχνότητας  $F$  έως τη μέτρηση της συχνότητας  $F_x$ . Όπως αναφέρθηκε διεξοδικά στην παράγραφο 1.2.2, αν μπορούσαμε να πετύχουμε το χρονικό αυτό διάστημα να τείνει στο μηδέν, θα ήμασταν σίγουροι ότι η ολίσθηση του ταλαντωτή θα έτεινε επίσης στο μηδέν. Στην πράξη όμως αυτό είναι αδύνατο. Ο επεξεργαστής μετράει πρώτα την  $F$  και χρειάζεται κάποιος χρόνος για να γίνει αυτό (περίπου 0.2sec). Έπειτα κλείνει το rele και μετράει την  $F_x$ . Τόσο η μεταγωγή του rele, όσο και η μέτρηση της  $F_x$  διαρκούν κάποιο χρόνο. Συνολικά ο χρόνος που περνάει από την στιγμή μέτρησης της  $F$  έως την στιγμή μέτρησης της  $F_x$ , είναι περίπου 0.6sec.

Προκειμένου λοιπόν να εκτιμήσουμε το μέγιστο σφάλμα μέτρησης, εργαζόμαστε ως εξής:

- Αρχικά και με την βοήθεια ενός συχνομέτρου μελετάμε την σταθερότητα του ταλαντωτή OSC-1 σε διάφορες περιοχές συχνοτήτων και παρατηρούμε ενδεχόμενη ολίσθηση στη συχνότητα του με την πάροδο του χρόνου. Ο χρόνος αναμονής μας, για την μέτρηση της μέγιστης ολίσθησης  $\Delta F_{xmax}$  του ταλαντωτή μας, σε κάθε περίπτωση, ήταν 1 λεπτό (πολύ μεγαλύτερος από τα 0.6sec). Οι τιμές  $\Delta F_{xmax}$  που μετρήσαμε πειραματικά για διάφορες τιμές του πηνίου  $L_x$ , αναγράφονται στην 4<sup>η</sup> στήλη του πίνακα 2 :

Πίνακας 2

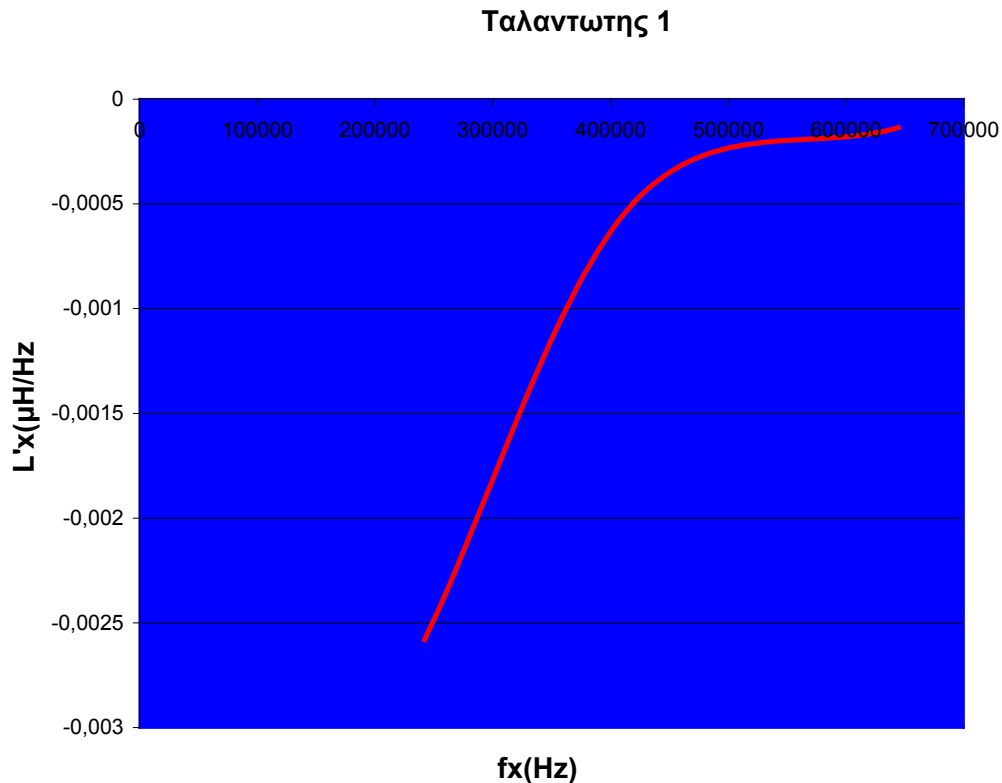
$f_x(\text{Hz})$	$L_x(\mu\text{H})$	$L'_x(\mu\text{H}/\text{Hz})$	$\Delta f_{xmax}(\text{Hz})$	$\Delta L_{xmax}$	Ακρίβεια μέτρησης
644600	0,000000000	0,000136519	100	0,013651877	0.01( $\mu\text{H}$ )
420000	59	0,000493532	100	-0,04935321	0.04( $\mu\text{H}$ )
242000	268	0,002579985	50	0,128999249	0.12( $\mu\text{H}$ )

- Στην στήλη  $f_x$  αναγράφεται η αρχική συχνότητα ταλάντωσης του OSC-1 (την χρονική στιγμή 0-πριν αυτός ολισθήσει) όπως αυτή μετρήθηκε για διάφορες τιμές του  $L_x$ . Οι τιμές του  $L_x$ , αναγράφονται στην δεύτερη στήλη του πίνακα 2.
- Προκειμένου να ερευνήσουμε την ευαισθησία στον προσδιορισμό του  $L_x$  συναρτήσει της συχνότητας  $F_x$ , παραγωγίζουμε την σχέση (12) ως προς  $F_x$  και βρίσκουμε :

$$\frac{\partial L_x}{\partial F_x} = L'_x(F_x) = -2L_{ref} \frac{f^2}{f_x^3} \quad (26)$$

- Με γνωστά τα  $L_{ref}$  και  $F$ , θέτουμε τις τιμές για την  $F_x$ , που αναγράφονται στην πρώτη στήλη του πίνακα 2, στην σχέση (26) και αναγράφουμε τα αποτελέσματα στην στήλη  $L'_x(\mu\text{H}/\text{Hz})$  του πίνακα 2.

