



ΔΙΕΘΝΕΣ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Ελεγκτής χρωματικής απόκλισης

Colour shift controller

**Του φοιτητή:**  
**Παλλάκη Νικολάου**  
**Αρ. Μητρώου: 515110**

**Επιβλέπων:**  
**Σπάσος Μιχαήλ**

**ΜΑΪΟΣ 2022**

Τίτλος Δ.Ε. Ελεγκτής χρωματικής απόκλισης

Κωδικός Δ.Ε. 20246

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: Νικόλαος Παλτάκης

Όνοματεπώνυμο εισηγητή : Μιχαήλ Σπάσος

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 10/11/2020

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 28/5/2022

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

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

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

## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την σχεδίαση και την υλοποίηση ενός ηλεκτρονικού συστήματος αναγνώρισης χρώματος με την χρήση αισθητήρα χρώματος. Ο στόχος είναι η αναλυτική περιγραφή ενός τέτοιου συστήματος και η ανάδειξή του ως μια αξιόπιστη μορφή αναγνώριση χρώματος. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε:

- Αισθητήρας χρώματος, στον οποίο η συχνότητα που δίνει στην έξοδο εξαρτάται από το πόσο φωτεινό (λαμπρό) είναι το χρώμα που δέχεται στην είσοδο.
- Βαθμίδα βρόχου κλειδωμένης φάσης (PLL), όπου η κάθε αύξηση ή μείωση της συχνότητας μεταφράζεται σε αύξηση ή μείωση της συνεχούς τάσης εξόδου.
- Βαθυπερατό φίλτρο 2<sup>ης</sup> τάξης όπου γίνεται η εξομάλυνση της τάσης.
- Μικροελεγκτής (PIC18F4550) όπου γίνεται η μετατροπή από αναλογικό σε ψηφιακό μέσου του μετατροπέα ADC 10bit και μέσω προγράμματος εμφανίζεται σε μια οθόνη LCD το χρώμα που αναγνωρίστηκε. Επίσης γίνεται και η ενεργοποίηση των ρελέ με την χρήση του διακόπτη τριών θέσεων.

## Περίληψη

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αποτελείται από τρία μέρη. Στο πρώτο μέρος δίνεται η βασική θεωρία του χρώματος. Στην αρχή γίνεται αναφορά στον ορισμό του χρώματος καθώς και στα θεμελιώδη στοιχεία. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι 2 τρόποι δημιουργίας χρωμάτων, η οποία είναι η προσθετική διαδικασία και η αφαιρετική. Ακόμη, καταγράφονται τα χρωματικά μοντέλα (RGB, CMY, RYB) από τα οποία το πιο διαδεδομένο είναι το RGB. Έπειτα, γίνεται ανάλυση για τις συσκευές μέτρησης χρώματος όπου οι πιο σημαντικές είναι ο φασματογράφος, τα χρωματόμετρα και η χρήση αισθητήρα.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας περιγράφεται η διάταξη αναγνώρισης χρώματος και γίνεται αναλυτική περιγραφή των βαθμίδων που χρησιμοποιήθηκαν. Γίνεται αναλυτική περιγραφή του αισθητήρα χρώματος, του βρόχου κλειδωμένης φάσης (PLL), των φίλτρων, του μικροελεγκτή και της μονάδας απεικόνισης.

Στο τρίτο μέρος παρατίθεται η θεωρητική προσέγγιση του κυκλώματος, τα χρώματα τα οποία αναγνωρίζονται από το κύκλωμα, καθώς και ο κώδικας που είναι ενσωματωμένος στη μνήμη του μικροελεγκτή.

Τέλος, για επαλήθευση συνδέουμε απευθείας τον αισθητήρα σε ένα μικροελεγκτή Arduino και από τα αποτελέσματα καταλήξαμε ότι με την χρήση βαθμίδας PLL βελτιώνουμε πάρα πολύ τις ενδείξεις για την αναγνώριση κάθε χρώματος.

## Abstract

This thesis consists of three parts. The first part gives the basic theory of color. At first reference is made to the definition of color as well as to the fundamental elements. Following, two ways to create colors are presented, which are the prosthetic and the subtractive. The color models (RGB, CMY, RYB) are also recorded, the most common of which is RGB. Next, color measurement devices are analyzed where the most important are spectrographs, colorimeters and sensor use.

The second part describes the color recognition device and gives a detailed description of the steps used. A detailed description of the color sensor, locked phase loop (PLL), filters, microcontroller and imaging unit is provided.

The third part presents the theoretical approach of the circuit, the colors recognized by the circuit, as well as the code embedded in the microcontroller's memory.

Finally, for verification, we connect the sensor directly to an Arduino microcontroller, and the results show that using a PLL gradient greatly improves the recognition of each color.

## Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	7
1.1 Θεμελιώδη στοιχεία χρώματος .....	7
1.2 Δημιουργία χρωμάτων .....	8
1.3 Ειδη χρωμάτων.....	8
1.4 Ιστορικά στοιχεία .....	9
1.5 Χρωματικά μοντέλα.....	11
1.5.1 Χρωματικό μοντέλο RGB .....	11
1.5.2 Χρωματικό μοντέλο CMY - CMYK.....	12
1.5.3 Χρωματικό μοντέλο RYB .....	13
1.6 Συσκευές Μέτρησης Χρώματος.....	14
1.6.1 Φασματογράφος .....	14
1.6.2 Χρωματόμετρα .....	16
1.6.3 Χρήση Αισθητήρα .....	17
2. Κύκλωμα .....	18
2.1 Γενική Περιγραφή.....	18
2.2 Αισθητήρας χρώματος TCS3200 .....	20
2.2.1 Εισαγωγή .....	20
2.2.2 Προδιαγραφές.....	20
2.2.3 Πώς λειτουργεί ο αισθητήρας TCS3200 .....	20
2.2.4 Pinout Αισθητήρα .....	21
2.2.5 Επιλογή φίλτρου .....	22
2.2.6 Κλίμακα συχνότητας.....	23
2.3 Βρόχος κλειδωμένης φάσης (PLL) .....	24
2.3.1 Εισαγωγή .....	24
2.3.2 Βαθμίδες που αποτελούν το PLL .....	25
2.3.3 Ταλαντωτής ελεγχόμενος από τάση (VCO).....	27
2.3.4 Σχεδιασμός PLL .....	28
2.4 Φίλτρα.....	29
2.4.1 Παθητικά και ενεργά φίλτρα .....	30
2.4.2 Κατηγορίες φίλτρων .....	30
2.4.3 Οικογένειες φίλτρων .....	34
2.5 Μικροελεγκτής .....	37
2.5.1 Εισαγωγή .....	37
2.5.2 Ιστορική Αναδρομή.....	38

3 Θεωρητική Προσέγγιση Κυκλώματος.....	40
3.1 Υπολογισμός PLL.....	40
3.2 Βαθυπερατό φίλτρο 2 <sup>ης</sup> τάξης.....	41
3.3 Κύκλωμα PLL – PSPICE .....	43
3.3.1 Αποχρώσεις πράσινου χρώματος .....	43
3.3.2 Αποχρώσεις μπλε χρώματος.....	43
3.3.3 Αποχρώσεις κοκκινου χρώματος .....	45
3.4 Μικροελεγκτής PIC18F4550 .....	47
3.5 Μονάδα Απεικόνισης .....	48
3.6 Πρόγραμμα μικροελεγκτή .....	48
4. Τελικό Κύκλωμα – Αποτελέσματα.....	58
5. Συμπεράσματα .....	65
6. Μελλοντικές αναβαθμίσεις.....	67
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	68

## 1. Εισαγωγή

Ένας επίσημος και γενικός ορισμός του χρώματος είναι ο παρακάτω : «Χρώμα είναι η αίσθηση που δημιουργείται στο μάτι (οφθαλμό) κατά την αντίληψη φωτεινής ακτινοβολίας συγκεκριμένου μήκους κύματος, είτε εξ αυτής της φύσεώς του είτε εξ ανάκλασης από επιφάνεια που παρατηρείται, π.χ. το λευκό, το κίτρινο, το μπλε του ουρανού, κ.λπ.» Το χρώμα είναι παράγωγο του φωτός και κατά συνέπεια, για να αντιληφθούμε ένα χρώμα, πρέπει να υπάρχει μια πηγή φωτός. Το φυσικό φως έρχεται από τον ήλιο και είναι καθαρό λευκό. Όλες οι άλλες πηγές φωτός είναι τεχνητές.

### 1.1 Θεμελιώδη στοιχεία χρώματος

Το φως είναι ένα είδος ακτινοβολίας με την μορφή ηλεκτρομαγνητικών δονήσεων, όμοιων με τα κύματα που προκαλεί ο ήχος. Το ανθρώπινο μάτι ανιχνεύει μεγάλο εύρος χρωμάτων. Έχει τη δυνατότητα να καταγράφει αυτά τα κύματα ενέργειας και στη συνέχεια ο εγκέφαλος τα "μεταφράζει" σε χρώμα. Μπορούμε να διακρίνουμε μόνο ένα μέρος αυτής της ακτινοβολίας κάτι το οποίο οφείλεται στο ότι οι ακτίνες κάθε χρώματος έχουν συγκεκριμένο μήκος κύματος. Το μέρος του φάσματος το οποίο μπορεί να αντιληφθεί το ανθρώπινο μάτι ονομάζεται "ορατό μέρος του φάσματος" με μήκος κύματος 400 - 700 nm (μπλε – κόκκινο). Ολόκληρο το γνωστό ηλεκτρομαγνητικό φάσμα κυμαίνεται από 0.01 nm στο ένα άκρο της κλίμακας, όπου βρίσκονται οι ακτίνες γάμα, μέχρι τα 0.1 m στο άλλο άκρο, όπου συναντάμε τα ραδιοκύματα.

Κάποια αντικείμενα είναι *χρωματιστά* γιατί απορροφούν κάποια χρώματα και ανακλούν κάποια άλλα, δηλαδή το χρώμα που αντιλαμβανόμαστε από ένα αντικείμενο εξαρτάται από το συνδυασμό των μηκών κύματος του φωτός που ανακλούνται (αυτά δηλαδή που δεν απορροφούνται από το αντικείμενο). Ένα σώμα που αντανακλά με τον ίδιο τρόπο όλα τα μήκη κύματος εμφανίζεται λευκό. Αντίθετα, το γρασίδι για παράδειγμα, ανακλά μόνο το πράσινο χρώμα και για το λόγο αυτό το αντιλαμβανόμαστε ως πράσινο.

Όταν μια δέσμη λευκού φωτός περάσει μέσα από ένα πρίσμα, εμφανίζεται ένα φάσμα διαφορετικών χρωμάτων: Κόκκινο, Πορτοκαλί, Κίτρινο, Πράσινο, Μπλε και Ιώδες (Μωβ). Αυτό συμβαίνει διότι το πρίσμα διαθλά το λευκό φως, επιτρέποντας την διάσπασή του στα ξεχωριστά συστατικά του (Νόμος του Snell). Ένα παρόμοιο φαινόμενο είναι το ουράνιο τόξο. Όταν βρέχει, οι σταγόνες του νερού στον αέρα διαθλούν το ηλιακό φως και σε συνδυασμό με την καμπυλότητα της γης, δημιουργούν αυτό το υπέροχο τοξωτό φάσμα χρωμάτων.[9]

## 1.2 Δημιουργία χρωμάτων

Για τη δημιουργία χρωμάτων ακολουθούνται δύο διαδικασίες η προσθετική διαδικασία και η αφαιρετική διαδικασία. Η μεν πρώτη αφορά δημιουργία χρωμάτων με ανάμειξη έγχρωμων φωτεινών ακτινών η δε δεύτερη δημιουργία χρωμάτων με ανάμειξη βαφών.

Συνεπώς, το φως μπορεί να επηρεασθεί από δυο σημαντικούς κανόνες της φύσης, τον προσθετικό και αφαιρετικό σχηματισμό χρώματος. Προσθετικό χρώμα είναι απλά αυτό που παράγεται απευθείας από μια πηγή φωτός, όπως π.χ. ο ήλιος ή ένας ηλεκτρικός λαμπτήρας. Όταν όμως, το φως πέφτει πάνω σ' ένα αντικείμενο, επηρεάζεται από τις ιδιότητες ή τους χρωματικούς παράγοντές του.

Προσθετική διαδικασία: Χαρακτηρίζεται η ανάμειξη φωτεινών ακτινών των τριών βασικών χρωμάτων κόκκινου, πράσινου και μπλε εκ της οποίας παράγονται άλλα χρώματα, π.χ. ακτίνες κόκκινες και πράσινες δίνουν κίτρινο χρώμα, ενώ αν οι ακτίνες και των τριών παραπάνω βασικών χρωμάτων αναμιχθούν, σε ίσες αναλογίες, δίνουν χρώμα λευκό. Οι οθόνες των εγχρώμων τηλεοράσεων φέρουν χιλιάδες κουκκίδες ή λωρίδες που εκπέμπουν τα τρία αυτά βασικά χρώματα τα οποία συνδυαζόμενα παρατηρούνται (από τον οφθαλμό) ως έγχρωμη εικόνα.

Αφαιρετική διαδικασία: Χαρακτηρίζεται η ανάμειξη βαφών για δημιουργία χρωμάτων. Οι μπογιές, οι διάφορες βαφές και τα έγχρωμα μελάνια απορροφούν κάποια χρώματα από το λευκό φως, ενώ το δικό τους χρώμα είναι ο συνδυασμός των χρωμάτων που δεν απορροφήθηκαν. Τα τρία βασικά χρώματα στη περίπτωση της αφαιρετικής διαδικασίας είναι: το κίτρινο, το κυανό και η ματζέντα (βιολετί). Για παράδειγμα το κίτρινο και το βιολετί δίνουν κόκκινο. Μια κίτρινη βαφή απορροφά τα μπλε μήκη κύματος ενώ αντανακλά τα κόκκινα και τα πράσινα που συνδυαζόμενα δίνουν το κίτρινο χρώμα. Αν σε αυτό το χρώμα προστεθεί ματζέντα βαφή θα απορροφηθούν και τα πράσινα μήκη κύματος με συνέπεια να φαίνεται μόνο το κόκκινο.[14]

## 1.3 Είδη χρωμάτων

Υπάρχουν τρία είδη χρωμάτων : τα βασικά χρώματα, τα δευτερεύοντα και τα συμπληρωματικά χρώματα.

- Τα βασικά χρώματα είναι αυτά τα οποία δεν προκύπτουν από κάποια ανάμειξη άλλων χρωμάτων και όταν συνδυαστούν μεταξύ τους μπορούν να παράγουν όλους τους δυνατούς συνδυασμούς.
- Τα δευτερεύοντα χρώματα είναι αυτά που προκύπτουν από την ανάμειξη δύο βασικών χρωμάτων
- Τα συμπληρωματικά αυτά τα οποία δίνουν ως αποτέλεσμα το λευκό χρώμα με την προσθετική διαδικασία και το μαύρο με την αφαιρετική διαδικασία.

## 1.4 Ιστορικά στοιχεία

Η αναζήτηση του τι ακριβώς είναι το χρώμα και πώς λειτουργεί έχει ιστορία πολλών αιώνων, στη διάρκεια των οποίων αναπτύχθηκαν διάφορες θεωρίες και χρωματικά μοντέλα προκειμένου να δοθεί μια εξήγηση για τη φύση του χρώματος.

Υπό αντικειμενική εξέταση το χρώμα μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα κυματικό φαινόμενο. Από ψυχο/φυσιολογική άποψη θεωρείται ως το αίτιο που διεγείρει τον αμφιβληστροειδή χιτώνα του οφθαλμού. Συνεπώς υπό την άποψη αυτή, η έννοια του χρώματος είναι καθαρά υποκειμενική και συνδέεται με ιδιάζοντα χαρακτηριστικά αισθημάτων που προέρχονται από φωτεινά ερεθίσματα, χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτού είναι η επιλογή του χρώματος ή χρωμάτων στις σημαίες των Χωρών.

Παρά τη γνώμη φιλοσόφων κατά την αρχαιότητα το χρώμα δεν αποτελεί ειδική και βασική ιδιότητα των σωμάτων. Συγκεκριμένα ο Επίκουρος είναι από τους πρώτους που διαπίστωσε ότι ο χρωματισμός των αντικειμένων ποικίλλει ανάλογα με την ένταση του φωτός που φωτίζει αυτά, όπου και συμπεράνε πως τα σώματα δεν έχουν το ίδιο πάντα χρώμα. Οι πρώτες γνωστές μελέτες για το χρώμα έγιναν στην αρχαία Ελλάδα από τον Αριστοτέλη, ο οποίος ανέπτυξε την θεωρία πως το χρώμα υπήρχε με την μορφή ακτινών που έστελναν οι Θεοί από τον ουρανό. Η θεωρία του δεν αμφισβητήθηκε μέχρι την Αναγέννηση, οπότε και αναπτύχθηκαν πιο εξελιγμένα χρωματικά μοντέλα από τους Acuilonius και Sigfrid Forsius. Το σύστημα του Acuilonius ήταν η πρώτη προσπάθεια να οριστούν όλα τα χρώματα και βασιζόταν στις παρατηρήσεις του στα χρώματα που αλλάζουν στον ουρανό από την δύση μέχρι την ανατολή.[11]



Εικόνα 1.1: Χρωματικό μοντέλο Acuilonius

Το 1660, ο Isaac Newton ανέπτυξε ένα πιο λογικό χρωματικό μοντέλο βασιζόμενος στις επιστημονικές του παρατηρήσεις από πειράματα. Ο Άγγλος αυτός φυσικός απέδειξε πως το λευκό φως (ηλιακό) μπορεί να αναλυθεί σε στοιχειώδεις φωτεινές ακτίνες που περιέχουν διάφορα χρώματα. Χρησιμοποιώντας ένα γυάλινο πρίσμα ο Newton παρατήρησε όταν μια δέσμη ηλιακού φωτός διαπεράσει το γυάλινο πρίσμα, η προκύπτουσα δέσμη δεν ήταν άσπρη αλλά αποτελείται από ένα συνεχές φάσμα χρωμάτων με μια διακύμανση που έχει στο ένα άκρο το ιώδες και στο άλλο το κόκκινο χρώμα, είχε δηλαδή τα χρώματα του ουράνιου τόξου. Το φάσμα που προκύπτει αποτελείται από έξι διακριτές περιοχές : ιώδες, μπλε, πράσινο, κίτρινο, πορτοκαλί και κόκκινο. Το πολύχρωμο αυτό είδωλο ονομάστηκε ηλιακό φάσμα και τα επτά χρώματά του "φασματικά" ή "χρώματα του φάσματος". Η μετάβαση από το ένα χρώμα στο άλλο δεν γίνεται ακαριαία αλλά έχουμε μια ομαλή μετάβαση. Βάση αυτών των παρατηρήσεων ο Newton δημιούργησε το δικό του χρωματικό μοντέλο (χρωματικός τροχός).[11]



Εικόνα 1.2: Χρωματικό μοντέλο Newton

Το επόμενο μεγάλο άλμα στην θεωρία χρωμάτων πραγματοποιήθηκε στις αρχές του 1800 όταν ο Johannes Wolfgang Goethe αμφισβήτησε το μοντέλο του Newton και ανέπτυξε το δικό του μοντέλο. Οι μελέτες του Newton για το χρώμα, βασιζόνταν σε επιστημονικές ενδείξεις, ενώ ο Goethe ενδιαφερόταν περισσότερο για τις ψυχολογικές επιπτώσεις του χρώματος. Ήθελε να ερευνήσει αν και κατά πόσο υπήρχαν κανόνες στην καλλιτεχνική χρήση των χρωμάτων. Αρχικά σκόπευε να δημιουργήσει ένα βελτιωμένο χρωματικό τροχό, αλλά στη συνέχεια ο Goethe διαπίστωσε πως οι ιδέες του μπορούσαν να περιγραφούν καλύτερα από ένα ισόπλευρο τρίγωνο.