- Πολλαπλασιάζουμε την εκάστοτε ευαισθησία  $L'_x(\mu\text{H}/\text{Hz})$ , με την εκάστοτε μετρούμενη μέγιστη ολίσθηση συχνότητας  $\Delta F_{x\text{max}}(\text{Hz})$
- Το αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού αντιστοιχεί στην πειραματικά προσδιοριζόμενη ακρίβεια μέτρησης που παρέχει η συσκευή μας, σε έκαστη περιοχή τιμών του  $L_x$  – σημειωτέου ότι ο υπολογισμός έχει γίνει για την χειρότερη περίπτωση.



**Σχήμα 7.** (Ευαισθησία στην μέτρηση άγνωστης αυτεπαγωγής  $L_x$ , ανά Hz ολίσθησης του OSC-1, συναρτήσει της συχνότητας  $F_x$ )

#### 4.5 Εκτίμηση της πραγματικής ακρίβειας στην μέτρηση χωρητικότητας στον OSC-2.

Εργαζόμαστε κατά τον ίδιο τρόπο, όπως και στην παράγραφο 4.4 :

- Αρχικά και με την βοήθεια ενός συχνομέτρου μελετάμε την σταθερότητα του ταλαντωτή OSC-2 σε διάφορες περιοχές συχνοτήτων και παρατηρούμε ενδεχόμενη ολίσθηση στη συχνότητα του με την πάροδο του χρόνου. Ο χρόνος αναμονής μας, για την μέτρηση της μέγιστης ολίσθησης  $\Delta F_{x\text{max}}$  του ταλαντωτή μας, σε κάθε περίπτωση, ήταν 1 λεπτό. Οι τιμές  $\Delta F_{x\text{max}}$  που μετρήσαμε πειραματικά για διάφορες τιμές της χωρητικότητας  $C_x$ , αναγράφονται στην 4<sup>η</sup> στήλη του πίνακα 3 :



Πίνακας 3

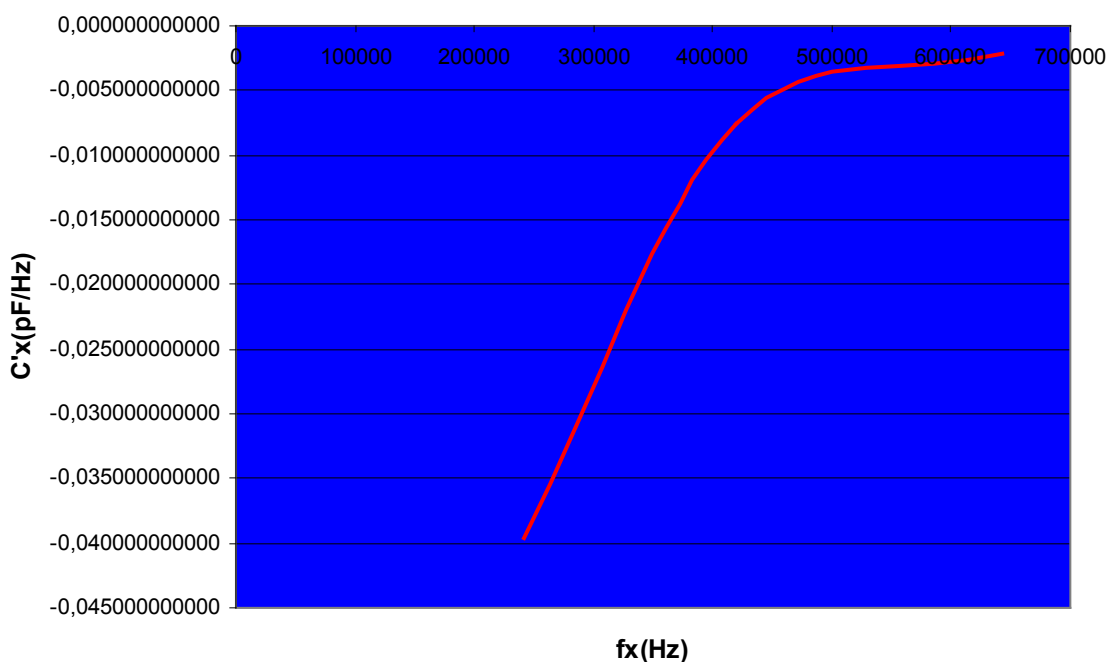
F <sub>x</sub>	C <sub>x</sub> (pF)	C' <sub>x</sub> (pF/Hz)	Δf <sub>x</sub> max(Hz)	ΔC <sub>x</sub> max	Ακρίβεια μέτρησης
642500	0,0000000000	-0,002116731518	40	0,084669261	0.08(Pf)
420000	911	-0,007577698143	20	0,151553963	0.15(Pf)
242000	4113	-0,039613122269	70	2,772918559	2.7(Pf)