Την ίδια περίπου εποχή ο Phillip Otto Runge ανέπτυξε ένα τρισδιάστατο χρωματικό μοντέλο που είχε την μορφή σφαίρας. Η θεωρία του ήταν επαναστατική για την εποχή του, και προσπαθούσε να κατατάξει τα χρώματα σύμφωνα με την απόχρωση (hue), το ποσοστό λευκού και μαύρου. Στα μοντέλα των σφαιρών του Runge, οι αποχρώσεις γίνονται πιο ανοιχτόχρωμες στον ένα πόλο της σφαίρας ενώ στον άλλο γίνονται πιο σκούρες.

Στη πραγματικότητα το ηλιακό φως δεν περιλαμβάνει μόνο τα επτά κύρια χρώματα αλλά και άπειρα άλλα, ενδιάμεσα χρώματα, που η μετάβαση από το ένα στο άλλο γίνεται βαθμιαία. Ήδη από το 1865 ο Όμπερτ υπολόγισε τις αποχρώσεις του φάσματος σε χίλιες.

Γενικά τα χρώματα του φάσματος είναι απλά καθόσον καθένα από αυτά δεν μπορεί να αναλυθεί σε άλλα χρώματα. Ο Νεύτων υποστήριξε πως η ανάλυση του λευκού φωτός προέρχεται από την διαφορετική εκτροπή του κάθε χρώματος, ανάλογα με την τιμή του δείκτη διάθλασης. Συνεπώς, υπάρχουν τόσα χρώματα στο ηλιακό φάσμα όσες και οι τιμές διάθλασης, άρα άπειρα.

Το 1872 ο Σκοτσέζος φυσικός James Clerk Maxwell, μετά τις μελέτες του για την ηλεκτρομαγνητική θεωρία του φωτός, ανέπτυξε ένα γράφημα που είχε τη μορφή ενός ισόπλευρου τριγώνου. Το τρίγωνο του μοιάζει πολύ με του Goethe και τα δύο είναι ισόπλευρα και επιλέγουν τρία βασικά χρώματα από τα οποία δημιουργούνται τα εσωτερικά χρώματα του τριγώνου. Επιπλέον όμως ο Maxwell πίστευε πως μπορούσε να δημιουργήσει όλα τα γνωστά χρώματα μέσα στο τρίγωνό του και επέλεξε ως βασικά χρώματα, το κόκκινο, το πράσινο και το μπλε.

Το 1915, ο Albert H. Munsell, ένας Αμερικάνος καθηγητής τέχνης, χρησιμοποίησε την δουλειά του Runge σαν βάση για την δημιουργία του δικού του τρισδιάστατου χρωματικού μοντέλου. Αρχίζει με την σφαίρα του Runge αλλά χρησιμοποίησε και δύο σημαντικές παρατηρήσεις που είχε κάνει ως ζωγράφος. Η πρώτη ήταν πως οι καθαρές αποχρώσεις-που είχε χρησιμοποιήσει ο Runge διαφέρουν ως προς τον βαθμό φωτεινότητας, και κατά συνέπεια όλες οι καθαρές αποχρώσεις (κόκκινο, κίτρινο, πράσινο, βιολετί) δεν θα έπρεπε να είναι στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο. Η δεύτερη παρατήρηση ήταν πως ορισμένα χρώματα είναι πιο ζοηρά (κόκκινο) από κάποια άλλα (πράσινο) και κατά συνέπεια θα πρέπει να είναι πιο μακριά από τον άξονα. Αυτές οι παρατηρήσεις ώθησαν τον Munsell να

δημιουργήσει ένα χρωματικό μοντέλο με ασύμμετρο και περίεργο σχήμα. Το μοντέλο του Munsell παραμένει εξαιρετικά χρήσιμο για κατασκευαστές χρωμάτων, καλλιτέχνες και σχεδιαστές.

Το 1931, έγινε μια προσπάθεια να δημιουργηθεί ένα παγκόσμιο πρότυπο για την μέτρηση του χρώματος από την *Commission Internationale de l' Eclairage* (CIE). Έτσι δημιουργήθηκε μια παραλλαγή του τριγώνου του Maxwell επιλέγοντας ένα ορισμένο κόκκινο, πράσινο και μπλε από τα οποία και δημιουργούνται τα υπόλοιπα χρώματα. Το αποτέλεσμα έγινε γνωστό ως ο χάρτης χρωμάτων του CIE. Η CIE για λόγους τυποποίησης καθόρισε τις ακόλουθες τιμές για τα τρία βασικά χρώματα:

- Μπλέ = 435.8 nm
- Πράσινο=546.1 nm
- Κόκκινο=700 nm

## 1.5 Χρωματικά μοντέλα

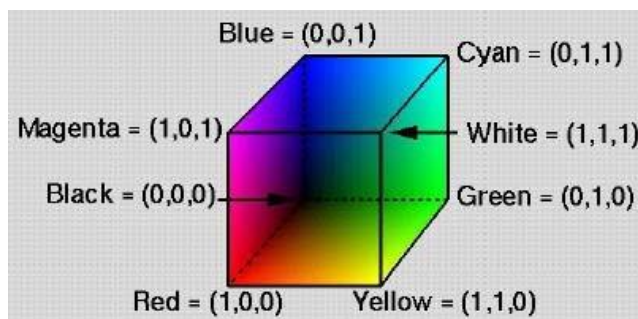
Για την περιγραφή και χρήση των χρωμάτων έχουν αναπτυχθεί διάφορες προσεγγίσεις περιγραφής τους, τα «Χρωματικά μοντέλα». Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούν μεθόδους παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιεί το μάτι. Πιο συγκεκριμένα, αναλύουν/συνθέτουν την εικόνα σε αρκετά μικρά ομοιόμορφα στοιχεία, τα εικονοστοιχεία (pixels), με βάση κάποιες μεθόδους. Τα επιμέρους αυτά στοιχεία θεωρούνται ομοιόμορφα. Συνήθως αποτελούνται από ένα χρώμα ή τον συνδυασμό κάποιων λίγων, των βασικών του κάθε μοντέλου. Έτσι προσεγγίζουν αρκετά την εικόνα που βλέπουμε, με διαφορετική ακρίβεια το καθένα. Τα χρώματα αυτά και οι μέθοδοι διαφέρουν από μοντέλο σε μοντέλο. Τα βασικά χρωματικά μοντέλα (τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω) είναι τα εξής : το χρωματικό μοντέλο RGB, το μοντέλο CMYK και το μοντέλο RYB.

### 1.5.1 Χρωματικό μοντέλο RGB

Η ονομασία του μοντέλου αυτού προέρχεται από τις έξεις Red Green Blue (Κόκκινο Πράσινο Μπλε) τα οποία θεωρούνται και ως τα βασικά χρώματα. Με τα βασικά αυτά χρώματα έχει δημιουργηθεί το αυτό χρωματικό μοντέλο με το οποίο μπορεί να γίνει η κωδικοποίηση όλων των χρωμάτων που εμφανίζονται σε μία οθόνη. Στην 8bit έκδοση του χρωματικού αυτού μοντέλου κάθε χρώμα μπορεί να παρασταθεί με μία τριάδα αριθμών από 0 έως 255. Το μοντέλο βασίζεται στο γεγονός ότι όταν μία οθόνη δεν εκπέμπει φως εμφανίζεται μαύρη. Τα υπόλοιπα χρώματα δημιουργούνται με υπέρθεση των τριών βασικών με συγκεκριμένη αναλογία. Τα βασικά, τα δευτερογενή χρώματα και μερικά παραδείγματα δίνονται παρακάτω στην 8bit αυτή έκδοση του μοντέλου:

- Μαύρο: (0,0,0)
- Λευκό: (255,255,255)
- Κόκκινο: (255,0,0)
- Πράσινο: (0,255,0)
- Μπλέ: (0,0,255)
- Κίτρινο: (255,255,0)
- Γαλάζιο: (0,255,255)
- Μωβ (Magenta): (255,0,255)

Το μοντέλο αυτό μπορεί να παρασταθεί με έναν κύβο χρωμάτων σε ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Στην αρχή των αξόνων είναι η κορυφή του κύβου που αντιστοιχεί στο μαύρο χρώμα, ενώ στις κορυφές του κύβου που βρίσκονται πάνω στους άξονες βρίσκονται τα βασικά χρώματα (Κόκκινο, Πράσινο, Μπλε). Τα δευτερογενή χρώματα βρίσκονται στις τρεις κορυφές του κύβου που βρίσκονται απέναντι από τα αντίστοιχα βασικά χρώματα και στην κορυφή απέναντι από το μαύρο βρίσκεται το λευκό. Κάθε χρώμα στο σύστημα αυτό προσδιορίζεται από ένα σημείο στον κύβο με τρεις συντεταγμένες. Στη διαγώνιο μεταξύ μαύρου και λευκού βρίσκονται όλες οι αποχρώσεις του γκρι.[13]



Εικόνα 1.3: Χρωματική κατανομή των χρωμάτων στον κύβο RGB

### 1.5.2 Χρωματικό μοντέλο CMY - CMYK

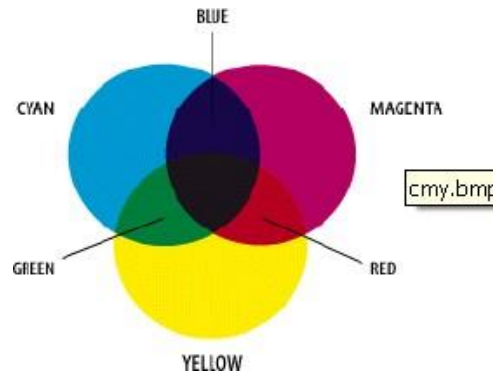
Στην εκτύπωση των εντύπων χρησιμοποιείται ευρέως το σύστημα CMY που είναι συμπληρωματικό μοντέλο του RGB. Τα τρία βασικά χρώματα στο CMY είναι: Γαλάζιο (Cyan) – Ματζέντα (Magenta) – Κίτρινο (Yellow). Με τα τρία αυτά χρώματα δημιουργούνται τα δευτερογενή Κόκκινο – Πράσινο – Μπλε ως εξής:

- Κόκκινο: Ματζέντα (Magenta) + Κίτρινο
- Πράσινο: Κίτρινο + Γαλάζιο
- Μπλέ: Γαλάζιο + Ματζέντα (Magenta)

Το μοντέλο αυτό βασίζεται στο γεγονός ότι το υπόβαθρο της εκτύπωσης είναι το λευκό χαρτί που ανακλά όλα τα χρώματα (μήκη κύματος). Κάθε βασικό χρώμα που προστίθεται με ένα μελάνι απορροφά ορισμένα χρώματα και αποδίδει τα υπόλοιπα. Για παράδειγμα το κίτρινο μελάνι απορροφά το μπλε χρώμα και αφήνει το πράσινο και το κόκκινο να ανακλαστεί. Εδώ ο συνδυασμός των τριών βασικών χρωμάτων δίνει το μαύρο χρώμα (πλήρης απορρόφηση των ακτινοβολιών). Μαύρο χρώμα επίσης προκύπτει από το συνδυασμό ενός βασικού και του αντιθέτου του δευτερογενούς:

- Μαύρο: Γαλάζιο + Ματζέντα (Magenta) + Κίτρινο
- Μαύρο: Γαλάζιο + Κόκκινο
- Μαύρο: Ματζέντα (Magenta) + Πράσινο
- Μαύρο: Κίτρινο + Μπλέ

Τα μελάνια όμως από τη φύση τους δεν μπορούν να αποδώσουν συγκεκριμένα μήκη κύματος – χρώματα (όπως τα pixels μίας οθόνης) αλλά μία ευρεία περιοχή του χρωματικού φάσματος. Το αποτέλεσμα είναι συνδυασμός των τριών βασικών χρωμάτων να δίνει ένα καφετί χρώμα αντί για το μαύρο. Για το λόγο αυτό προστέθηκε στο μοντέλο CMY και το μαύρο μελάνι με αποτέλεσμα να προκύψει το χρωματικό μοντέλο CMYK (Cyan – Magenta – Yellow – Black). Πρακτικά στην εκτύπωση δεν χρησιμοποιείται σήμερα το CMY μοντέλο αλλά το CMYK. Το μοντέλο CMY μπορεί να παρασταθεί όπως και το RGB με ένα κύβο σε ένα καρτεσιανό σύστημα αξόνων με το λευκό χρώμα στην αρχή των αξόνων και τα βασικά χρώματα πάνω στους άξονες.[13]



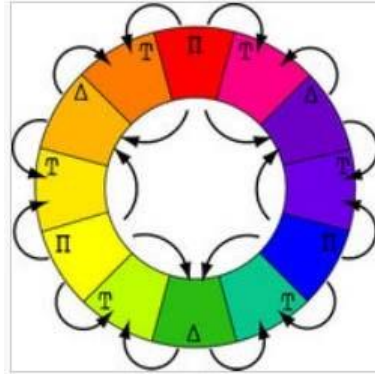
Εικόνα 1.4: Ανάμειξη βασικών χρωμάτων στο μοντέλο CMY

### 1.5.3 Χρωματικό μοντέλο RYB

Στην παραδοσιακή ζωγραφική χρησιμοποιείται το χρωματικό μοντέλο RYB με βασικά χρώματα τα Κόκκινο (Red) – Κίτρινο (Yellow) – Μπλε (Blue). Με τα τρία αυτά βασικά χρώματα δημιουργούμε τα δευτερογενή ως εξής:

- Πορτοκαλί: Κόκκινο + Κίτρινο
- Πράσινο: Κίτρινο + Μπλέ
- Μωβ: Μπλέ + Κόκκινο

Στο μοντέλο αυτό υπάρχουν και τριτογενή χρώματα που δημιουργούνται από τα πρωτογενή και τα δευτερογενή. Τα πρωτογενή, δευτερογενή και τριτογενή χρώματα φαίνονται στον χρωματικό τροχό. Το χρωματικό αυτό μοντέλο περιγράφει σε πολύ αδρές γραμμές τη συμπεριφορά των χρωμάτων που παράγονται από ανάμειξη των χρωστικών που χρησιμοποιούνται στις μπογιές ζωγραφικής και παρουσιάζει σημαντικά προβλήματα στην εφαρμογή του. Το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένες οι μπογιές περιέχει χρωστικές που ανακλούν μεγάλες περιοχές του ορατού φάσματος που διαφέρουν ανάλογα με την εταιρεία που παρασκευάζει τις μπογιές. Με άλλα λόγια όλες οι κόκκινες μπογιές δεν είναι ίδιες και δεν παρουσιάζουν τις ίδιες ιδιότητες όταν αναμειχθούν με άλλες μπογιές. Για το λόγο αυτό στη ζωγραφική δεν είναι δυνατόν να παρασκευάσουμε όλα τα χρώματα από τα παραδοσιακά πρωτογενή. Έτσι κάθε παρασκευάστρια εταιρεία δημιουργεί μία δικιά της γκάμα βασικών χρωμάτων που περιλαμβάνουν τα πρωτογενή, τα δευτερογενή, ορισμένα τριτογενή ή άλλα χρώματα, το λευκό και το μαύρο. Με τα χρώματα αυτά μπορεί να δημιουργηθεί κάθε επιθυμητό χρωματικό αποτέλεσμα.[13]



Εικόνα 1.5: Παραδοσιακός χρωματικός τροχός του συστήματος RYB. Π: πρωτογενή, Δ: δευτερογενή, Τ: τριτογενή χρώματα

## 1.6 Συσκευές Μέτρησης Χρώματος

Η μέτρηση των διαστάσεων του χρώματος, αποτέλεσε και αποτελεί ακόμα και σήμερα, σημαντικό πεδίο έρευνας στον τομέα της βιομηχανίας και κυρίως σε κλάδους που ασχολούνται με την παραγωγή των χρωμάτων. Ειδικότερα, στον τομέα της βιομηχανίας, χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικά όργανα μέτρησης του χρώματος, όπως είναι ο φασματογράφος και τα χρωματομέτρα.