- Στην στήλη f<sub>x</sub> αναγράφεται η αρχική συχνότητα ταλάντωσης του OSC-2 (την χρονική στιγμή 0-πριν αυτός ολισθήσει) όπως αυτή μετρήθηκε για διάφορες τιμές του C<sub>x</sub>. Οι τιμές του C<sub>x</sub>, αναγράφονται στην δεύτερη στήλη του πίνακα 3.
- Προκειμένου να ερευνήσουμε την ευαισθησία στον προσδιορισμό του C<sub>x</sub> συναρτήσει της συχνότητας F<sub>x</sub>, παραγωγίζουμε την σχέση (5) ως προς F<sub>x</sub> και βρίσκουμε :

$$\frac{\partial C_x}{\partial F_x} = C'_x(F_x) = -2C_{ref} \frac{f^2}{f_x^3} \quad (27)$$

- Με γνωστά τα C<sub>ref</sub> και F, θέτουμε τις τιμές για την F<sub>x</sub>, που αναγράφονται στην πρώτη στήλη του πίνακα 3, στην σχέση (27) και αναγράφουμε τα αποτελέσματα στην στήλη C'<sub>x</sub>(μH/Hz) του πίνακα 3.
- Πολλαπλασιάζουμε την εκάστοτε ευαισθησία C'<sub>x</sub>(pF/Hz), με την εκάστοτε μετρούμενη μέγιστη ολίσθηση συχνότητας ΔF<sub>x</sub>max (Hz)
- Το αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού αντιστοιχεί στην πειραματικά προσδιοριζόμενη ακρίβεια μέτρησης που παρέχει η συσκευή μας, σε έκαστη περιοχή τιμών του C<sub>x</sub> – σημειωτέου ότι ο υπολογισμός έχει γίνει για την χειρότερη περίπτωση.

Ταλαντωτής 2



**Σχήμα 8.** (Ευαισθησία στην μέτρηση άγνωστης χωρητικότητας C<sub>x</sub>, ανά Hz ολίσθησης του OSC-2, συναρτήσει της συχνότητας F<sub>x</sub>)

#### 4.6 Εκτίμηση της πραγματικής ακρίβειας στην μέτρηση χωρητικότητας στον OSC-3.

Εργαζόμαστε κατά τον ίδιο τρόπο, όπως και στην παράγραφο 4.5 :

- Αρχικά και με την βοήθεια ενός συχνομέτρου μελετάμε την σταθερότητα του ταλαντωτή OSC-3 σε διάφορες περιοχές συχνοτήτων και παρατηρούμε ενδεχόμενη ολίσθηση στη συχνότητα του με την πάροδο του χρόνου. Ο χρόνος αναμονής μας, για την μέτρηση της μέγιστης ολίσθησης  $\Delta F_{xmax}$  του ταλαντωτή μας, σε κάθε περίπτωση, ήταν 1 λεπτό. Οι τιμές  $\Delta F_{xmax}$  που μετρήσαμε πειραματικά για διάφορες τιμές της χωρητικότητας  $C_x$ , αναγράφονται στην 4<sup>η</sup> στήλη του πίνακα 4 :

**Πίνακας 4**

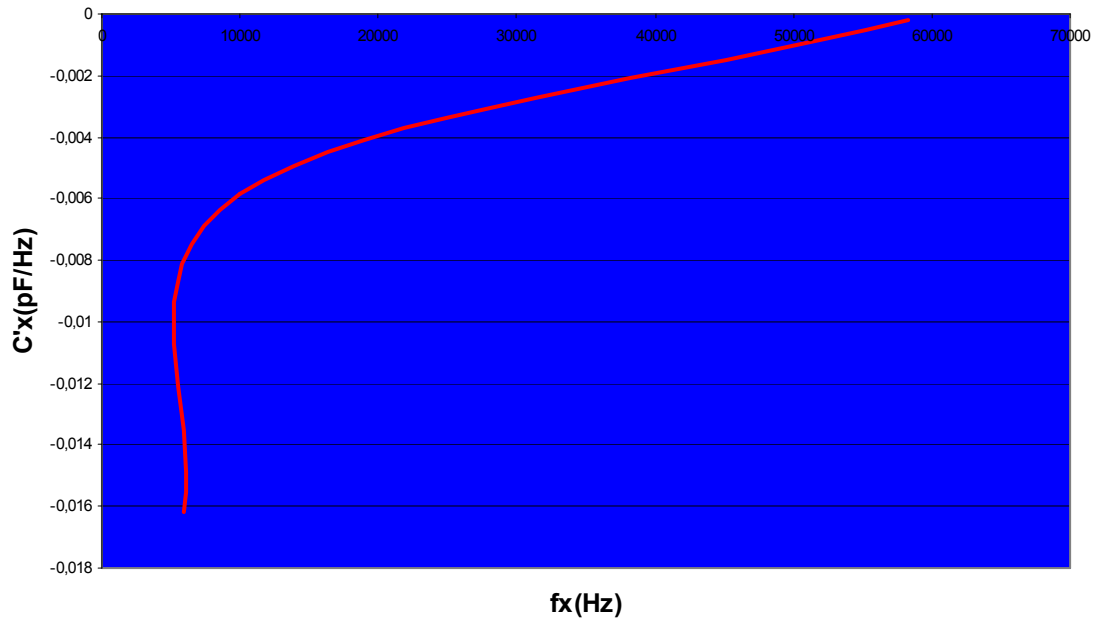
$F_x$	$C_x$ (nF)	$C'_x$ (nF)/Hz	$\Delta f_{xmax}$ (Hz)	$\Delta C_{xmax}$	Ακρίβεια μέτρησης
58250	0,0000	-0,000171674	10	- 0,001716738	0.0017(nF)
10000	48	-0,005825	5	-0,029125	0.029(nF)
6000	87	-0,016180556	2	- 0,032361111	0.03(nF)