### 1.6.1 Φασματογράφος

Η φασματοφωτομετρία είναι ένα εργαλείο που εξαρτάται από την ποσοτική ανάλυση των μορίων ανάλογα με το πόσο φως απορροφάται από χρωματιστές ενώσεις. Η φασματοφωτομετρία χρησιμοποιεί φωτομετρικά, γνωστά ως φασματοφωτόμετρα, που μπορούν να μετρήσουν την ένταση της δέσμης φωτός ως συνάρτηση του χρώματος (μήκους κύματος). Σημαντικά χαρακτηριστικά των φασματοφωτομέτρων είναι το φασματικό εύρος ζώνης (το φάσμα των χρωμάτων που μπορεί να μεταδώσει μέσω του δοκιμαστικού δείγματος), το ποσοστό μετάδοσης του δείγματος, το λογαριθμικό εύρος απορρόφησης του δείγματος και μερικές φορές ένα ποσοστό μέτρησης της ανάκλασης. Ένα φασματοφωτόμετρο χρησιμοποιείται συνήθως για τη μέτρηση της διαπερατότητας ή της ανάκλασης διαλυμάτων, διαφανή ή αδιαφανή στερεά, όπως γυαλισμένο γυαλί ή αέρια. Αν και πολλά βιοχημικά είναι χρωματισμένα, όπως και σε αυτά, απορροφούν ορατό φως και συνεπώς μπορούν να μετρηθούν με χρωματομετρικές διαδικασίες, ακόμα και άχρωμα βιοχημικά μπορούν συχνά να μετατραπούν σε έγχρωμες ενώσεις κατάλληλες για χρωμογόνες αντιδράσεις σχηματισμού χρώματος για να δώσουν ενώσεις κατάλληλες για χρωματομετρική ανάλυση. Ωστόσο, μπορούν επίσης να σχεδιαστούν για να μετρήσουν τη διάχυση σε οποιαδήποτε από τις αναφερόμενες περιοχές φωτισμού που συνήθως καλύπτουν περίπου 200 nm - 2500 nm χρησιμοποιώντας διαφορετικούς ελέγχους και βαθμονόμηση. Μέσα σε αυτές τις κλίμακες φωτός απαιτούνται βαθμονομήσεις στο μηχάνημα χρησιμοποιώντας πρότυπα που ποικίλλουν ανάλογα με το μήκος κύματος του φωτομετρικού προσδιορισμού.

Η απορρόφηση του φωτός οφείλεται στην αλληλεπίδραση του φωτός με τους ηλεκτρονικούς και τους δονητικούς τρόπους των μορίων. Κάθε τύπος μορίου έχει ένα ατομικό σύνολο ενεργειακών επιπέδων που συνδέονται με τη σύνθεση των χημικών δεσμών και πυρήνων του, και έτσι θα απορροφήσει το φως συγκεκριμένων μηκών κύματος ή ενεργειών με αποτέλεσμα μοναδικές φασματικές ιδιότητες.

Η χρήση φασματοφωτομέτρων εκτείνεται σε διάφορους επιστημονικούς τομείς, όπως η φυσική, η επιστήμη των υλικών, η χημεία, η βιοχημεία, η χημική μηχανική και η μοριακή βιολογία. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλές βιομηχανίες, συμπεριλαμβανομένων των ημιαγωγών, της παραγωγής λέιζερ και οπτικών, της εκτύπωσης και της ιατροδικαστικής εξέτασης, καθώς και σε εργαστήρια για τη μελέτη χημικών ουσιών. Η φασματοφωτομετρία χρησιμοποιείται συχνά στις μετρήσεις ενζυμικών ενεργειών, προσδιορισμών συγκεντρώσεων πρωτεϊνών, προσδιορισμών ενζυματικών κινητικών σταθερών και μετρήσεων αντιδράσεων δέσμευσης προσδέματος. Τέλος, ένα φασματοφωτόμετρο είναι σε θέση να προσδιορίσει, ανάλογα με τον έλεγχο ή τη βαθμονόμηση, ποιες ουσίες υπάρχουν σε έναν στόχο και ακριβώς πόσο μέσω των υπολογισμών των παρατηρούμενων μηκών κύματος.[12]

## Σχεδίαση

Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες συσκευών: μονής δέσμης και διπλής δέσμης. Ένα φασματοφωτόμετρο διπλής δέσμης συγκρίνει την ένταση του φωτός ανάμεσα σε δύο διαδρομές φωτός, μία διαδρομή που περιέχει ένα δείγμα αναφοράς και η άλλη μία το δείγμα δοκιμής. Ένα φασματοφωτόμετρο μίας δέσμης μετρά τη σχετική ένταση φωτός της δέσμης πριν και μετά την εισαγωγή ενός δείγματος δοκιμής. Παρόλο που οι μετρήσεις σύγκρισης από όργανα διπλής δέσμης είναι ευκολότερες και πιο σταθερές, τα όργανα μιας δέσμης μπορούν να έχουν μεγαλύτερη δυναμική περιοχή και είναι οπτικά απλούστερα και πιο συμπαγή. Επιπλέον, ορισμένα εξειδικευμένα όργανα, όπως τα φασματοφωτόμετρα που είναι ενσωματωμένα σε μικροσκόπια ή τηλεσκόπια, είναι όργανα μονής δέσμης λόγω της πρακτικότητας.

Ιστορικά, τα φασματοφωτόμετρα χρησιμοποιούν ένα μονοχρωμικό που περιέχει ένα πλέγμα περίθλασης για να παράγει το αναλυτικό φάσμα. Το τρίψιμο μπορεί να είναι είτε κινητό είτε σταθερό. Εάν χρησιμοποιείται ένας μόνο ανιχνευτής, όπως ένας σωλήνας φωτοπολλαπλασιαστή ή φωτοδίοδο, το πλέγμα μπορεί να σαρωθεί σταδιακά (φασματοφωτόμετρο σάρωσης) έτσι ώστε ο ανιχνευτής να μπορεί να μετρήσει την ένταση του φωτός σε κάθε μήκος κύματος (που αντιστοιχεί σε κάθε "βήμα"). Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν συστοιχίες ανιχνευτών (φασματοφωτόμετρο συστοιχίας), όπως συσκευές συζευγμένου φορτίου (CCD) ή συστοιχίες φωτοδίοδων (PDA). Σε τέτοια συστήματα, το πλέγμα είναι σταθερό και η ένταση κάθε μήκους κύματος φωτός μετράται από έναν διαφορετικό ανιχνευτή στη συστοιχία. Επιπλέον, τα περισσότερα σύγχρονα φασματοφωτόμετρα μέσης υπέρυθρης ακτινοβολίας χρησιμοποιούν μια τεχνική μετασχηματισμού Fourier για να αποκτήσουν τις φασματικές πληροφορίες. Αυτή η τεχνική ονομάζεται φασματοσκοπία υπέρυθρου μετασχηματισμού Fourier.

Κατά τη διενέργεια μετρήσεων μετάδοσης, το φασματοφωτόμετρο συγκρίνει ποσοτικά το κλάσμα του φωτός που διέρχεται μέσω ενός διαλύματος αναφοράς και ενός διαλύματος δοκιμής, στη συνέχεια συγκρίνει ηλεκτρονικά τις εντάσεις των δύο σημάτων και υπολογίζει το ποσοστό μετάδοσης του δείγματος σε σύγκριση με το πρότυπο αναφοράς. Για τις μετρήσεις ανάκλασης, το φασματοφωτόμετρο συγκρίνει ποσοτικά το κλάσμα του φωτός που αντανακλάται από τα δείγματα αναφοράς και δοκιμής. Το φως από τον λαμπτήρα πηγής διέρχεται μέσω ενός μονοχρωμάτη, ο οποίος διαθλά το φως σε ένα "ουράνιο τόξο" μήκους κύματος μέσω ενός περιστρεφόμενου πρίσματος και εξάγει στενά εύρη ζώνης αυτού του διάσπαρτου φάσματος μέσω μιας μηχανικής σχισμής στην πλευρά εξόδου του μονοχρωμάτορα. Αυτά τα εύρη ζώνης μεταδίδονται μέσω του δείγματος δοκιμής. Στη συνέχεια, μετριέται η πυκνότητα ροής φωτονίων (βάρους ανά τετραγωνικό μέτρο) του μεταδιδόμενου ή ανακλώμενου φωτός με φωτοδίοδο, διάταξη συζευγμένου φορτίου ή άλλο αισθητήρα φωτός. Η τιμή διαπερατότητας ή ανάκλασης για κάθε μήκος κύματος του

δοκιμαστικού δείγματος στη συνέχεια συγκρίνεται με τις τιμές εκπομπής ή ανάκλασης από το δείγμα αναφοράς. Τα περισσότερα όργανα θα εφαρμόσουν μια λογαριθμική συνάρτηση στον λόγο γραμμικής μετάδοσης για να υπολογίσουν την «απορροφητικότητα» του δείγματος, μια τιμή η οποία είναι ανάλογη της «συγκέντρωσης» του χημικού που μετράται.

Με λίγα λόγια, η ακολουθία συμβάντων σε ένα φασματοφωτόμετρο σάρωσης έχει ως εξής:

1. Η φωτεινή πηγή φωτίζεται σε μονοχρωμία, διαθλάται σε ένα ουράνιο τόξο και χωρίζεται σε δύο δοκούς. Στη συνέχεια σαρώνονται μέσω του δείγματος και των διαλυμάτων αναφοράς.
2. Τα κλάσματα των προσπίπτοντων μηκών κύματος μεταδίδονται μέσω ή αντανακλώνται από το δείγμα και την αναφορά.
3. Το προκύπτον φως πλήττει τη συσκευή φωτοανιχνευτή, η οποία συγκρίνει τη σχετική ένταση των δύο δοκών.
4. Τα ηλεκτρονικά κυκλώματα μετατρέπουν τα σχετικά ρεύματα σε ποσοστά γραμμικής μετάδοσης και / ή τιμές απορρόφησης / συγκέντρωσης.

Σε ένα φασματοφωτόμετρο συστοιχίας, η ακολουθία έχει ως εξής:

1. Η φωτεινή πηγή φωτίζεται στο δείγμα και εστιάζεται σε μια σχισμή
2. Το μεταδιδόμενο φως διαθλάται σε ένα ουράνιο τόξο με το φράγμα ανάκλασης
3. Το προκύπτον φως πλήττει τη συσκευή φωτοανιχνευτή, η οποία συγκρίνει την ένταση της δέσμης
4. Τα ηλεκτρονικά κυκλώματα μετατρέπουν τα σχετικά ρεύματα σε ποσοστά γραμμικής μετάδοσης και / ή τιμές απορρόφησης / συγκέντρωσης

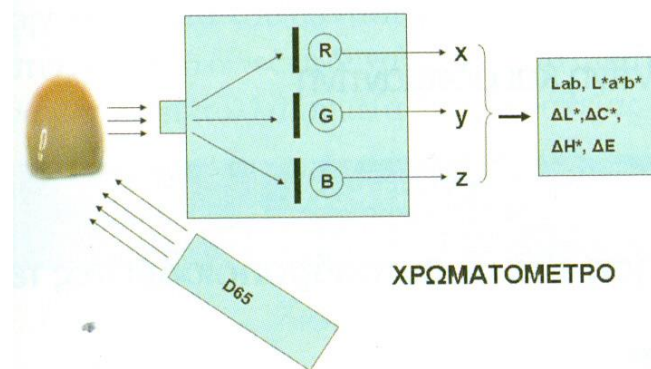
Πολλά παλαιότερα φασματοφωτόμετρα πρέπει να βαθμονομηθούν με μια διαδικασία γνωστή ως "μηδενισμός", για να εξισορροπηθεί η μηδενική έξοδος ρεύματος των δύο δοκών στον ανιχνευτή. Η μετάδοση μιας ουσίας αναφοράς ορίζεται ως βασική τιμή (datum), επομένως καταγράφεται η μετάδοση όλων των άλλων ουσιών σε σχέση με την αρχική "μηδενική" ουσία. Το φασματοφωτόμετρο στη συνέχεια μετατρέπει τον λόγο μετάδοσης σε «απορροφητικότητα», τη συγκέντρωση συγκεκριμένων συστατικών του δείγματος δοκιμής σε σχέση με την αρχική ουσία.[12]

## 1.6.2 Χρωματόμετρα

Τα χρωματόμετρα είναι οπτικά όργανα που μετρούν το ποσό της εκπεμπόμενης ενέργειας για κάθε ένα από τα βασικά χρώματα, κόκκινο, μπλε και πράσινο.[7] Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αποδίδουν τις τριχρωματικές συντεταγμένες του χρώματος. Οι συσκευές αυτές παρέχουν άμεσους προσδιορισμούς του χρώματος, χωρίς πολύπλοκες μαθηματικές πράξεις. Αυτό επιτυγχάνεται με τη δειγματοληψία του φωτός που αντανακλάται από ένα αντικείμενο, μέσα από τρία χρωματικά φίλτρα, που προσομοιώνουν την απόκριση των υποδοχέων χρώματος του οφθαλμού.

Ουσιαστικά, αποτελούνται από τρία βασικά στοιχεία, τη φωτεινή πηγή, τον ανιχνευτή και τα φίλτρα.[8] Η φωτεινή πηγή είναι, συνήθως, μια λάμπα ξένου που παράγει φως ημέρας. Τα φίλτρα μπορεί να βρίσκονται είτε ανάμεσα στην πηγή και στο δείγμα, είτε μεταξύ δείγματος και ανιχνευτή, είτε και στις δύο παραπάνω θέσεις. Τα φίλτρα αυτά λειτουργούν ως αναλογικές γεννήτριες, που περιορίζουν τα φασματικά χαρακτηριστικά του φωτός, που προσκρούει στην επιφάνεια του

ανιχνευτή. Χρησιμοποιούνται διορθωτικά φίλτρα, (κόκκινο, πράσινο, μπλε), ώστε να προσομοιάζουν τη χρωματική αντίληψη του παρατηρητή. Ο ανιχνευτής ανιχνεύει την επιστρέφουσα ακτίνα και εκφράζει τα δεδομένα στις μαθηματικές διαστάσεις του χρώματος, στο σύστημα C.I.E.  $L^*a^*b^*$ , από το οποίο μπορούν να δοθούν και όλες οι υπόλοιπες αντιστοιχίες σε άλλα χρωματικά συστήματα.[6]



Εικόνα 1.6: Σχηματική διάταξη χρωματόμετρου

Γενικά, τα χρωματόμετρα, ενώ έχουν την ικανότητα να μετρούν το χρώμα σωστά με επαρκή ευαισθησία για χαμηλά επίπεδα φωτός, δεν προσδιορίζουν το πλήρες φάσμα της ανακλώμενης δέσμης, ώστε να ελεγχθεί το φαινόμενο του μεταμερισμού και παράλληλα δεν προσομοιάζουν πλήρως τον παρατηρητή

### 1.6.3 Χρήση Αισθητήρα

Οι αισθητήρες φωτός αναφέρονται ως τύποι φωτοανιχνευτών ή φωτοαισθητήρων. Υπάρχουν διάφορες ποικιλίες αυτών των αισθητήρων. Οι αισθητήρες φωτός μπορούν να ανιχνεύσουν την πυκνότητα αλλά δεν μπορούν να καταγράψουν εικόνες. Οι πιο διαδεδομένοι αισθητήρες χρώματος είναι: Φωτοδίοδοι (LDR Light Dependent Resistors) και φωτοαντιστασεις (LDR Light Dependent Resistors). Η φωτοδίοδος είναι ικανή να μετατρέπει το φως είτε σε ρεύμα είτε σε τάση. Η φωτοαντίσταση είναι αντίσταση της οποίας η τιμή της μειώνεται με την αύξηση της έντασης του φωτός.

Στην παρούσα εργασία ο τύπος του αισθητήρα που επιλέχθηκε αποτελείται από φωτοδιόδους και όχι από φωτοαντίσταση. Η έξοδος του αισθητήρα που χρησιμοποιήθηκε είναι ένας τετραγωνικός παλμός και η τιμή της συχνότητας εξόδου εξαρτάται από το πόσο έντονο ή όχι είναι το χρώμα που δέχεται στην είσοδο. Το σήμα αυτό μπορούμε να το οδηγήσουμε απευθείας σε μικροελεγκτή είτε σε κάποιο άλλο ηλεκτρικό κύκλωμα. Παρακάτω θα δούμε αναλυτικότερα την αρχή λειτουργίας του.

## 2.Κύκλωμα

### 2.1 Γενική Περιγραφή

Το πρόβλημα που μας απασχόλησε ήταν η αναγνώριση των αποχρώσεων των τριών βασικών χρωμάτων (κόκκινου, πράσινου, μπλε, RGB). Για την επίλυση του προβλήματος αυτού χρησιμοποιήσαμε έναν αισθητήρα χρώματος ο οποίος λειτουργεί με φωτοδιόδους. Η έξοδος του συγκεκριμένου αισθητήρα είναι ένας τετραγωνικός παλμός του οποίου η συχνότητα εξαρτάται από το πόσο φωτεινό είναι το χρώμα που αντιλαμβάνονται οι φωτοδιόδοι και όχι με την αντιστοιχία των χρωμάτων με το φάσμα του φωτός.

Την έξοδο του αισθητήρα την χρησιμοποιούμε σε ένα κύκλωμα PLL. Στο PLL θέλουμε να περιορίσουμε την περιοχή συχνοτήτων του ταλαντωτή σε ένα περιορισμένο εύρος γύρω από μια κεντρική συχνότητα. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση δυο εξωτερικών αντιστάσεων και ενός πυκνωτή. Επειδή στο πρόβλημα μας θέλουμε να προσεγγίσουμε αποχρώσεις τριών διαφορετικών χρωμάτων χρησιμοποιήσαμε τρεις διαφορετικούς πυκνωτές. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκαν τρεις πυκνωτές είναι ότι θέλουμε να έχουμε διαφορετική κεντρική συχνότητα στον ταλαντωτή για το κάθε χρώμα. Οι πυκνωτές είναι τοποθετημένοι σε 3 ρελέ. Η επιλογή του πυκνωτή που θέλουμε να λειτουργήσει κάθε φορά γίνεται με την βοήθεια ενός διακόπτη τριών θέσεων. Την θέση που έχει ο διακόπτης την αντιλαμβάνεται ο μικροελεγκτής ο οποίος στέλνει σήμα στο κατάλληλο ρελέ για την λειτουργία του αντίστοιχου πυκνωτή. Ακόμη στο κύκλωμα υπάρχουν 3 led με τα οποία δηλώνεται το χρώμα για το οποίο θα λειτουργεί το PLL. Το led που θα ενεργοποιείται κάθε φορά εξαρτάται από την θέση του διακόπτη και η ενεργοποίηση του γίνεται μέσω του μικροελεγκτή.