- Στην στήλη  $f_x$  αναγράφεται η αρχική συχνότητα ταλάντωσης του OSC-3 (την χρονική στιγμή 0-πριν αυτός ολισθήσει) όπως αυτή μετρήθηκε για διάφορες τιμές του  $C_x$  . Οι τιμές του  $C_x$ , αναγράφονται στην δεύτερη στήλη του πίνακα 4.
- Προκειμένου να ερευνήσουμε την ευαισθησία στον προσδιορισμό του  $C_x$  συναρτήσει της συχνότητας  $F_x$  , παραγωγίζουμε την σχέση (25) ως προς  $F_x$  και βρίσκουμε :

$$\frac{\partial C_x}{\partial F_x} = C'_x(F_x) = -C_{ref} \frac{f}{f_x^2} \quad (28)$$

- Με γνωστά τα  $C_{ref}$  και  $F_x$ , θέτουμε τις τιμές για την  $F_x$ , που αναγράφονται στην πρώτη στήλη του πίνακα 4, στην σχέση (27) και αναγράφουμε τα αποτελέσματα στην στήλη  $C'_x$ (nF/Hz) του πίνακα 3.
- Πολλαπλασιάζουμε την εκάστοτε ευαισθησία  $C'_x$ (nF/Hz), με την εκάστοτε μετρούμενη μέγιστη ολίσθηση συχνότητας  $\Delta F_{xmax}$  (Hz)
- Το αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού αντιστοιχεί στην πειραματικά προσδιοριζόμενη ακρίβεια μέτρησης που παρέχει η συσκευή μας, σε έκαστη περιοχή τιμών του  $C_x$  – σημειωτέου ότι ο υπολογισμός έχει γίνει για την χειρότερη περίπτωση.

## Ταλαντωτής 3



**Σχήμα 9.** (Ευαισθησία στην μέτρηση άγνωστης χωρητικότητας  $C_x$ , ανά Hz ολίσθησης του OSC-3, συναρτήσει της συχνότητας  $F_x$ )

*ΜΕΡΟΣ ΠΕΜΠΤΟ*

**Τυπωμένο κύκλωμα και κατασκευή**

## 5.1 Δημιουργία τυπωμένου κυκλώματος(Printed Circuit Board)

Η χρήση του ηλεκτρονικού προγράμματος Protel DXP, μας έδωσε τη δυνατότητα, να σχεδιάσουμε το ηλεκτρονικό σχέδιο, να ορίσουμε τις διάστασης των εξαρτημάτων, τις διαστάσεις της πλακέτας καθώς και το πάχος των αγωγών[8]. Ακολουθώντας τα παραπάνω βήματα παρουσιάζουμε παρακάτω τις διαφάνειες του τυπωμένου κυκλώματος.

## 5.2 Υλοποίηση του τυπωμένου κυκλώματος σε πλακέτα

Η διαδικασία εμφάνισης του τυπωμένου κυκλώματος σε πλακέτα ακολουθεί μια σειρά βημάτων που χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή. Τα οποία είναι τα εξής:

1. Χρειαστήκαμε μια πλακέτα διπλής όψεως( φωτοευαίσθητη και από τις δυο επιφάνειες).
2. Εκτυπώσαμε το τυπωμένο σε διαφάνειες, τις οποίες παρουσιάζουμε παρακάτω (Layout)
3. Έπειτα με τη βοήθεια του μηχανήματος φωτομεταφοράς του εργαστηρίου “τυπωμένα κυκλώματα” του ΤΕΙ Κρήτης (Παράρτημα Χανίων) εκτυπώσαμε το “Layout” στην πλακέτα βάσει της φωτολιθογραφικής μεθόδου.
4. Εμφανίσαμε το Layout πάνω στην πλακέτα με τη βοήθεια αραιού διαλύματος καυστικής σόδας (NaOH).
5. Η αποχάλκωση έγινε σε αραιό διάλυμα τριχλωριούχου σιδήρου.
6. Οι οπές στο τυπωμένο ανοίχτηκαν με τη βοήθεια ηλεκτρικού δραπάνου.
7. Τοποθετήσαμε και συγκολλήσαμε τα εξαρτήματα.
8. Η πλακέτα επικαλύφθηκε με ειδικό βερνίκι προκειμένου να αποφύγουμε τυχόν οξείδωση.