Την έξοδο του PLL την χρησιμοποιούμε σε ένα βαθυπερατό φίλτρο 2<sup>ης</sup> τάξης για ευκρινέστερη έξοδο του σήματος. Αυτό το σήμα εισέρχεται στον μικροελεγκτή για να γίνει η μετατροπή του από αναλογικό σε ψηφιακό. Στην συνέχεια ο μικροελεγκτής εμφανίζει τα αντίστοιχα μηνύματα σε οθόνη lcd.

## Διάγραμμα Ροής

Διάταξη αναγνώρισης χρώματος  
βασισμένη στον αισθητήρα TCS3200



Κύκλωμα PLL  
CD4046



Ενεργό Βαθυπερατό φίλτρο 2<sup>ης</sup> τάξης  
με την χρήση του ολοκληρωμένου TLC27



Επεξεργασία σήματος με την χρήση μικροεπεξεργαστή  
PIC18F4550 για την μετατροπή από αναλογικό σε ψηφιακό  
και ενεργοποίηση ρελέ με την χρήση διακόπτη τριών θέσεων



Απεικόνιση LCD



## 2.2 Αισθητήρας χρώματος TCS3200

### 2.2.1 Εισαγωγή

Ο αισθητήρας χρώματος TCS3200 μπορεί να ανιχνεύσει μια μεγάλη ποικιλία χρωμάτων με βάση το μήκος κύματος τους. Αυτός ο αισθητήρας είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για τα έργα αναγνώρισης χρωμάτων, όπως η αντιστοίχιση χρωμάτων, η διαλογή χρωμάτων, η ανάγνωση των δοκιμαστικών ταινιών και πολλά άλλα.

Ο αισθητήρας χρώματος TCS3200 που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα χρησιμοποιεί ένα τσιπ αισθητήρα TAOS TCS3200 RGB για την ανίχνευση του χρώματος. Περιέχει, επίσης, τέσσερα λευκά LED που ανάβουν το αντικείμενο μπροστά του.[5]



Εικόνα 2.1: Αισθητήρας χρώματος TCS3200

### 2.2.2 Προδιαγραφές

Ακολουθούν οι προδιαγραφές του αισθητήρα:

- Ισχύς: 2.7V έως 5.5V
- Μέγεθος: 28,4 x 28,4 χιλιοστά (1,12 x 1,12 ")
- Διασύνδεση: ψηφιακό TTL
- Υψηλής ανάλυσης μετατροπή έντασης φωτός σε συχνότητα
- Προγραμματιζόμενο χρώμα και συχνότητα εξόδου πλήρους κλίμακας
- Επικοινωνεί απευθείας με το microcontroller (μικροελεγκτή)

### 2.2.3 Πώς λειτουργεί ο αισθητήρας TCS3200

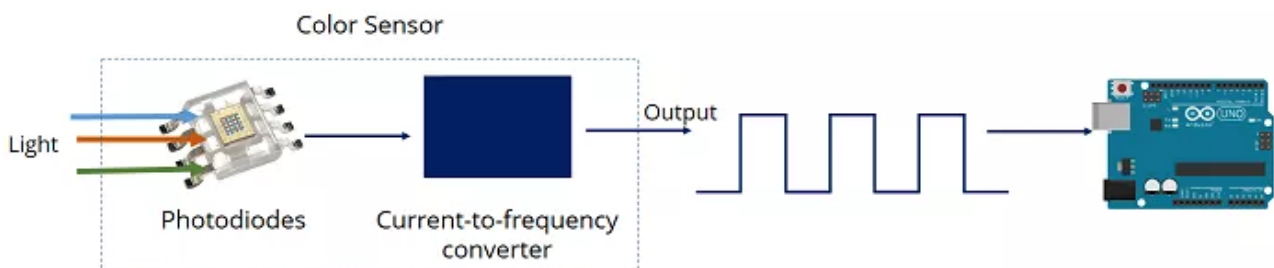
Το TCS3200 διαθέτει μια σειρά φωτοδιόδων με 4 διαφορετικά φίλτρα. Μια φωτοδίοδος είναι απλώς μια συσκευή ημιαγωγών που μετατρέπει το φως σε ρεύμα. Ο αισθητήρας περιέχει:

- 16 φωτοδιόδους με κόκκινο φίλτρο - ευαίσθητο στο κόκκινο μήκος κύματος
- 16 φωτοδιόδοι με πράσινο φίλτρο - ευαίσθητο στο πράσινο μήκος κύματος
- 16 φωτοδιόδους με μπλε φίλτρο - ευαίσθητο στο μπλε μήκος κύματος
- 16 φωτοδιόδους χωρίς φίλτρο



Εικόνα 2.2: Φωτοδιόδοι του αισθητήρα TCS3200

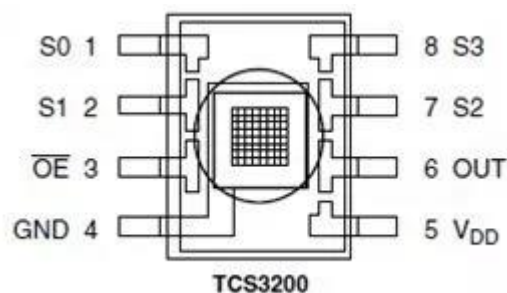
Διαλέγοντας επιλεκτικά τις αναγνώσεις (readings) του φίλτρου φωτοδιόδου, μπορείτε να ανιχνεύσετε την ένταση των διαφορετικών χρωμάτων. Ο αισθητήρας διαθέτει μετατροπέα ρεύματος σε συχνότητα, ο οποίος μετατρέπει τις μετρήσεις των φωτοδίοδων σε ένα τετραγωνικό κύμα με συχνότητα ανάλογη προς την ένταση φωτός του επιλεγμένου χρώματος. Ακολούθως, αυτή η συχνότητα διαβάζεται από το Arduino αυτό φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.[5]



Εικόνα 2.3: Κύκλωμα του αισθητήρα με μικροελεγκτή

## 2.2.4 Pinout Αισθητήρα

Στην εικόνα 2.4 φαίνονται οι ακροδέκτες του αισθητήρα και στον πίνακα 2.1 γίνεται η περιγραφή του κάθε ακροδέκτη.



Εικόνα 2.4: Ακροδέκτες αισθητήρα

ΟΝΟΜΑ PIN	I/O	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
GND (4)		Power supply ground (Ισχύς τροφοδοσίας ρεύματος)
OE (3)	I	Enable for output frequency (active low) [Ενεργοποίηση για συχνότητα εξόδου (ενεργή χαμηλή) ]
OUT (6)	O	Output frequency (Συχνότητα εξόδου)
S0, S1 (1,2)	I	Output frequency scaling selection inputs (Είσοδοι επιλογής κλιμάκωσης συχνότητας εξόδου)
S2, S3 (7,8)	I	Photodiode type selection inputs (Είσοδοι επιλογής τύπου φωτοδιόδου)
VDD (5)		Voltage supply (Τροφοδοσία τάσης)

Πίνακας 2.1: Περιγραφή ακροδεκτών

## 2.2.5 Επιλογή φίλτρου

Για να επιλέξετε το χρώμα που διαβάζεται από τη φωτοδίοδο, χρησιμοποιείτε τους ακροδέκτες ελέγχου S2 και S3. Καθώς οι φωτοδιόδοι συνδέονται παράλληλα, ο καθορισμός των S2 και S3 LOW (χαμηλό) και HIGH (υψηλό) σε διάφορους συνδυασμούς σας επιτρέπει να επιλέξετε διαφορετικά φωτοδιόδοι. Στον πίνακα 2.2 καταγράφονται οι συνδυασμοί για την επιλογή του φίλτρου.[5]

ΤΥΠΟΣ ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΥ	S2	S3
Κόκκινο	Χαμηλό	Χαμηλό
Μπλε	Χαμηλό	Υψηλό
Χωρίς φίλτρο (καθαρό)	Υψηλό	Χαμηλό
Πράσινο	Υψηλό	Υψηλό

Πίνακας 2.2: Τρόποι σύνδεσης για την επιλογή φίλτρου

## 2.2.6 Κλίμακα συχνότητας

Τα pins S0 και S1 χρησιμοποιούνται για την κλιμάκωση (scaling) της συχνότητας εξόδου (output frequency). Μπορεί να κλιμακωθεί στις ακόλουθες προκαθορισμένες τιμές: 100%, 20% ή 2%. Η κλιμάκωση της συχνότητας εξόδου είναι χρήσιμη για τη βελτιστοποίηση των μετρήσεων αισθητήρα για διάφορους μετρητές συχνότητας ή microcontrollers (μικροελεγκτές). Στον πίνακα 2.3 έχουν καταχωρηθεί οι τρόποι για την επιλογή της κλιμάκωσης της συχνότητας εξόδου.[5]

ΚΛΙΜΑΚΑ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΕΞΟΔΟΥ	S0	S1
Χωρίς ρεύμα	L	L
2%	L	H
20%	H	L
100%	H	H

Πίνακας 2.3: Τρόποι σύνδεσης για την επιλογή συχνότητας

Είναι συνηθισμένο να χρησιμοποιείται κλιμάκωση συχνότητας 20%. Έτσι, ρυθμίζετε το S0 pin (ακροδέκτη) στο HIGH (Υψηλό) και το S1 pin στη θέση LOW (Χαμηλό).

## 2.3 Βρόχος κλειδωμένης φάσης (PLL)

### 2.3.1 Εισαγωγή

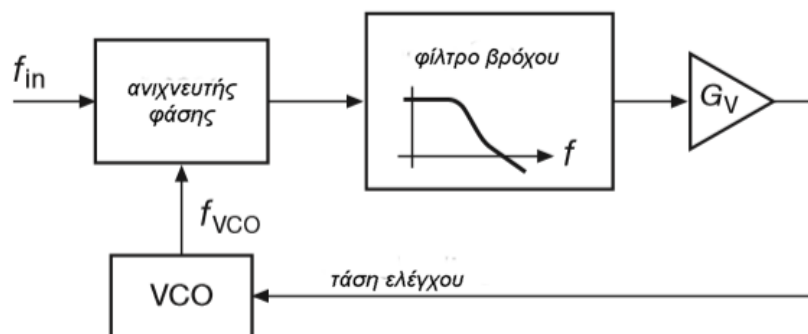
Ο Βρόχος Κλειδωμένης Φάσης - PLL (Phase locked loop) είναι ένα ενδιαφέρον και χρήσιμο δομικό στοιχείο που διατίθεται είτε μόνο του σαν ολοκληρωμένο κύκλωμα ( ic) είτε σαν μέρος ενός πιο σύνθετου ic.

Ένα PLL αποτελείται από έναν ταλαντωτή ελεγχόμενο από τάση (VCO), ένα ανιχνευτή φάσης και ένα ενισχυτή και αντιπροσωπεύει το κλασικό κύκλωμα επεξεργασίας σήματος μικτής τεχνικής (mixed signal technique) δηλαδή ένα κύκλωμα που χρησιμοποιεί αναλογικές και ψηφιακές τεχνικές.

Η τεχνική του μικτού σήματος συνθέτει μία συχνότητα εξόδου  $f_{out}$ , που σχετίζεται με τη συχνότητα αναφοράς του ταλαντωτή  $f_{osc}$  με ένα λόγο όπως π.χ.  $f_{out} = (n/r) \times f_{osc}$ , όπου  $n$  και  $r$  είναι ακέραιοι αριθμοί. Μπορεί να θεωρηθεί και σαν ένας απλός διαιρέτης συχνότητας δια  $n$  (όπου  $f_{out} = f_{osc}/n$ ).

Τα PLL χρησιμοποιούνται σε μια ευρεία γκάμα εφαρμογών που εκτείνονται από τις τηλεπικοινωνίες όπως τα κινητά τηλέφωνα, τα ραδιόφωνα, τις τηλεοράσεις, έως τους υπολογιστές και τους ελεγκτές κινητήρων. Μερικές από τις εφαρμογές που χρησιμοποιούνται είναι ο πολλαπλασιασμός συχνότητας, η σύνθεση συχνοτήτων, η παραγωγή και αποκατάσταση παλμών ρολογιού, η τονική αποκωδικοποίηση, η αποδιαμόρφωση AM και FM και η ψηφιακή διαμόρφωση σημάτων.

Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται το κλασικό κύκλωμα ενός PLL. Ο ανιχνευτής φάσης είναι μία διάταξη που συγκρίνει δύο συχνότητες εισόδου, παράγοντας μια έξοδο που είναι η μέτρηση της διαφοράς φάσης τους. Π.χ. εάν οι εισοδοί έχουν διαφορετικές συχνότητες θα μας δώσει μια περιοδική έξοδο της διαφοράς των συχνοτήτων εισόδου. Εάν η  $f_{in}$  δεν είναι ίση με την  $f_{VCO}$ , το σήμα σφάλματος φάσης αφού πρώτα φιλτραρισθεί και ενισχυθεί, θα προκαλέσει την συχνότητα της VCO να παρεκκλίνει προς την κατεύθυνση της  $f_{in}$ . Εάν οι συνθήκες είναι οι κατάλληλες, η VCO γρήγορα θα κλειδώσει στην  $f_{in}$  διατηρώντας μία σταθερή φασική σχέση με το σήμα εισόδου.[1]



Σχήμα 2.1

Σαυτό το σημείο η φιλτραρισμένη έξοδος του ανιχνευτή φάσης είναι ένα DC σήμα και η τάση ελέγχου της VCO είναι το μέτρο της απόκλισης της συχνότητας εισόδου, γεγονός που μας δίνει πεδίο εφαρμογής στην τονική αποκωδικοποίηση και στην αποδιαμόρφωση FM.

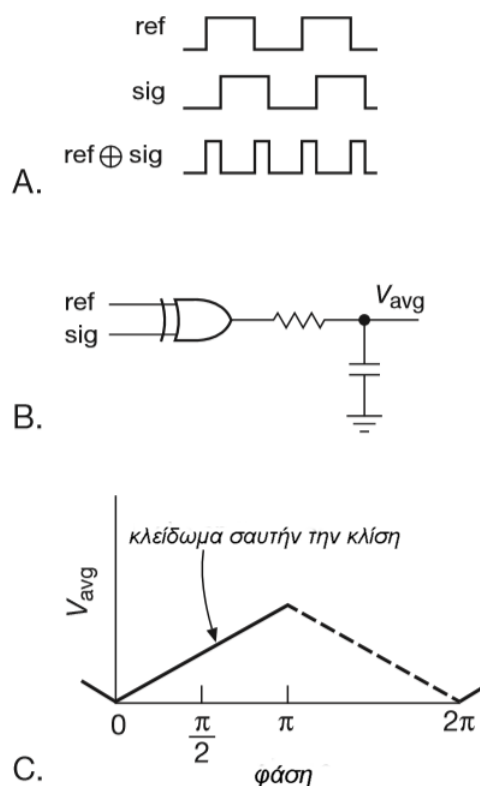
Η έξοδος της VCO είναι μια τοπικά παραγόμενη συχνότητα ίση με την  $f_{in}$ , παρέχοντας έτσι ένα καθαρό είδωλο της  $f_{in}$  η οποία αφεαυτού της μπορεί να περιέχει και θόρυβο. Καθώς η έξοδος της VCO μπορεί να είναι τριγωνική, τετραγωνική ή ημιτονοειδής κυματομορφή, μπορεί για παράδειγμα να παραχθεί μια ημιτονοειδής κυματομορφή κλειδωμένη σε μια παλμοσειρά εισόδου.

Μια από τις πιο διαδεδομένες εφαρμογές των PLL είναι ένας μετρητής modulo- $n$  να παρεμβάλεται μεταξύ της εξόδου της VCO και του ανιχνευτή φάσης παράγοντας με αυτό τον τρόπο ένα σήμα με συχνότητα πολλαπλάσια της συχνότητας αναφοράς εισόδου  $f_{in}$ . Αυτή είναι μια ιδανική μέθοδος παραγωγής παλμών χρονισμού σε πολλαπλάσια συχνότητα από την συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας του δικτύου (50Hz), για να χρησιμοποιηθεί στους ADC ολοκλήρωσης με σκοπό την απόρριψη της επίδρασης της συχνότητας των 50Hz της γραμμής του δικτύου και των αρμονικών της. Επίσης αυτή την τεχνική χρησιμοποιούν και τα ηλεκτρονικά όργανα (αρμόνια συνθεσάιζερς κ.λ.π) για σύνθεση σημάτων διαφόρων συχνοτήτων.[1]

### 2.3.2 Βαθμίδες που αποτελούν το PLL

#### Ο ανιχνευτής φάσης (Phase detector)

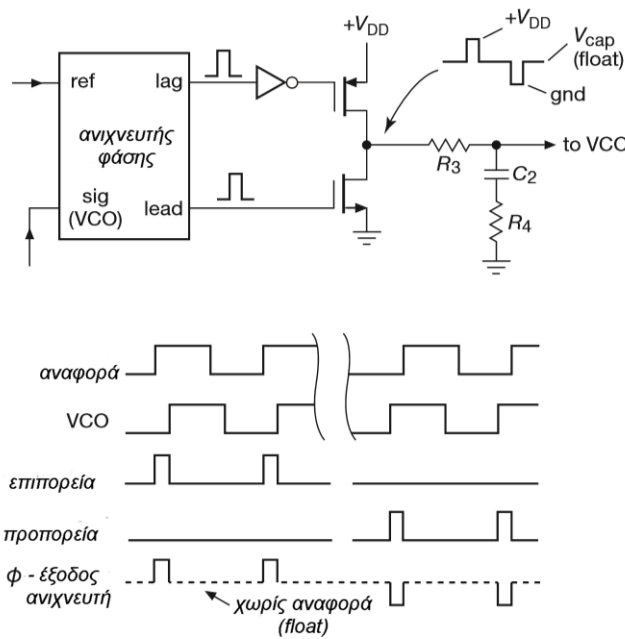
Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι ανιχνευτή φάσης, ο τύπος I και ο τύπος II. Ο ανιχνευτής φάσης τύπου I μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ανιχνεύσει διαφορές φάσης είτε σε αναλογικά είτε σε ψηφιακά σήματα και εκτελεί ένα απλό πολλαπλασιασμό των εισόδων. Για ψηφιακά σήματα είναι απλά μια πύλη EXOR, της οποίας η έξοδος αφού περάσει από ένα βαθυπερατό φίλτρο, είναι συνάρτηση της τάσης εξόδου ως προς τη διαφορά φάσης και έχει την μορφή ράμπας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2 για τετραγωνικούς παλμούς εισόδου με κύκλο εργασίας DC = 50%.