## 5.3 Παράθεση διαφανειών για υλοποίηση κατασκευής

**1<sup>η</sup> διαφάνεια:** Πρώτη όψη πλακέτας.

**2<sup>η</sup> διαφάνεια:** Δεύτερη όψη πλακέτας.

**3<sup>η</sup> διαφάνεια:** Θέση που αντιστοιχεί το κάθε εξάρτημα πάνω στη πλακέτα.

*ΜΕΡΟΣ ΕΚΤΟ*

**Βαθμονόμηση της συσκευής**

## 6.1 Τρόπος βαθμονόμησης του LC-Meter

Προκειμένου η συσκευή μας να μετράει σωστά απαιτείται μία αρχική βαθμονόμηση κατά την φάση κατασκευής. Από τη στιγμή που γίνει η βαθμονόμηση και μετά, η συσκευή είναι σε θέση να μετράει ανά πάσα στιγμή με το απλό πάτημα ενός πλήκτρου, χωρίς να χρειάζεται ποτέ πλέον άλλη βαθμονόμηση. Η διαδικασία της βαθμονόμησης έχει ως παρακάτω:

1. Αρχικά δηλώνουμε στο πρόγραμμα ως LL, CM και CN τις ονομαστικές τιμές των  $L_1$ ,  $C_{13}$ , και  $C_{14}$ , αντίστοιχα. Αυτό γίνεται στις γραμμές 33, 34 και 35 του προγράμματος με τις εντολές:

```
float CM=700.0;           /*Reference capacitor used (pF)- LM311 Osc 2 */
float LL=43.12;          /*Reference inductor used (uH)- LM311 Osc 1 */
float CN=11580.0;        /*Reference capacitor used (pF)- LM555 Osc 3 */
```

2. Στη συνέχεια μετράμε με το LC-meter 3 γνωστά στοιχεία. Ένα γνωστό πηνίο τιμής  $L_i$  στον OSC-1, έναν γνωστό πυκνωτή τιμής  $C_k$  στον OSC-2 και έναν γνωστό πυκνωτή τιμής  $C_m$  στον OSC-3.
3. Σημειώνουμε κάπου τις τιμές  $LL_i$ ,  $CC_k$ ,  $CC_m$  που μέτρησε η συσκευή μας για τα γνωστά στοιχεία  $L_i$ ,  $C_k$  και  $C_m$ , αντίστοιχα.
4. Πραγματοποιούμε τις διαιρέσεις  $A=L_i/LL_i$ ,  $B=C_k/CC_k$  και  $\Gamma=C_m/CC_m$ .
5. Πραγματοποιούμε τους πολλαπλασιασμούς  $A*LL$ ,  $B*CM$ ,  $\Gamma*CN$ . Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν στις πραγματικές τιμές των εξαρτημάτων  $L_1$ ,  $C_{13}$ , και  $C_{14}$ , αντίστοιχα.
6. Δηλώνουμε στο πρόγραμμα, εκ νέου ως LL, CM, CN τις τιμές  $A*LL$ ,  $B*CM$ ,  $\Gamma*CN$ , αντίστοιχα που υπολογίσαμε στο προηγούμενο βήμα και προγραμματίζουμε εκ νέου τον επεξεργαστή μας.
7. Μετράμε πάλι με το LC-Meter τα γνωστά στοιχεία τιμής  $L_i$  στον OSC-1,  $C_k$  στον OSC-2 και  $C_m$  στον OSC-3 και επαληθεύουμε ότι στην οθόνη της συσκευής απεικονίζεται τον αναμενόμενο αποτέλεσμα μέτρησης.
8. Στη συνέχεια, βραχυκυκλώνουμε με ένα μικρού μήκους και πολύ λεπτό επάργυρο σύρμα τους τερματικούς ακροδέκτες  $L_x$ , και πατάμε το πλήκτρο measure της συσκευής τη στιγμή που ο μεταγωγός είναι στη θέση L. Σημειώνουμε την τιμή L που διαβάζουμε στο display της συσκευής. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στην παρασιτική αυτεπαγωγή των τερματικών ακροδεκτών  $L_x$ .
9. Αφαιρούμε οποιοδήποτε στοιχείο από τους τερματικούς ακροδέκτες  $C_{x1}$  και πατάμε το πλήκτρο measure της συσκευής τη στιγμή που ο μεταγωγός είναι στη θέση C1. Σημειώνουμε την τιμή  $C_1$  που διαβάζουμε στο display της συσκευής. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στην παρασιτική χωρητικότητα των τερματικών ακροδεκτών  $C_{x1}$ .
10. Δηλώνουμε στις γραμμές 36 και 37 του προγράμματος ως  $C_{par}$  και  $LL_{par}$  τις τιμές L και  $C_1$ , αντίστοιχα, όπως παρακάτω:

```
float Cpar=0.08;          /*Parasitic capacitor (pF) in LM311 Osc 2 */
float LLpar=0.04;        /*Parasitic inductor (uH) in LM311 Osc 1 */
```

11. Προγραμματίζουμε εκ νέου τον μικροεπεξεργαστή μας και η συσκευή έχει πλέον βαθμονομηθεί.

## 6.2 Σχολιασμός του τρόπου βαθμονόμησης

Όπως ακριβώς μία γέφυρα Wheatstone χρειάζεται οπωσδήποτε ένα εξάρτημα αναφοράς, έτσι και η δική μας συσκευή χρειάζεται οπωσδήποτε ένα εξάρτημα αναφοράς σε κάθε ταλαντωτή. Τα εξαρτήματα αναφοράς της συσκευής μας είναι τα  $L_1$ ,  $C_{13}$ , και  $C_{14}$ , για του ταλαντωτές 1,2 και 3 αντίστοιχα.

- Ας υποθέσουμε τώρα ότι βρίσκουμε στην αγορά εξαρτήματα με τις τιμές των  $L_1$ ,  $C_{13}$  και  $C_{14}$  και με χαμηλή ανοχή π.χ 1%. Το ερώτημα που τίθεται είναι: « Αν χρησιμοποιήσουμε αυτά τα εξαρτήματα στην συσκευή μας χρειάζεται να κάνουμε βαθμονόμηση;» Εκ πρώτης όψεως και αν εξετάσουμε τις σχέσεις (5), (12) και (25) η απάντηση είναι «όχι». Στην πράξη όμως υπάρχει ένα πρόβλημα που συνοψίζεται στην παρακάτω φράση:

« Παρόλο που γνωρίζουμε με βεβαιότητα 1% την τιμή των εξαρτημάτων αναφοράς την στιγμή που τα προμηθευόμαστε, όταν θα τα συνδέσουμε στο κύκλωμα μας (στο τυπωμένο κύκλωμα) η τιμή τους θα αλλάξει». Αυτό θα γίνει διότι είτε το τυπωμένο, είτε κάποιο γειτονικό εξάρτημα στο τυπωμένο θα εισάγει κάποια παρασιτική χωρητικότητα ή αυτεπαγωγή. *Επομένως η βαθμονόμηση πρέπει απαραίτητως να γίνει.*

- Ας θέσουμε τώρα ένα άλλο ερώτημα. «Πώς επινοήσαμε την διαδικασία της βαθμονόμησης;». Η απάντηση μπορεί να δοθεί από το παρακάτω παράδειγμα.

Ας υποθέτουμε ότι η τιμή για το εξάρτημα αναφοράς  $L_1$  που έχει δηλωθεί στο software είναι η λανθασμένη τιμή  $L_r$  (κάτι που συμβαίνει πάντα πριν τη βαθμονόμηση). Λόγο αυτού του «προβλήματος η συσκευή μας θα μετράει πάντα την εσφαλμένη τιμή  $LL_i$  για κάθε πηνίο πραγματικής τιμής  $L_i$ , που θα συνδεθεί στους τερματικούς ακροδέκτες  $L_x$ . Εφαρμόζοντας την σχέση (12) για την περίπτωση αυτή βρίσκουμε:

$$LL_i = L_r \cdot \left( \frac{F^2}{F_x^2} - 1 \right) \quad (29)$$

Ας υποθέσουμε τώρα ότι η πραγματική τιμή του εξαρτήματος αναφοράς  $L_1$  είναι η  $LL$ . Τότε, εφαρμόζοντας και πάλι την σχέση (12) θα πρέπει να ισχύει:

$$L_i = LL \cdot \left( \frac{F^2}{F_x^2} - 1 \right) \quad (30)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις σχέσεις (28) και (29) βρίσκουμε:

$$LL = L_r \cdot \frac{L_i}{LL_i} = L_r \cdot A \quad (31)$$

Η σχέση (30) δηλώνει ότι μπορούμε να βρούμε την πραγματική τιμή του πηνίου αναφοράς που υπάρχει στο κύκλωμα μας, την στιγμή που



γνωρίζουμε την τιμή  $L_i$ . Στην πραγματικότητα αυτόν τον αλγόριθμο που αναφέραμε μόλις τώρα, εκτελούμε στα βήματα 1-7 της διαδικασίας βαθμονόμησης που περιγράφεται στην παράγραφο 5.1.

- Ας θέσουμε τώρα ένα τελευταίο ερώτημα. Τι χρειάζονται τα βήματα 8 έως 10, στην διαδικασία βαθμονόμησης που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο; Η απάντηση θα δοθεί πάλι μέσα από ένα παράδειγμα:

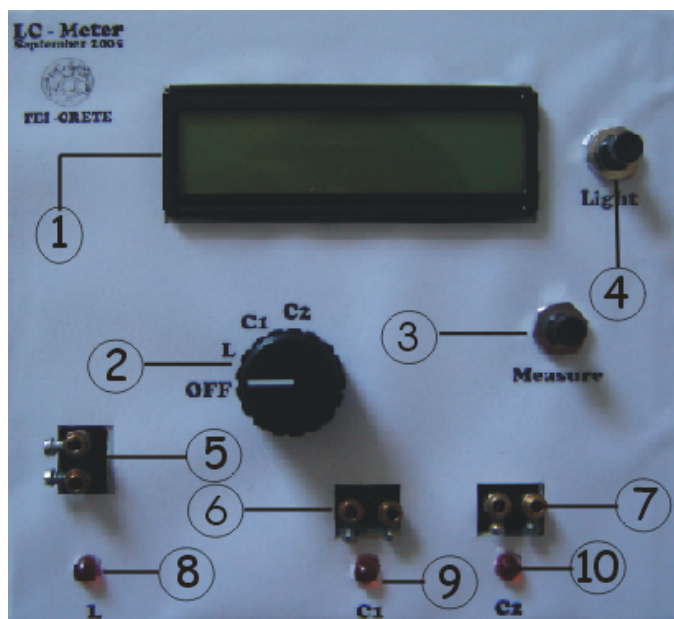
Ας υποθέσουμε ότι πατάμε το πλήκτρο `measure` της συσκευής μας την στιγμή που ο μεταγωγός είναι στη θέση  $C_1$  και δίχως να έχουμε συνδεδεμένο κανένα πυκνωτή στους τερματικούς ακροδέκτες  $C_{x1}$ . Η συσκευή μας τότε πρέπει να μετρήσει χωρητικότητα μηδέν. Στην πράξη όμως αυτό δεν θα γίνει, γιατί οι τερματικοί ακροδέκτες  $C_{x1}$  παρουσιάζουν πάντα κάποια παρασιτική χωρητικότητα της τάξης του 0,1-0,5pF και η συσκευή μας θα μετρήσει αυτή την τιμή της παρασιτικής χωρητικότητας. Πώς θα λύσουμε αυτό το πρόβλημα? Η απάντηση είναι πολύ απλή: Θα δηλώσουμε στο `software` την τιμή της παρασιτικής χωρητικότητας των τερματικών ακροδεκτών και μέσω κάποιας ρουτίνας θα ορίσουμε η παρασιτική αυτή χωρητικότητα να αφαιρείται από την υπολογιζόμενη σε κάθε μέτρηση τιμή (δεδομένου ότι είναι πάντοτε παράλληλα στον εκάστοτε πυκνωτή που μετράμε). Αυτό ακριβώς κάνουμε στα βήματα 9 και 10 της βαθμονόμησης.