Σχήμα 2.2

Για τα αναλογικά σήματα εισόδου αποτελείται από ένα αληθινό αναλογικό πολλαπλασιαστή τεσσάρων τεταρτημορίων, ή ζυγοσταθμισμένο μίκτη, με παρόμοια συνάρτηση τάσης εξόδου ως προς τη διαφορά φάσης με αυτήν της πύλης XOR. Ανιχνευτές φάσης υψηλής γραμμικότητας αυτού του τύπου είναι απαραίτητοι για συγχρονισμένη ανίχνευση (lock-in detection).

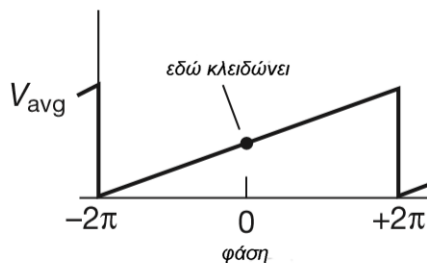
Ο τύπου II ανιχνευτής φάσης είναι αμιγώς ψηφιακός και οδηγείται από ψηφιακές μεταβάσεις (αιχμές). Είναι ευαίσθητος μόνο στο σχετικό χρονισμό των μεταβάσεων μεταξύ του σήματος αναφοράς και της εισόδου VCO όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3

Το κύκλωμα του συγκριτή φάσης παράγει παλμούς εξόδου προπορείας ή επιπορείας, εξαρτώμενους από το αν οι μεταβάσεις των παλμών εξόδου της VCO λαμβάνουν χώραν πριν ή μετά των μεταβάσεων των παλμών αναφοράς αντίστοιχα, με το πλάτος τους να εξαρτάται από την αντίστοιχη διαφορά μεταξύ των παλμών όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.

Το κύκλωμα εξόδου τότε, είτε λειτουργεί ως εκροή (sink) τραβώντας ρεύμα από την τροφοδοσία, είτε ως πηγή (source) δίνοντας ρεύμα στο φορτίο αντίστοιχα κατά την διάρκεια αυτών των παλμών, αλλιώς είναι ανοικτό κύκλωμα, παράγοντας μια μέση τιμή τάσης εξόδου ως προς την διαφορά φάσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4.

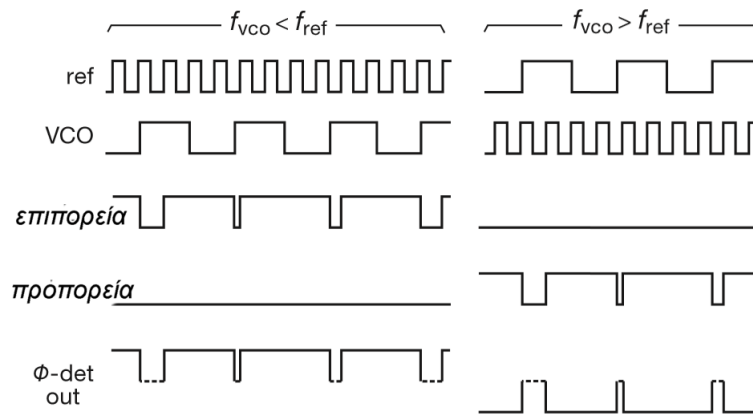


Σχήμα 2.4

Αυτό είναι τελείως ανεξάρτητο από τον κύκλο εργασίας (Duty Cycle) των σημάτων εισόδου, αντίθετα με ότι συνέβαινε στον αναλογικό ανιχνευτή φάσης τύπου I.

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό του τύπου II ανιχνευτή φάσης, είναι το γεγονός ότι οι παλμοί εξόδου εξαφανίζονται τελείως όταν τα δύο σήματα είναι κλειδωμένα. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει

κυμάτωση (ripple) στην έξοδο για να παραχθεί περιοδική διαμόρφωση φάσης στο βρόχο, όπως συμβαίνει στον τύπου I ανιχνευτή. Επίσης ο ανιχνευτής φάσης τύπου II παράγει μία μέση DC τάση εξόδου που είναι ενδεικτική του προσήμου του σφάλματος συχνότητας όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5

Υπάρχει ακόμη μια διαφορά μεταξύ των δύο τύπων ανιχνευτών φάσης. Ο τυπος I παράγει πάντα ένα σήμα εξόδου που θα πρέπει μετά να φιλτραρισθεί από το φίλτρο του βρόχου. Έτσι σε ένα PLL με ανιχνευτή φάσης τύπου I, το φίλτρο του βρόχου λειτουργεί σαν ένα βαθυπερατό φίλτρο μετατρέποντας τη ψηφιακή έξοδο του ανιχνευτή σε ένα DC σήμα. Σαυτό το DC σήμα θα υπάρχει πάντα μια εναπομείνασα κυμάτωση που θα προξενεί αναπόφευκτες περιοδικές μεταβολές φάσης. Σε κυκλώματα όπου τα PLLs χρησιμοποιούνται για πολλαπλασιασμό συχνότητας, ή, σύνθεση συχνοτήτων, αυτό το ελάττωμα προσθέτει πλευρικές ζώνες διαμόρφωσης φάσης στο σήμα εξόδου.

Σε αντίθεση, ο τύπος II ανιχνευτή παράγει παλμούς εξόδου μόνο όταν υπάρχει διαφορά φάσης μεταξύ των σημάτων αναφοράς και VCO. Καθώς ο ανιχνευτής συμπεριφέρεται σαν ανοικτό κύκλωμα όταν δεν υπάρχει διαφορά φάσης, ο πυκνωτής του φίλτρου του βρόχου, δρα σαν διάταξη αποθήκευσης τάσης κρατώντας σταθερή την τάση που δίνει την σωστή συχνότητα του VCO. Εάν το σήμα αναφοράς μετακινηθεί από αυτή την συχνότητα, ο ανιχνευτής φάσης παράγει μία παλμοσειρά από στενούς παλμούς φορτίζοντας ή εκφορτίζοντας τον πυκνωτή μετακινώντας την τάση του πυκνωτή στην σωστή τιμή για να επιτευχθεί το κλείδωμα.[1]

### 2.3.3 Ταλαντωτής ελεγχόμενος από τάση (VCO)

Μία βασική διάταξη για ένα PLL είναι ένας ταλαντωτής του οποίου η συχνότητα μπορεί να ελεγχθεί από την DC τάση εξόδου του ανιχνευτή τάσης (VCO). Σε ένα PLL συχνά θέλουμε να περιορίσουμε την περιοχή συχνοτήτων του ταλαντωτή σε ένα περιορισμένο εύρος γύρω από μια κεντρική συχνότητα. Για παράδειγμα σε ένα δέκτη ραδιοφώνου FM χρειάζεται ένα εύρος ζώνης περίπου  $\pm 10\text{KHz}$  γύρω από μια συχνότητα περίπου  $100\text{MHz}$ .

Στο κλασσικό ο.κ. PLL το 4046 αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση δύο εξωτερικών αντιστάσεων και ενός πυκνωτή. Σε άλλα πιο μοντέρνα ο.κ. PLL τα οποία δουλεύουν σε συχνοτήτες εκατοντάδων ή χιλιάδων MHz δεν χρησιμοποιείται χρονισμός με κύκλωμα RC όπως στον κλασσικό VCO, αλλά χρησιμοποιώντας:

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

Ένας ταλαντωτής VCO που χρησιμοποιείται σε βρόχο PLL, δεν απαιτείται να είναι ιδιαίτερα γραμμικός κατά τη μετατροπή της τάσης εισόδου σε συχνότητα, αλλά από την άλλη, εάν είναι πολύ μη γραμμικός, το κέρδος βρόχου θα μεταβάλλεται σύμφωνα με τη συχνότητα του σήματος και θα προκαλέσει αστάθεια στο κύκλωμα.[1]

### 2.3.4 Σχεδιασμός PLL

#### Κλείνοντας το βρόχο

Ο ανιχνευτής φάσης μας δίνει μία DC τάση εξόδου που σχετίζεται με τη διαφορά φάσης μεταξύ του σήματος εισόδου και του σήματος αναφοράς. Ο VCO μας επιτρέπει να ελέγξουμε την συχνότητα εξόδου του ανάλογα με την DC τάση που δέχεται στην είσοδο του. Φαίνεται εύκολο να συμπεράνουμε, ότι μπορούμε να κλείσουμε αυτόν το βρόχο ανάδρασης βάζοντας και κάποιο κέρδος, όπως π.χ. σε ένα κύκλωμα τελεστικού ενισχυτή.

Εδώ όμως υπάρχει μια θεμελιώδης διαφορά. Προηγουμένως, η ποσότητα που ρυθμίστηκε με την ανάδραση, ήταν η ίδια ποσότητα που μετρήθηκε για να παράξει το σήμα σφάλματος, ή, τουλάχιστον μια αναλογική ποσότητα αυτού. Π.χ. σε ένα ενισχυτή τάσης μετράμε στην έξοδο τάση και ρυθμίζουμε την τάση εισόδου αντίστοιχα. Αλλά σε ένα PLL υπάρχει μία ολοκλήρωση, μετράμε φάση αλλά ρυθμίζουμε συχνότητα, όπου η φάση είναι ή ολοκλήρωση της συχνότητας. Αυτό εισάγει μία καθυστέρηση  $90^\circ$  ολίσθησης φάσης στο βρόχο.

Ο ολοκληρωτής που συμπεριλαμβάνεται στο βρόχο ανάδρασης έχει σοβαρές επιπτώσεις στη λειτουργία του βρόχου καθώς μία επιπρόσθετη καθυστέρηση φάσης  $90^\circ$  στη συχνότητα που το κέρδος βρόχου είναι μονάδα θα μπορούσε να παράξει ταλαντώσεις. Μια απλή λύση είναι να αποφύγουμε να χρησιμοποιήσουμε εξαρτήματα που να παράγουν επιπλέον καθυστέρηση στο βρόχο, τουλάχιστον σε συχνότητες όπου το κέρδος βρόχου είναι μονάδα. Αυτή είναι μία προσέγγιση και παράγει αυτό που είναι γνωστό σαν “βρόχος πρώτης τάξης”.

Αν και οι βρόχοι πρώτης τάξης είναι χρήσιμοι σε αρκετές περιπτώσεις, δεν έχουν την επιθυμητή ιδιότητα να ενεργούν σαν διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας (Flywheel) επιτρέποντας τον VCO να εξομαλύνει θορύβους και αυξομειώσεις στο σήμα εισόδου. Ακόμη περισσότερο ένας βρόχος πρώτης τάξης δεν διατηρεί μια σταθερή σχέση φάσης μεταξύ του σήματος αναφοράς και της εξόδου του VCO διότι η έξοδος του ανιχνευτή φάσης οδηγεί απευθείας τον VCO.

Ένας βρόχος δεύτερης τάξης έχει επιπρόσθετο βαθυπερατό φιλτράρισμα μέσα στο βρόχο ανάδρασης, προσεκτικά σχεδιασμένο, έτσι ώστε να αποφεύγονται αστάθειες. Αυτό του επιτρέπει να λειτουργεί σαν διάταξη αποθήκευσης ενέργειας και επίσης μειώνει την περιοχή σύλληψης (capture range) αυξάνοντας τον χρόνο σύλληψης (capture time). Ακόμη περισσότερο, όταν χρησιμοποιούμε τους

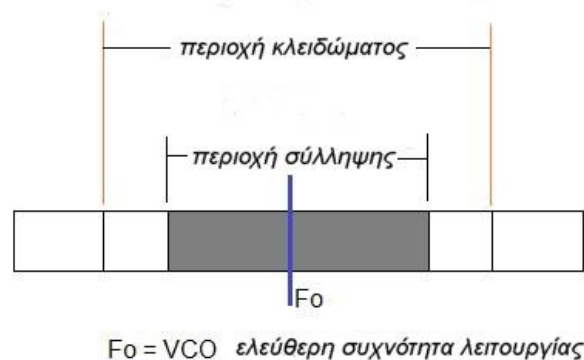
ανιχνευτές φάσης τύπου Π, ένας βρόχος δεύτερης τάξης εγγυάται κλείδωμα φάσης με μηδενική διαφορά φάσης μεταξύ των σημάτων αναφοράς και VCO.

Οι βρόχοι δεύτερης τάξης χρησιμοποιούνται σχεδόν παντού, διότι οι εφαρμογές των PLL συχνά απαιτούν σήματα με συχνότητα εξόδου με χαμηλό θόρυβο φάσης και κάποιας μορφής προσωρινής αποθήκευσης ενέργειας (Flywheel action). Οι βρόχοι δεύτερης τάξης επιτρέπουν υψηλό κέρδος βρόχου σε χαμηλές συχνότητες γεγονός που οδηγεί σε διατάξεις υψηλής σταθερότητας.[1]

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

Η περιοχή συχνοτήτων μέσα στις οποίες το PLL θα ανιχνεύσει την συχνότητα του σήματος εισόδου και θα κλειδώσει, εξαρτάται από την θεμελιώδη συχνότητα του VCO, ονομάζεται περιοχή κλειδώματος (PLL lock range) και περιλαμβάνει ζώνες συχνοτήτων πάνω και κάτω απ' αυτήν. Εάν η συχνότητα του σήματος εισόδου βγει εκτός της περιοχής κλειδώματος του PLL, τότε η συχνότητα του VCO μεταπηδά στη θεμελιώδη του συχνότητα.

Η περιοχή σύλληψης (PLL capture range) ενός PLL, είναι η περιοχή συχνοτήτων του σήματος εισόδου, μέσα στην οποία ο ανιχνευτής φάσης και ο VCO μπορούν να αντιδρούν αρκετά γρήγορα (δηλαδή να βγάλουν αποτέλεσμα κατά τη διάρκεια ενός κύκλου του σήματος εισόδου), έτσι ώστε να επιτυγχάνεται το κλείδωμα φάσης πριν ο συγκριτής φάσης ξεκινήσει νέο κύκλο. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6 και οι δύο περιοχές είναι συμμετρικές γύρω από την θεμελιώδη συχνότητα του PLL, με την περιοχή σύλληψης να είναι μικρότερη της περιοχής κλειδώματος.[1]



Σχήμα 2.6

## 2.4 Φίλτρα

### Ορισμός φίλτρου

Γενικά το ηλεκτρονικό φίλτρο είναι στοιχείο ή διάταξη που μπορεί να διαβιβάζει ή να διαχωρίζει σε μέρη, ή ανακόπτει ένα φάσμα συχνοτήτων, δηλαδή μια συγκεκριμένη ομάδα συχνοτήτων. Το φάσμα αυτό μπορεί να είναι είτε συνεχές, είτε διακοπτόμενο, είτε διακριτό(γραμμικό).

Από τις πιο συνιθισμένες χρήσεις των φίλτρων είναι ο αποχωρισμός του σήματος από το θόρυβο. Σήμα είναι ένα πεπερασμένο σύνολο δεδομένων συχνοτήτων που μας ενδιαφέρει. Θόρυβος είναι ένα σύνολο ανεπιθύμητων διαταραχών του σήματος που καλύπτουν ένα φάσμα συχνοτήτων. Με το

κατάλληλο ηλεκτρονικό φιλτράρισμα μπορούμε να απομακρύνουμε αλλά ανεπιθύμητα σήματα ή αυτές τις θορυβικές διαταραχές, αποκόπτοντας π.χ. το φάσμα του θορύβου όταν αυτό είναι και αφήνοντας να περάσει μόνο το φάσμα του επιθυμητού σήματος.

Κύριο χαρακτηριστικό μέγεθος ενός φίλτρου είναι η συνάρτηση μεταφοράς  $H(s)$  αυτού. Αυτή ορίζεται ως μιγαδικό πηλίκο (λόγος) της τάσης εξόδου,  $V_o(s)$  προς την αντίστοιχη τάση εξόδου  $V_i(s)$  δηλαδή:

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)}$$

όπου  $s=j\omega$  με  $\omega=2\pi f$  η κυκλική συχνότητα σήματος και  $f$  είναι η (γραμμική) συχνότητα αυτού, ενώ το  $j$  παριστάνει τη μιγαδική μονάδα ( $j=\sqrt{-1}$ ).

Στην πράξη ενδιαφέρει ιδιαίτερα το μέτρο  $|H(s)|$ , της συνάρτησης μεταφοράς, το οποίο εκφράζει το επίπεδο της ενίσχυσης ή απολαβής τάσης (σε dB) που δίνει το φίλτρο. Η καμπύλη που εικονίζει την εξάρτηση της ενίσχυσης αυτής από τη συχνότητα  $\omega$  ή  $f$ , αποτελεί την καμπύλη απόκρισης συχνοτήτων του φίλτρου.

### 2.4.1 Παθητικά και ενεργά φίλτρα

Τα ηλεκτρονικά φίλτρα χωρίζονται σε δύο μεγάλες ομάδες, τα παθητικά και τα ενεργά φίλτρα.