Κατά ανάλογο τρόπο επιλύουμε ταυτόχρονα (στο βήμα 8 και 10 της βαθμονόμησης) και το πρόβλημα της παρασιτικής αυτεπαγωγής των τερματικών ακροδεκτών  $L_x$  ( η οποία βρίσκεται σε σειρά με κάθε πηνίο που μετράμε).

*ΜΕΡΟΣ ΕΒΔΟΜΟ*

Εγχειρίδιο χρήσης του LC-meter

## ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ ΧΡΗΣΗΣ



**1. LCD Οθόνη** (HD 44780 based, Character-LCD, V=5V, 2X16).

**2. Μεταγωγός** (Τριπλός τεσσάρων θέσεων, 15 ακροδεκτών, για την μεταγωγή της συσκευής από κατάσταση Off σε κατάσταση μέτρησης αυτεπαγωγής στον ταλαντωτή 1(L), κατάσταση μέτρησης χωρητικότητας στον ταλαντωτή 2 (C1)ή κατάσταση μέτρησης χωρητικότητας στον ταλαντωτή 3)

**3. Measure Button** (Πλήκτρο μέτρησης. Με το πάτημα του measure button γίνεται η αυτοματοποιημένη μέτρηση και

η εμφάνιση της τιμής του στοιχείου στην οθόνη υγρού κρυστάλλου)

**4. Light Button** (Φωτισμός οθόνης)

**5. Υποδοχή Lx** (Μέτρηση πηνίων 0.00μH-150mH)

**6. Υποδοχή C1** (Μέτρηση πυκνωτών 0.00pF-52nF)

**7. Υποδοχή C2** (Μέτρηση πυκνωτών 52nF-500μF)

**8. Led L** (ένδειξη ενεργοποίησης υποδοχής Lx)

**9. Led C1**(ένδειξη ενεργοποίησης υποδοχής Cx1)

**10. Led C2**(ένδειξη ενεργοποίησης υποδοχής Cx2)

### Τρόπος λειτουργίας.



1. Με το άνοιγμα της συσκευής εμφανίζεται στην οθόνη το μήνυμα:

“LC - M E T E R  
Chania.TEI Crete”

2. Τη στιγμή που ο μεταγωγός βρίσκεται στη θέση L, και πατηθεί το measure button αρχίζει η διαδικασία μέτρησης αυτεπαγωγής. Κατά τη διάρκεια της μέτρησης εμφανίζεται το παροδικό μήνυμα

“LC - Meter  
..Resolving L”

και αμέσως μετά η μετρηθείσα τιμή της αυτεπαγωγής. Την ίδια στιγμή, στη δεύτερη γραμμή του Display εμφανίζεται η τιμή Diff. Η Diff είναι η διαφορά της τιμής αυτεπαγωγής που είχε μετρηθεί σε κάποια προηγούμενη στιγμή από τη τρέχουσα. Δηλαδή τιμή Diff=τρέχουσα τιμή – προηγούμενη τιμή. Η τιμή Diff μπορεί να είναι είτε αρνητική είτε θετική. Το πρόσημο εμφανίζεται αμέσως πριν από την συντομογραφική λέξη Diff. Κάπως έτσι δείχνει η οθόνη της συσκευής μας μετά την αποπεράτωση της μέτρησης.

“L= 22.13  $\mu$ H  
-Diff= 1.15  $\mu$ H

ή

“L= 22.13  $\mu$ H  
+Diff= 1.15  $\mu$ H

**3.** Τη στιγμή που ο μεταγωγός βρίσκεται στη θέση C1, και πατηθεί το measure button αρχίζει η διαδικασία μέτρησης χωρητικότητας. Κατά τη διάρκεια της μέτρησης εμφανίζεται το παροδικό μήνυμα

“LC - Meter  
..Resolving C1”

και αμέσως μετά η μετρηθείσα τιμή της χωρητικότητας που είναι συνδεδεμένη στους τερματικούς ακροδέκτες C1 . Την ίδια στιγμή, στη δεύτερη γραμμή του Display εμφανίζεται η τιμή Diff. Η Diff είναι η διαφορά της τιμής αυτεπαγωγής που είχε μετρηθεί σε κάποια προηγούμενη στιγμή από τη τρέχουσα. Δηλαδή τιμή Diff=τρέχουσα τιμή – προηγούμενη τιμή. Η τιμή Diff μπορεί να είναι είτε αρνητική είτε θετική. Το πρόσημο εμφανίζεται αμέσως πριν από την συντομογραφική λέξη Diff. Κάπως έτσι δείχνει η οθόνη της συσκευής μας μετά την αποπεράτωση της μέτρησης

“C1= 13.03 pF  
-Diff= 1.34 pF”