Τα παθητικά φίλτρα αποτελούνται μόνο από παθητικά στοιχεία, δηλαδή αντιστάσεις, πυκνωτές και πηνία. Στην πράξη έχουν σοβαρό μειονέκτημα. Ότι δηλαδή στις χαμηλές συχνότητες χρειάζονται μεγάλες επαγωγικές αντιστάσεις, άρα απαιτούν ογκώδη πηνία. Επίσης είναι μη γραμμικά και προκαλούν υποβιβασμό του σήματος, με μεγάλο συντελεστή απωλειών. Τέλος, δημιουργούν έντονα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που αποτελούν αιτία ενοχλητικώτατων ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Γι' αυτούς τους λόγους, η χρήση τους συνήθως αποφεύγεται και πραγματοποιείται μόνο εκεί όπου τα ενεργά φίλτρα μειονεκτούν, δηλαδή σε υψηλές συχνότητες και μεγάλες ισχύεις.

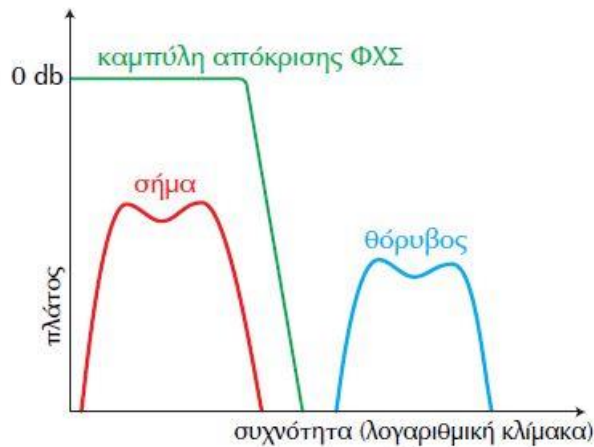
Τα ενεργά φίλτρα αποτελούνται από ενεργά στοιχεία (τρανζίστορ, τελεστικοί ενισχυτές, κτλ) συνδυασμένα με παθητικά στοιχεία (πυκνωτές και αντιστάσεις). Τα φίλτρα αυτά είναι απαλλαγμένα από τα μειονεκτήματα των παθητικών φίλτρων που αναφέραμε πιο πάνω, είναι αποδοτικά και κοστίζουν λίγο. Γι' αυτό και χρησιμοποιούνται ευρέως, ιδίως σε χαμηλές συχνότητες και χαμηλές ισχύεις.

### 2.4.2 Κατηγορίες φίλτρων

Ανάλογα με το φάσμα στις οποίες επιτρέπουν ή απαγορεύουν τη διέλευση, τα ενεργά φίλτρα χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

#### **Φίλτρα χαμηλών συχνοτήτων**

Τα φίλτρα αυτά επιτρέπουν τη διέλευση σημάτων μόνο χαμηλών συχνοτήτων, ενώ αποκόπτουν τα σήματα υψηλότερων συχνοτήτων. Η ζώνη διέλευσης τους αρχίζει από μηδενική συχνότητα (δηλαδή από σήματα dc) και φτάνει μέχρι μια συχνότητα που ονομάζεται συχνότητα αποκοπής  $f_1$  ή  $f_c$ . Από αυτήν και μετά η ενίσχυση μειώνεται δραστικά και το φίλτρο περνάει στη ζώνη αποκοπής, η συχνότητα της οποίας εκτείνεται μέχρι την άπειρη συχνότητα.

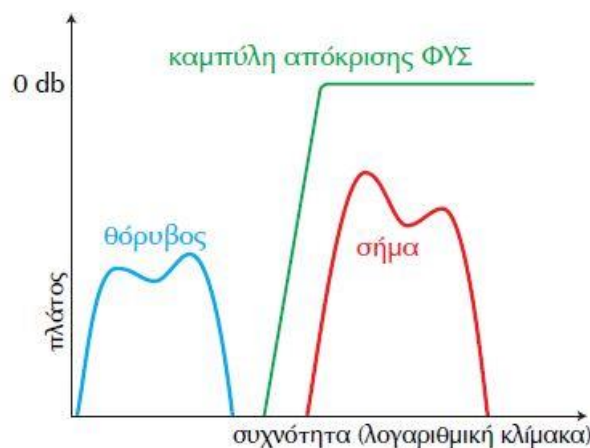


Εικόνα 2.5: Φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων

Στην περίπτωση που το φίλτρο χρησιμοποιείται για διαχωρισμό του σήματος από το θόρυβο (υψηλής συχνότητας), λαμβάνεται φροντίδα ώστε η μεν ζώνη διέλευσης να καλύπτει το φάσμα του σήματος, η δε ζώνη αποκοπής το φάσμα του θορύβου, κατά τον τρόπο που εικονίζει το εικόνα 2.5.

### Φίλτρα υψηλών συχνοτήτων

Τα φίλτρα αυτά ανακόπτουν τα σήματα χαμηλών συχνοτήτων και επιτρέπουν τη διέλευση μόνο σημάτων υψηλών συχνοτήτων. Η ζώνη αποκοπής τους αρχίζει από μηδενική συχνότητα (δηλαδή από σήματα dc) και φτάνει μέχρι μια συχνότητα από την οποία και πέρα η ενίσχυσή τους αυξάνεται γρήγορα. Στη συνέχεια από μια συχνότητα  $f_2$  και μετά, που καλείται συχνότητα αποκοπής αρχίζει η ζώνη διέλευσης η οποία εκτείνεται μέχρι την άπειρη συχνότητα.

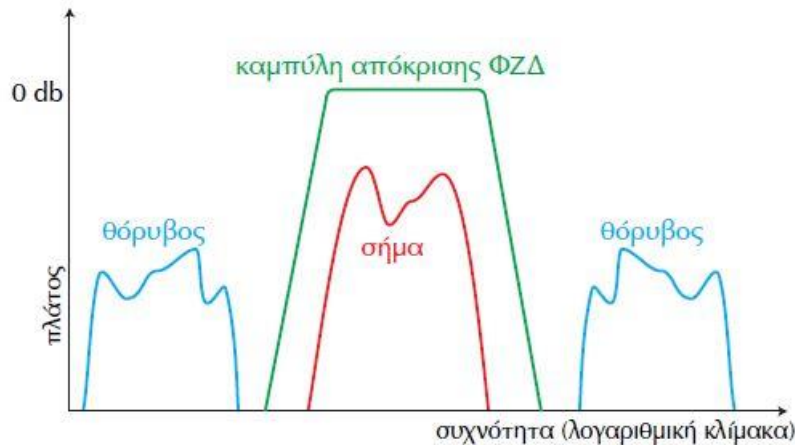


Εικόνα 2.6: Φίλτρο υψηλών συχνοτήτων

Στην περίπτωση που το φίλτρο χρησιμοποιείται για διαχωρισμό του σήματος από τον θόρυβο (χαμηλής συχνότητας), λαμβάνεται φροντίδα ώστε η μεν ζώνη αποκοπής να καλύπτει το φάσμα του θορύβου, η δε ζώνη διέλευσης το φάσμα του σήματος, κατά τον τρόπο που εικονίζει το εικόνα 2.6.

## Φίλτρα ζώνης διέλευσης

Τα φίλτρα αυτά επιτρέπουν τη διέλευση μόνο σημάτων που η συχνότητά τους περιλαμβάνεται μέσα σε μια ζώνη συχνοτήτων και ανακόπτουν όλες τις υπόλοιπες συχνότητες. Τα φίλτρα αυτά έχουν μια πρώτη ζώνη αποκοπής, από μηδενική συχνότητα (δηλαδή από το dc) μέχρι μια (κάτω) συχνότητα αποκοπής  $f_1$ , μετά ακολουθεί η ζώνη διέλευσης από τη συχνότητα  $f_1$  μέχρι μια (άνω) συχνότητα αποκοπής  $f_2$  και τέλος εμφανίζεται η δεύτερη ζώνη αποκοπής από τη συχνότητα  $f_2$  μέχρι την άπειρη συχνότητα.

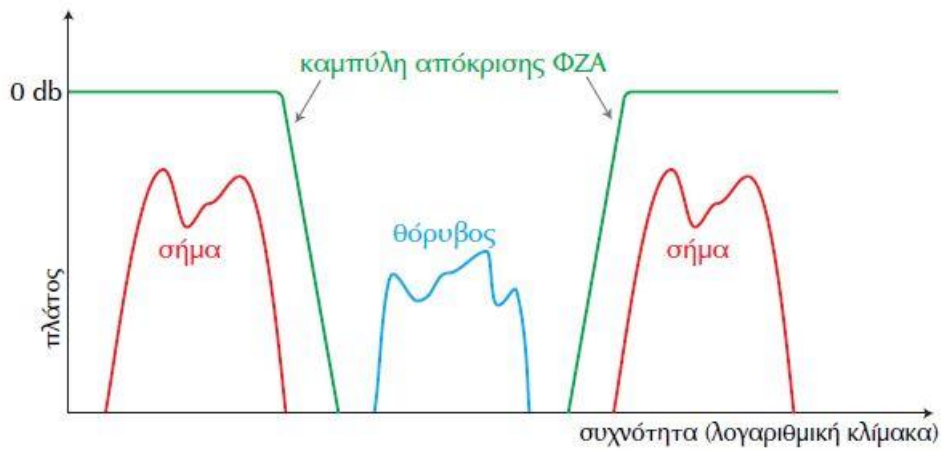


Εικόνα 2.7: Φίλτρο ζώνης διέλευσης

Αν το φίλτρο ζώνης διέλευσης χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό του σήματος από το θόρυβο χαμηλής και υψηλής συχνότητας λαμβάνεται φροντίδα ώστε η ζώνη διέλευσης να καλύπτει το φάσμα του σήματος και οι δύο ζώνες αποκοπής το φάσμα του θορύβου κατά τον τρόπο που δείχνει το εικόνα 2.7.

## Φίλτρα ζώνης αποκοπής

Τα φίλτρα αυτά ανακόπτουν μόνο σήματα που η συχνότητά τους περιλαμβάνεται μέσα σε μια ζώνη συχνοτήτων και επιτρέπουν δε τη διέλευση όλων των υπόλοιπων συχνοτήτων. Τα φίλτρα αυτά έχουν μια πρώτη ζώνη διέλευσης από μηδενική συχνότητα (δηλαδή από το dc) μέχρι μια (κάτω) συχνότητα αποκοπής  $f_1$ , μετά ακολουθεί η ζώνη αποκοπής από τη συχνότητα  $f_1$  μέχρι μια (άνω) συχνότητα αποκοπής  $f_2$  και τέλος εμφανίζεται η δεύτερη ζώνη διέλευσης από τη συχνότητα  $f_2$  μέχρι την άπειρη συχνότητα.



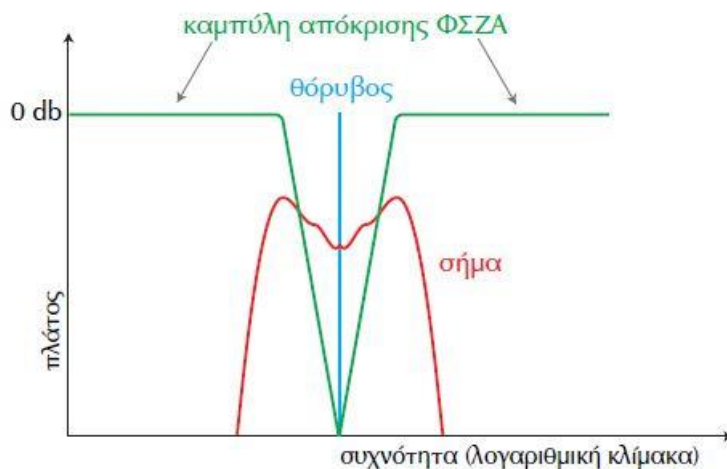
Εικόνα 2.8: Φίλτρο ζώνης αποκοπής

Στο ίδιο σχήμα εικονίζεται η συσχέτιση των ζωνών αποκοπής και διέλευσης του φίλτρου με το φάσμα σήματος και το φάσμα θορύβου, για την περίπτωση που το φίλτρο χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό του σήματος από το θόρυβο.

Το φίλτρο ζώνης αποκοπής μπορεί να προκύψει αν συνδυάσουμε παράλληλα ένα φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων με ένα φίλτρο υψηλών συχνοτήτων και τα σήματα τους τα οδηγήσουμε σ' ένα αναλογικό αθροιστή.

### Φίλτρα στενής ζώνης διέλευσης

Τα φίλτρα αυτά επιτρέπουν τη διέλευση μόνο μιας στενής ζώνης συχνοτήτων, εστιασμένης γύρω από μια κεντρική συχνότητα  $f_0$ , ενώ αποκόπτουν όλες τις άλλες συχνοτήτες.

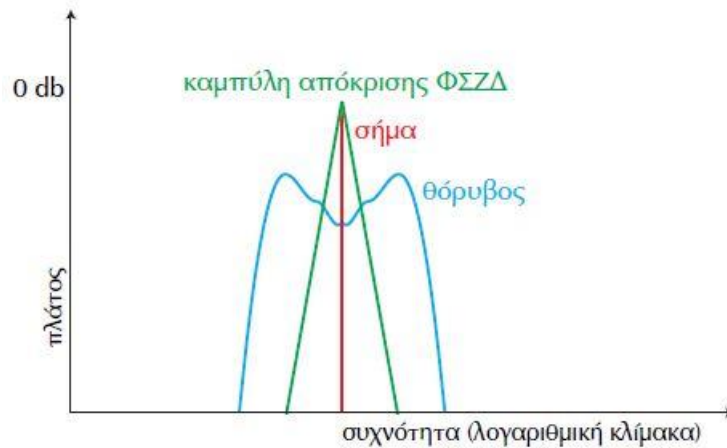


Εικόνα 2.9: Φίλτρο στενής ζώνης διέλευσης

Είναι προφανές ότι τα φίλτρα αυτά είναι ιδιαίτερα χρήσιμα όταν το σήμα έχει φάσμα συγκεντρωμένο μέσα σε μια στενή ζώνη συχνοτήτων γύρω από μια κεντρική συχνότητα  $f_0$ .

## Φίλτρα στενής ζώνης αποκοπής

Τα φίλτρα αυτά που ονομάζονται και φίλτρα δοντιού αποκόπτουν μια στενή ζώνη συχνοτήτων, απορρίπτοντας μόνο τις συχνότητες που βρίσκονται σε μια στενή περιοχή γύρω από μια κεντρική συχνότητα  $f_0$ , ενώ επιτρέπουν τη διέλευση όλων των άλλων συχνοτήτων.



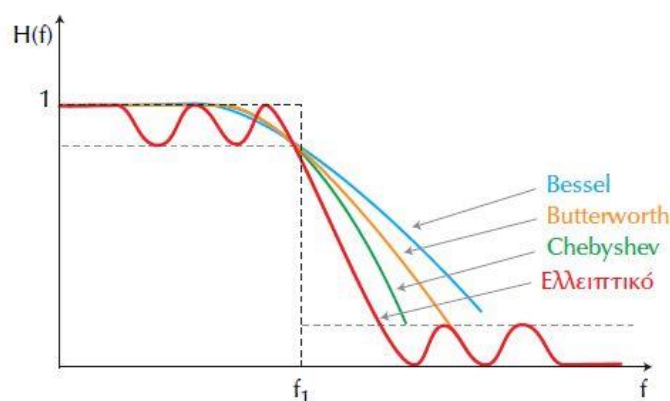
Εικόνα 2.10: Φίλτρο στενής ζώνης αποκοπής

Είναι προφανές ότι τα φίλτρα αυτά είναι ιδιαίτερα χρήσιμα όταν θέλουμε να απαλλάξουμε το σήμα από θόρυβο ισχυρά εντοπισμένο και συγκεντρωμένο γύρω από μια συχνότητα  $f_0$ .

Τα φίλτρα αυτά είναι χρήσιμα στο να κόβουμε τα 50Hz του δικτύου που πολλές φορές είναι ανεπιθύμητα στις ηλεκτρονικές ιατρικές συσκευές.

### 2.4.3 Οικογένειες φίλτρων

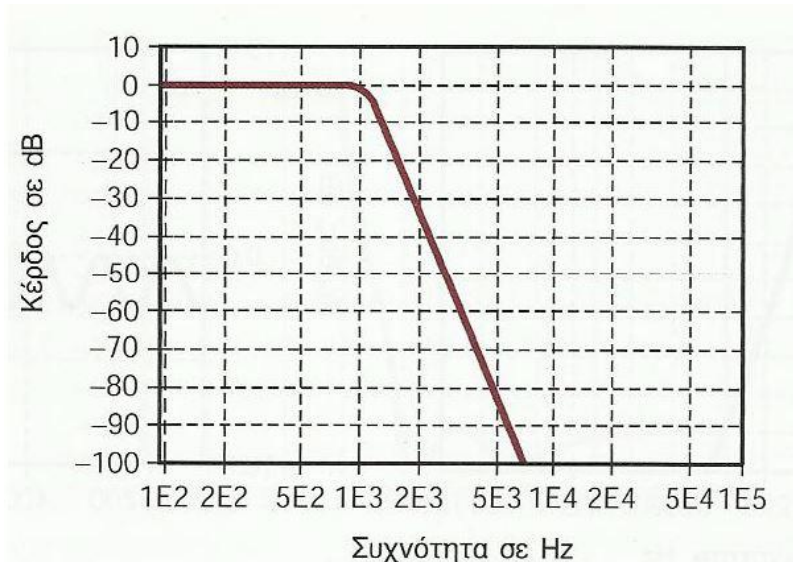
Στη μαθηματική ανάλυση των φίλτρων έχουν αναπτυχθεί διάφορα μαθηματικά μοντέλα (πρότυπα) και κυκλώματα με τα οποία προσπαθούμε να επιτύχουμε μια όσο το δυνατόν καλύτερη προσομοίωση της συμπεριφοράς των ιδανικών φίλτρων. Τα μοντέλα αυτά ταξινομούνται στις εξής τέσσερις οικογένειες: Τα φίλτρα Butterworth, τα φίλτρα Chebyshev, τα φίλτρα Bessel και τα ελλειπτικά φίλτρα. Η παρακάτω εικονίζει τις τυπικές καμπύλες απόκρισης αυτών των φίλτρων.



Εικόνα 2.11: Απόκριση συχνότητας ανάλογα με το μοντέλο του φίλτρου

## Προσέγγιση Butterworth

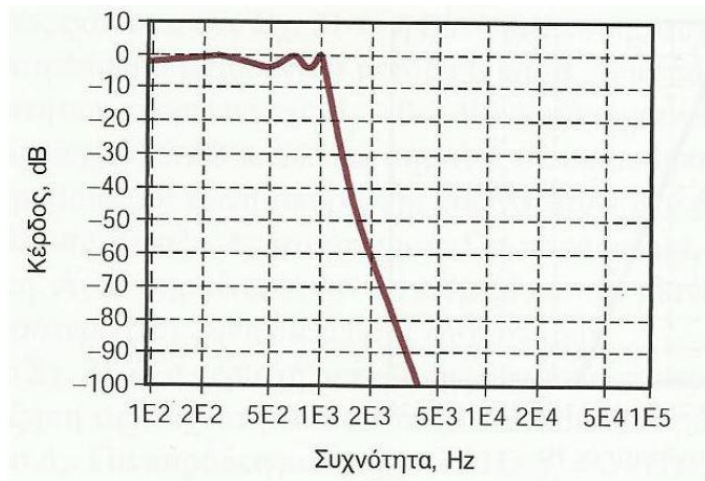
Η προσέγγιση Butterworth περιγράφηκε πρώτη φορά το 1930 από τον Βρετανό μηχανικό Stephen Butterworth απ' όπου πήρε και την ονομασία. Μερικές φορές ονομάζεται προσέγγιση μέγιστης επίπεδου απόκρισης (maximally flat approximation) επειδή η εξασθένιση στη ζώνη διέλευσης συχνοτήτων είναι μηδενική σε όλη σχεδόν τη ζώνη διέλευσης συχνοτήτων και μειώνεται σταδιακά στο άκρο της ζώνης αυτής. Η απόκριση στη ζώνη διέλευσης συχνοτήτων είναι ομοιόμορφη. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα ενός φίλτρου Butterworth είναι η ομοιομορφία της απόκρισης της ζώνης διέλευσης συχνοτήτων ενώ το κυριότερο μειονέκτημα είναι ο σχετικά αργός ρυθμός μεταβολής.[10]



Εικόνα 2.12: Απόκριση φίλτρου τύπου Butterworth

## Προσέγγιση Chebyshev

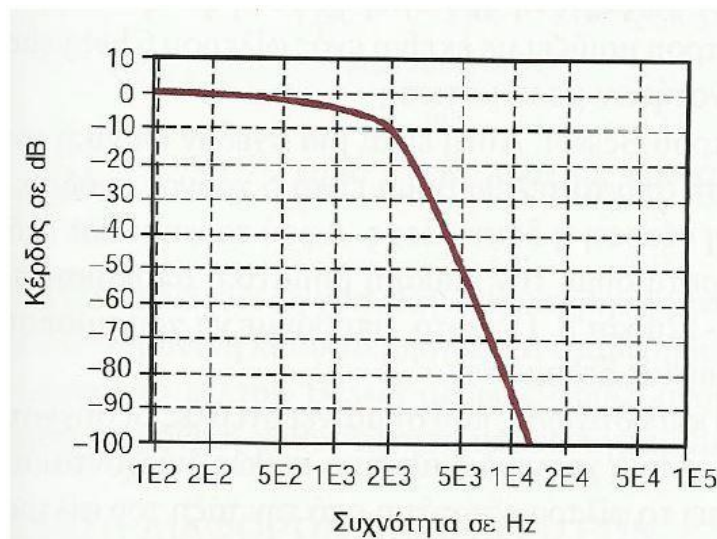
Σε ορισμένες εφαρμογές η ομοιόμορφη απόκριση της ζώνης διέλευσης συχνοτήτων δεν είναι σημαντική. Στην περίπτωση αυτή μπορούμε να προτιμήσουμε την προσέγγιση Chebyshev επειδή μειώνεται γρηγορότερα στην περιοχή μετάβασης απ' ό,τι ένα φίλτρο Butterworth. Μειώνει δηλαδή τη διαφορά μεταξύ μιας ιδανικής και μιας πραγματικής απόκρισης. Το τίμημα για τη γρηγορότερη αυτή μείωση είναι η εμφάνιση κυμάτωσης στη ζώνη διέλευσης συχνοτήτων. Η ονομασία προέρχεται από τον Ρώσο μαθηματικό Pafnuty Chebyshev και τους μαθηματικούς τύπους.[10]



Εικόνα 2.13: Απόκριση φίλτρου τύπου Chebysev

### Προσέγγιση Bessel

Η προσέγγιση Bessel έχει ομοιόμορφη ζώνη διέλευσης συχνοτήτων και μονοτονική ζώνη απόρριψης συχνοτήτων παρόμοια με εκείνη της προσέγγισης Butterworth. Ωστόσο για την ίδια τάση φίλτρου ο ρυθμός μεταβολής στην περιοχή μετάδοσης είναι πολύ μικρότερος με ένα φίλτρο Bessel απ' ότι με ένα Butterworth. Το φίλτρο έχει επίπεδη ζώνη διέλευσης συχνοτήτων ένα σχετικά αργό ρυθμό μεταβολής και μονοτονική ζώνη απόρριψης συχνοτήτων. Η προσέγγιση Bessel θα παρέχει πάντα τον αργότερο ρυθμό μεταβολής από τις άλλες προσεγγίσεις. Με άλλα λόγια έχει την υψηλότερη τάξη ή την μεγαλύτερη πολυπλοκότητα από όλες τις προσεγγίσεις.[10]



Εικόνα 2.14: Απόκριση φίλτρου τύπου Bessel

### Ελλειπτικό

Αυτό το φίλτρο έχει την γρηγορότερη εναλλαγή στην μετάβαση από την ζώνη αποκοπής στην ζώνη διέλευσης με κόστος αρκετών κυματώσεων και στις δυο αυτές περιοχές. Μπορεί να σχεδιασθεί για να έχει πολύ μεγάλη απόσβεση σε συγκεκριμένες συχνότητες στην ζώνη αποκοπής μειώνοντας όμως την απόσβεση άλλων συχνοτήτων σε αυτήν την ζώνη.[10]

## 2.5 Μικροελεγκτής

### 2.5.1 Εισαγωγή

Έναν ορισμό που θα μπορούσαμε να δώσουμε για τους μικροελεγκτές είναι ο εξής: Μικροελεγκτής είναι ένα προγραμματιζόμενο ολοκληρωμένο κύκλωμα το οποίο διαθέτει επεξεργαστή, μνήμη, διάφορα περιφερειακά κυκλώματα καθώς επίσης και θύρες εισόδου/εξόδου για επικοινωνία με εξωτερικές συσκευές.

Όταν επιλέγεται ένας τύπος μικροελεγκτή για μια συγκεκριμένη εφαρμογή θα πρέπει να είναι απολύτως βέβαιο να πληρεί τις προδιαγραφές που έχουν ήδη καθοριστεί.

Εξίσου ένας σημαντικός παράγοντας είναι και το κόστος, γι' αυτό το λόγο πρέπει να εξετάζονται κάποιες συγκεκριμένοι παράμετροι:

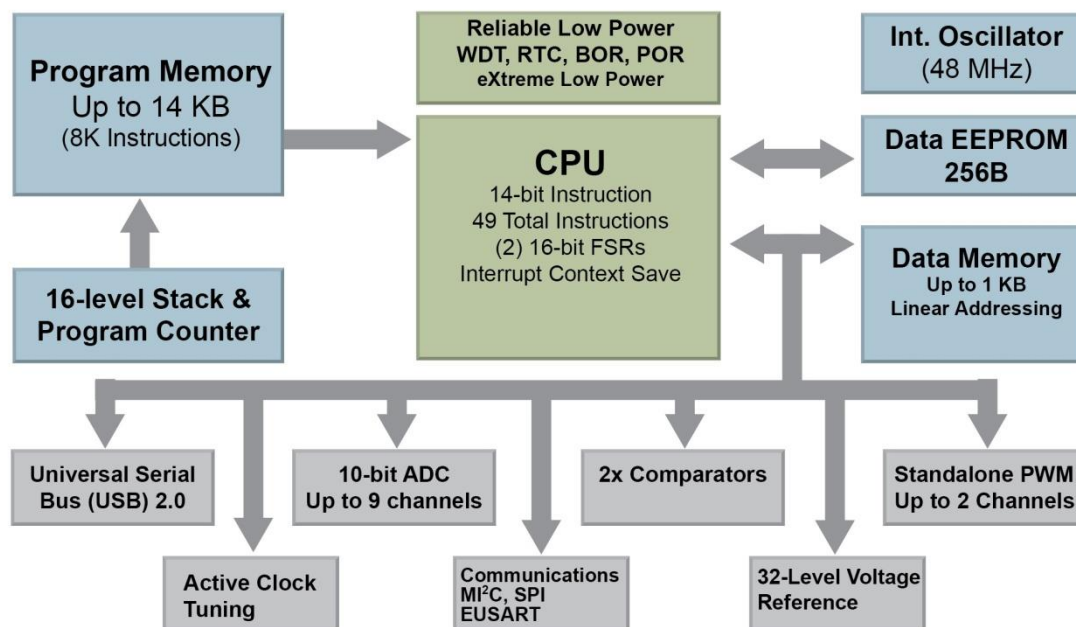
- Απλές απαιτήσεις τροφοδοσίας, χρονισμού και συστήματος επανατοποθέτησης (reset).
- Αναπτυξιακά εργαλεία λογισμικού και χαμηλού κόστους. Ικανοποιητικά μεγάλη βάση πρόσβασης από την πλευρά του χρήστη.
- Παρακαταθήκη ετοιμοπαράδοτων υλικών.

Όσον αφορά τους μικροελεγκτές PIC είναι κανείς δυνατόν να διαπιστώσει ότι υπάρχει μεγάλη ποικιλία διατάξεων με διάφορες χαρακτηριστικές ιδιότητες. Οι μικροελεγκτές PIC διαθέτουν ικανοποιητικά μεγάλη περιοχή πρόσβασης από την πλευρά του χρήστη, καθιερωμένη για όλα τα μέλη της σειράς. Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι το επίπεδο της υποστήριξης από την Microchip το οποίο κυμαίνεται από συστήματα προγραμματισμού και προσομοίωσης έως διάθεση δωρεάν αναπτυξιακών εργαλείων λογισμικού.[3]

Ο κάθε μικροελεγκτής αποτελεί ένα ολοκληρωμένο μικροϋπολογιστικό σύστημα. Διαθέτει δηλαδή όλα τα απαραίτητα στοιχεία που χρειάζονται για να λειτουργήσει αυτόνομα. Τα στοιχεία αυτά είναι:

- Κεντρική μονάδα επεξεργασίας
- Μνήμη
- Περιφερειακά
- Σύστημα χρονισμού μετρητών κλπ.

## PIC16F145X 8-bit MCU Family



Εικόνα 2.15: Δομή μικροελεγκτή

### 2.5.2 Ιστορική Αναδρομή

Ο PIC ήταν αρχικά ένα σχέδιο της εταιρίας General Instruments και αποσκοπούσε σε απλές εφαρμογές ελέγχου. Έτσι προέκυψε και η ονομασία PIC ( Peripheral Interface Controller ). Στα τέλη του 1970 η General Instruments παρήγαγε τους πρώτους επεξεργαστές PIC 1650 και PIC 1655. Αν και αυτά τα ολοκληρωμένα κυκλώματα ήταν πλήρως αυτόνομα και περιείχαν μερικά σημαντικά και προοδευτικά χαρακτηριστικά, ήταν χοντροκομμένα και ανορθόδοξα. Η αρχιτεκτονική των πρώτων μικροελεγκτών ονομάστηκε RISC και είχε έναν μοναδικό καταχωρητή εργασίας με μόλις 30 εντολές. Οι ακροδέκτες εξόδου ήταν δυνατό να αποδώσουν περισσότερο ρεύμα σε σχέση με τους άλλους μικροελεγκτές της εποχής. Έτσι τα χαρακτηριστικά στοιχεία του PIC άρχισαν να εμφανίζονται αμέσως απλότητα, αυτονομία, υψηλή ταχύτητα και χαμηλό κόστος.



Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990 η ποικιλία των διαθέσιμων μικροελεγκτών PIC μεγάλωσε και σταδιακά οι δυνατότητές τους ξεπέρασαν αυτές των πιο καθιερωμένων ανταγωνιστών της General Instruments. Οι μικροελεγκτές PIC σε αρκετές περιπτώσεις μπορούσαν να λειτουργήσουν πιο γρήγορα, απαιτούσαν πιο απλό σύνολο από άλλα ολοκληρωμένα κυκλώματα και ήταν πιο γρήγορη η παραγωγή προτύπων σε σχέση με τον ανταγωνισμό. Σε αντίθεση με τους ανταγωνιστές,

η Microchip έκανε τα αναπτυξιακά της εργαλεία απλά και τα παρείχε σε χαμηλό κόστος ή χωρίς χρέωση. Επιπλέον η Microchip έμεινε σταθερά εδραιωμένη στον κόσμο των 8 δυαδικών ψηφίων.

Μελετώντας την ποικιλία των μικροελεγκτών PIC σήμερα ο καθένας μπορεί δικαιολογημένα να προσέλθει σε σύγχυση. Υπάρχουν πραγματικά εκατοντάδες διαφορετικές συσκευές που προσφέρονται σε διαφορετικές συσκευασίες και για διαφορετικές εφαρμογές. Γι' αυτό το λόγο αξίζει μία προσπάθεια προσδιορισμού των χαρακτηριστικών που είναι κοινά σε όλους αυτούς τους μικροελεγκτές.

Όλοι οι ελεγκτές PIC έχουν ένα κοινό πυρήνα. Αυτό σημαίνει ότι μεταξύ όλων των μελών της σειράς υπάρχει μεγάλος βαθμός συμβατότητας από άποψη του λογισμικού και της εσωτερικής κυκλωματικής διασύνδεσης. Έτσι παρατηρώντας απλώς την λίστα των διάφορων μελών της σειράς αντιλαμβάνεται κανείς ότι υπάρχουν πάρα πολλοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη προκειμένου να επιλεγεί ένα συγκεκριμένος τύπος. Ο πυρήνας γύρω από τον οποίο δομείται ο επεξεργαστής των PIC, ανήκει σε μία αρχιτεκτονική γνωστή ως “ Αρχιτεκτονική Harvard ”.

Πριν από χρόνια το υπουργείο Εθνικής Άμυνας των ΗΠΑ ζήτησε από τα πανεπιστήμια του Princeton και Harvard να κατασκευάσουν ένα τύπο υπολογιστή με σκοπό τη σχεδίαση τροχιάς βλημάτων πυροβολικού. Το Harvard παρουσίασε μια αρχιτεκτονική στα πλαίσια της οποίας το τμήμα μνήμης χωρίζεται σε δύο μέρη. Το ένα χρησιμοποιείται για την αποθήκευση του προγράμματος γνωστό σε μας σαν μνήμη ελέγχου, ενώ το άλλο χρησιμοποιείται για προσωρινή αποθήκευση μεταβλητών γνωστό σε μας σαν μνήμη τυχαίας προσπέλασης ( μνήμη RAM). Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου ήταν ότι η ανάκληση των εντολών του προγράμματος από την μνήμη ελέγχου μπορούσε να πραγματοποιηθεί ταυτόχρονα με την διαδικασία πρόσβασης στη μνήμη RAM. Η αρχιτεκτονική που παρουσίασε το Princeton χρησιμοποιούσε την ίδια μνήμη ως μνήμη ελέγχου και ως μνήμη RAM. Αυτή η αρχιτεκτονική ονομάστηκε “ Von Neumann ”.

Η ιδέα του διαχωρισμού του συστήματος μνήμης σε μνήμη ελέγχου και μνήμη δεδομένων , που επικρατούσε στην αρχιτεκτονική του Harvard, έδινε ένα πολύ πιο γρήγορο σύστημα από αυτό του

Von Neumann αλλά και πολύ πιο ακριβό. Τα παραπάνω διαδραματιστήκαν στα μέσα περίπου της δεκαετίας του 1970. Σήμερα η Microchip διαθέτει μία πλήρη σειρά μικροελεγκτών PIC τεχνολογίας CMOS με μια πληθώρα χαρακτηριστικών που τους καθιστά κατάλληλους για πάρα πολλές εφαρμογές.

## 3 Θεωρητική Προσέγγιση Κυκλώματος

### 3.1 Υπολογισμός PLL

Το κύκλωμα του PLL θα σχεδιασθεί με βάση τις συχνότητες των πράσινων χρωμάτων. Στη συνέχεια για να έχουμε και τις άλλες αποχρώσεις των άλλων 2 χρωμάτων (μπλε και κόκκινο) η μόνη αλλαγή που θα γίνεται είναι στον πυκνωτή  $C_1$  με τον οποίο καθορίζεται η συχνότητα  $F_0$  του VCO. Δηλαδή αλλάζοντας την τιμή του  $C_1$  θα αλλάζει η κεντρική συχνότητα και επομένως η περιοχή που θα λειτουργεί το PLL. Έτσι με αυτόν τον τρόπο καλύπτουμε 3 διαφορετικές περιοχές που θα λειτουργεί το κύκλωμα για τα 3 διαφορετικά χρώματα.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι αποχρώσεις του πράσινου χρώματος τις οποίες το PLL μπορεί να αναγνωρίσει καθώς και τα ποσοστά RGB όπως και η συχνότητα του κάθε χρώματος.

#### Αποχρώσεις πράσινου χρώματος

Χρώμα	R	G	B	Συχνότητα
Green	0	128	0	19.1 kHz
Forest Green	34	139	34	20 kHz
Sea Green	46	142	87	23.2 kHz
Olive Drab	107	142	35	24.1kHz
Lime	0	255	0	26.5kHz
Medium Sea Green	60	211	113	29 kHz
Spring Green	0	255	127	29.5 kHz
Medium Spring Green	0	250	154	30.8 kHz

Πίνακας 3.1: Αποχρώσεις Πράσινου

Με βάση τις συχνότητες των αποχρώσεων του πράσινου χρώματος ορίζουμε  $\Delta f = 17\text{kHz}$  και την κεντρική συχνότητα του VCO ίση με  $F_0 = 25\text{kHz}$ .