ή

“C1= 13.46 pF  
+Diff= 1.34 pF

**4.** Τη στιγμή που ο μεταγωγός βρίσκεται στη θέση C2, και πατηθεί το measure button αρχίζει η διαδικασία μέτρησης χωρητικότητας. Κατά τη διάρκεια της μέτρησης εμφανίζεται το παροδικό μήνυμα

“LC - Meter  
..Resolving C2”

και αμέσως μετά η μετρηθείσα τιμή της χωρητικότητας που είναι συνδεδεμένη στους τερματικούς ακροδέκτες C2. Την ίδια στιγμή, στη δεύτερη γραμμή του Display εμφανίζεται η τιμή Diff. Η Diff είναι η διαφορά της τιμής αυτεπαγωγής που είχε μετρηθεί σε κάποια προηγούμενη στιγμή από τη τρέχουσα. Δηλαδή τιμή Diff=τρέχουσα τιμή – προηγούμενη τιμή. Η τιμή Diff μπορεί να είναι είτε αρνητική είτε θετική. Το πρόσημο εμφανίζεται αμέσως πριν από την συντομογραφική λέξη Diff. Κάπως έτσι δείχνει η οθόνη της συσκευής μας μετά την αποπεράτωση της μέτρησης

“C2= 13.03 pF  
-Diff= 1.34 pF”

ή

“C2= 13.46 pF  
+Diff= 1.34 pF”

## **Μηνύματα Display**

### **Μήνυμα 1**

“LC - M E T E R  
Chania.TEI Crete”

Εμφανίζεται με το άνοιγμα της συσκευής

### **Μήνυμα 2**

“L = out of scope  
Can not resolve!”

Το παραπάνω μήνυμα μας πληροφορεί ότι η αυτεπαγωγή του εξαρτήματος Lx που βρίσκεται στους τερματικούς ακροδέκτες L βρίσκεται εκτός ορίων μέτρησης (το ίδιο μήνυμα εμφανίζεται όταν κάποιος επιχειρήσει να κάνει μέτρηση τη στιγμή που στους ακροδέκτες L δεν έχει τοποθετηθεί κανένα εξάρτημα) .

### **Μήνυμα 3**

“out of C1 scope!  
Try on C2 mode!”

Το παραπάνω μήνυμα μας πληροφορεί το χρήστη ότι η χωρητικότητα του εξαρτήματος που είναι συνδεδεμένο στους τερματικούς ακροδέκτες C1 βρίσκεται εκτός ορίων μέτρησης του C1. Προτρέπει το χρήστη να επιχειρήσει να μετρήσει το ίδιο εξάρτημα στους τερματικούς ακροδέκτες C2.

### **Μήνυμα 4**

“out of C2 scope!  
Try on C1 mode!”

Το παραπάνω μήνυμα μας πληροφορεί το χρήστη ότι η χωρητικότητα του εξαρτήματος που είναι συνδεδεμένο στους τερματικούς ακροδέκτες C2 βρίσκεται εκτός ορίων μέτρησης του C2. Προτρέπει το χρήστη να επιχειρήσει να μετρήσει το ίδιο εξάρτημα στους τερματικούς ακροδέκτες C1.

### **Μήνυμα 5**

“out of C2 scope!  
Can not resolve!”

Το παραπάνω μήνυμα μας πληροφορεί το χρήστη ότι η χωρητικότητα του εξαρτήματος που είναι συνδεδεμένο στους τερματικούς ακροδέκτες C2 βρίσκεται εκτός ορίων μέτρησης του C2 και είναι αδύνατος ο υπολογισμός. Το μήνυμα εμφανίζεται στη περίπτωση που η χωρητικότητα του πυκνωτή είναι πάνω από 500μF.

1. Όταν θέλουμε να μετρήσουμε πυκνωτές με πολικότητα πρέπει πάντα ο αρνητικός ακροδέκτης του εξαρτήματος να είναι συνδεδεμένος στον ακροδέκτη που σημειώνεται με πλην πάνω στη συσκευή
2. Η ακρίβεια της μέτρησης εξαρτάται από το παράγοντα ποιότητας(quality factor-Q)

### Τεχνικά χαρακτηριστικά

<b>Τάση τροφοδοσίας</b>	<b>7.5-14V</b>
<b>Ρεύμα stand by</b>	<b>25mA</b>
<b>Περιοχή μέτρησης L</b>	<b>0-150mH</b>
<b>Περιοχή μέτρησης C1</b>	<b>0-52nF</b>
<b>Περιοχή μέτρησης C2</b>	<b>50nF-500μF</b>
<b>Οθόνη</b>	<b>2X16 Χαρακτήρες</b>

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

[1] Winstar LCD WP1602D

[2] Microchip "PIC18XX2 Datasheet"

[3] Winstar LCD WP1602D

[4] LM111/LM211/LM311 Voltage Comparator

[5] ΚΑΡΟΥΜΠΑΛΟΥ Κ. και ΜΠΟΒΙΑΤΣΟΥ Δ. : "Ταλαντωτές" (Αθηνά 1979)

[6] LM555 Timer

[7] Microchip "MPLAB IDE v7.01"

[8] Protel DXP

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΔΙΣΚΟΥ

1. Winstar LCD WP1602D
2. Microchip "PIC18XX2 Datasheet"
3. LM111/LM211/LM311 Voltage Comparator Datasheet
4. LM555 Timer Datasheet
5. Microchip "MPLAB IDE v7.01"
6. Λογισμικό
7. Φωτογραφικό υλικό
8. Θεωρητικό μέρος