Το εύρος της συχνότητας κλειδώματος (lock range), καθορίζεται από την σχέση  $2F_L = F_{\max} - F_{\min}$  και αν υποθέσουμε ότι  $F_L = 2F_c$  τότε έχουμε:

$\Delta F = 2F_c = 17\text{kHz}$  και  $2F_L = 2F_c \cdot 2 = 34\text{kHz}$  οπότε προκύπτουν οι συχνότητες που μας αφορούν γύρω από την κεντρική συχνότητα του VCO.

$F_{L(\min)} = 8\text{kHz}$ ,  $F_{C(\min)} = 16.5\text{kHz}$ ,  $F_0 = 25\text{kHz}$ ,  $F_{C(\max)} = 33.5\text{kHz}$ ,  $F_{L(\max)} = 42\text{kHz}$

Στη συνέχεια θα καθορίσουμε την περιοχή που μπορεί το PLL να πραγματοποιήσει σύλληψη, δηλαδή να μπορεί να αντιληφθεί την συχνότητα (capture range). Για τον τύπο 1 συγκριτή φάσης που θα χρησιμοποιήσουμε, αυτή εξαρτάται από τις τιμές του εξωτερικού RC βαθυπερατού φίλτρου και δίνεται από την σχέση:

$$2F_c \approx \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{2\pi F_L}{R3C3}} \Rightarrow 17 \cdot 10^3 = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{2\pi \cdot 17 \cdot 10^3}{R3C3}} \Rightarrow 17 \cdot 10^3 = \frac{1}{\pi} \frac{326.74}{\sqrt{R3C3}} \Rightarrow \sqrt{R3C3} = 6.12 \cdot 10^3 \Rightarrow R3C3 = 37.45 \cdot 10^{-6}$$

Οπότε αν θέσουμε  $C_3=10nF$  προκύπτει  $R_3=3.7k\Omega$

Οι τιμές της αντίστασης  $R_1$  και  $C_1$  για την κεντρική συχνότητα  $F_0=25kHz$  και  $V_{CC}=10V$  καθορίζονται από τα γραφήματα του datasheet ως:  $R_1=10k\Omega$   $C_1=6.5nF$

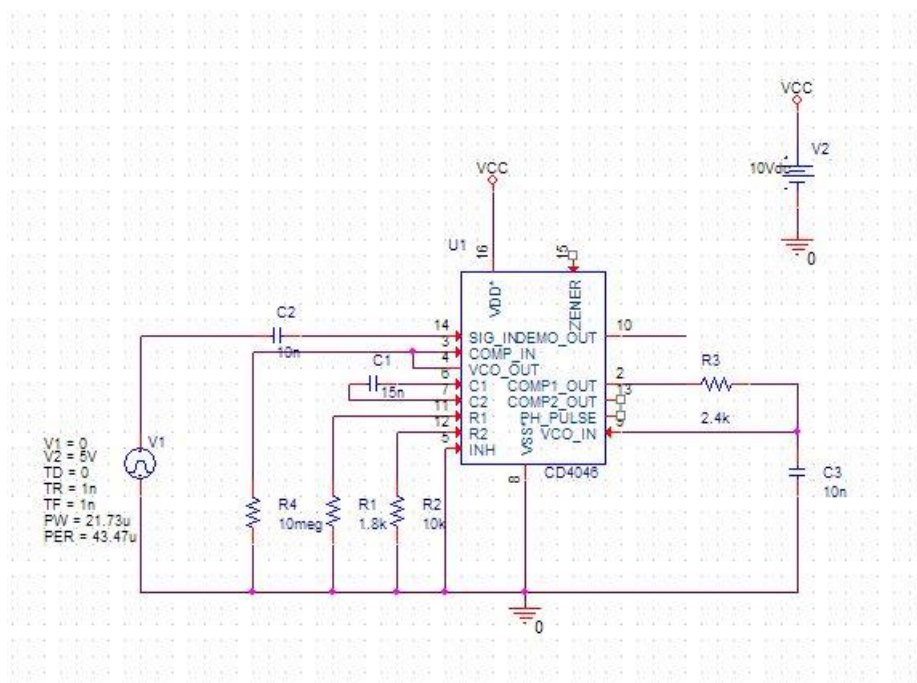
Για να ολοκληρώσουμε τον υπολογισμό μας, τα datasheet μας δίνουν και μια πιο μικρομετρική ρύθμιση των αντιστάσεων  $R_1, R_2$  χρησιμοποιώντας τον λόγο των συχνοτήτων  $F_{L(max)}/F_{L(min)}$ .

$$\frac{F_{L(max)}}{F_{L(min)}} = \frac{42kHz}{8kHz} = 5.25$$

Από το διάγραμμα μπορούμε να καθορίσουμε περίπου τον λόγο  $R_2/R_1$  που μας δίνει λόγο συχνοτήτων 5.25 περίπου στο 5.8. Άρα κρατώντας σταθερή την  $R_2=10k\Omega$ , προκύπτει τιμή για την  $R_1= 1.72k\Omega$ .

## Σημείωση

Σύμφωνα με τον κατασκευαστή οι υπολογισμοί για το πραγματικό κύκλωμα μπορούν να έχουν απόκλιση 30%. Επίσης κατά την προσομοίωση του κυκλώματος στο μοντέλο του PSPICE παρατηρήθηκε ότι υπάρχει κάποιο σφάλμα στο μοντέλο του PLL. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος αλλάχθηκε η τιμή της χωρητικότητας του πυκνωτή  $C_1$ , δηλαδή  $C_1=15n$



Εικόνα 3.1: Κύκλωμα PLL για αποχρώσεις πράσινου

## 3.2 Βαθυπερατό φίλτρο 2<sup>ης</sup> τάξης

Για άνω οριακή συχνότητα του φίλτρου  $F_c=1kHz$  και με συντελεστές  $m=1.666$  και  $n=2.127$  υπολογίζουμε τις αντιστάσεις και τους πυκνωτές που αποτελούν το φίλτρο.

Γι αυτό το κύκλωμα ισχύει:  $R_5=mR$ ,  $R_6=R$ ,  $C_5=C$ ,  $C_6=nC$  και έχει σαν αποτέλεσμα:

$$F_c = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{mn}} \text{ και } Q = \frac{\sqrt{mn}}{m+1}$$

Οπότε θέτοντας τιμές του εμπορίου για τους πυκνωτές ορίζουμε:

$$C=C_5=4.7\text{nF} \text{ και } C_6=nC=2.127 \cdot 4.7\text{nF}=10\text{nF}$$

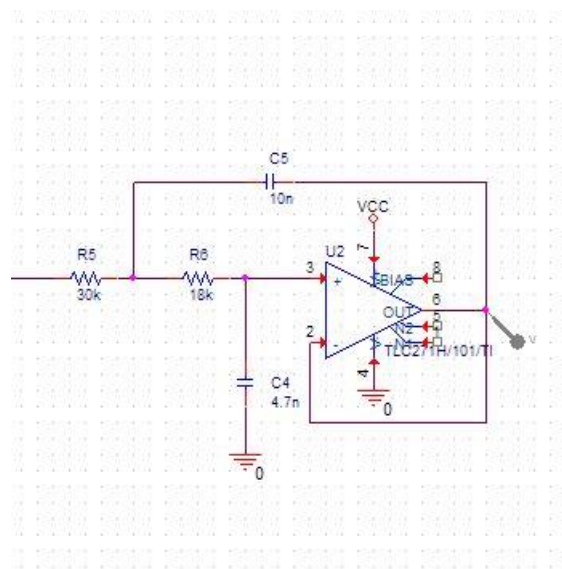
Στη συνέχεια από την άνω οριακή συχνότητα του φίλτρου  $f_m=1\text{kHz}$  υπολογίζουμε την τιμή της  $R$ .

$$F_c = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{mn}} \Rightarrow R = \frac{1}{2\pi f_c C\sqrt{mn}} = \frac{1}{2\pi \cdot 1\text{kHz} \cdot 4.7\text{nF} \cdot \sqrt{1.666 \cdot 2.127}} = 18\text{k}\Omega$$

$$\text{Άρα } R_6=18\text{k}\Omega \text{ και } R_5=mR=1.666 \cdot 18\text{k}\Omega=30\text{k}\Omega$$

Και το  $Q$  του φίλτρου που θα πρέπει να ικανοποιεί το κριτήριο BUTTERWORTH για απόκριση -3dB στην άνω οριακή συχνότητα επιβεβαιώνεται ως:

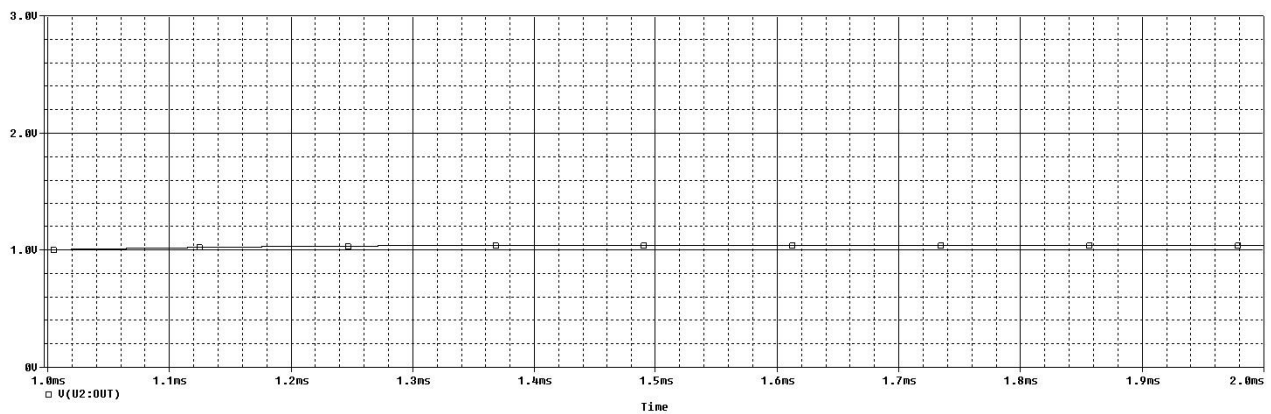
$$Q = \frac{\sqrt{mn}}{m+1} = \frac{\sqrt{1.666 \cdot 2.127}}{1.666+1} = 0.707$$



Εικόνα 3.27: Κύκλωμα φίλτρου

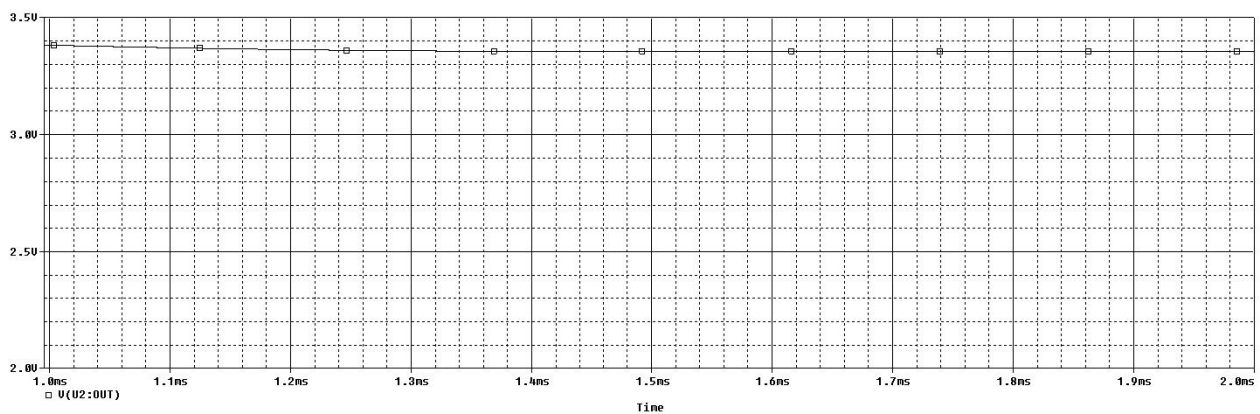
### 3.3 Κύκλωμα PLL – PSPICE

#### 3.3.1 Αποχρώσεις πράσινου χρώματος



Εικόνα 3.3: Εξόδος φίλτρου για το χρώμα Green

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται η τάση εξόδου του φίλτρου όταν στην είσοδο του αισθητήρα αναγνωρισθεί το χρώμα Green το οποίο είναι το πρώτο χρώμα για τις αποχρώσεις του πρασίνου.



Εικόνα 3.4: Εξόδος φίλτρου για το χρώμα Medium Spring Green

Στην συγκεκριμένη εικόνα απεικονίζεται η τάση εξόδου από το βαθυπερατό φίλτρο όταν αναγνωρισθεί το χρώμα Medium Spring Green.

#### 3.3.2 Αποχρώσεις μπλε χρώματος

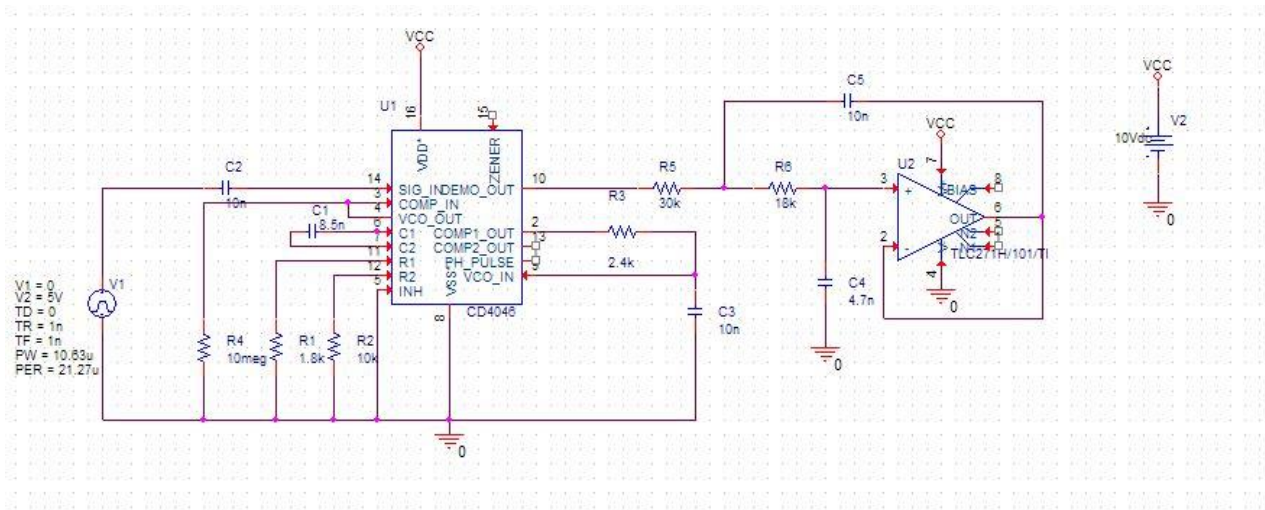
Στον παρακάτω πίνακα καταγράφονται οι αποχρώσεις του μπλε χρώματος τις οποίες το κύκλωμα PLL θα μπορεί να αναγνωρίσει. Επίσης καταγράφονται και τα ποσοστά του RGB της κάθε απόχρωσης καθώς και η συχνότητά της.

Χρώμα	R	G	B	Συχνότητα
Cadet Blue	95	158	168	36kHz
Corn Flower Blue	100	149	237	40kHz
Dep Sky Blue	0	191	255	44.25kHz
Cyan	0	255	255	47.85kHz
Aqua Marine	127	255	212	55.25kHz
Sky Blue	135	206	235	58.48kHz

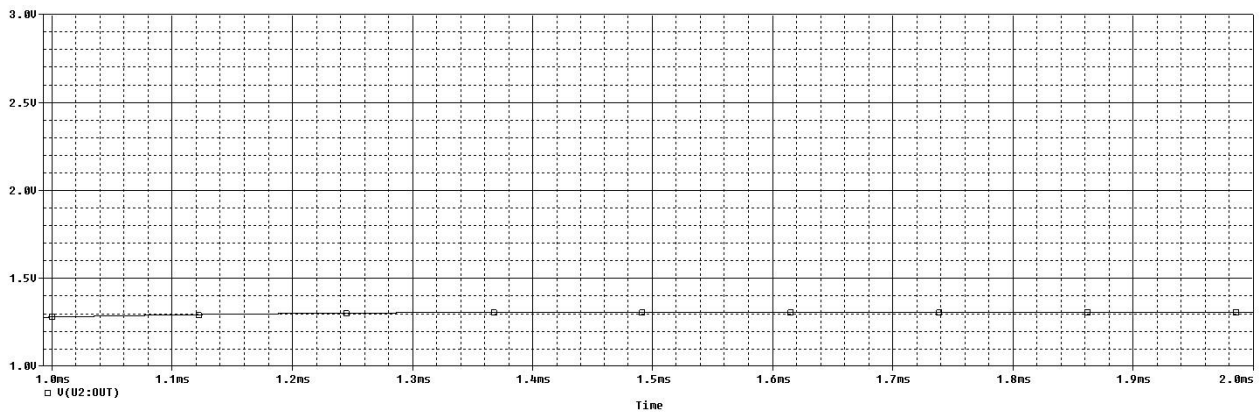
Πίνακας 3.2: Αποχρώσεις Μπλε

Οι συχνότητες των μπλε αποχρώσεων κυμαίνονται από 36kHz – 59kHz οπότε θέτουμε την κεντρική συχνότητα του VCO ίση με  $F_0=47\text{kHz}$ . Η τιμή του  $C_1$  για αυτήν την συχνότητα και με τάση τροφοδοσίας  $V_{cc}=10\text{V}$  καθορίζεται από τα γραφήματα του datasheet ως  $C_1=4\text{nF}$

Κατά την προσομοίωση του κυκλώματος στο μοντέλο του PSPICE παρατηρήθηκε ότι υπάρχει κάποιο σφάλμα στο μοντέλο του PLL. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος αλλάχθηκε η τιμή της χωρητικότητας του πυκνωτή  $C_1$ , δηλαδή  $C_1=8.5\text{n}$

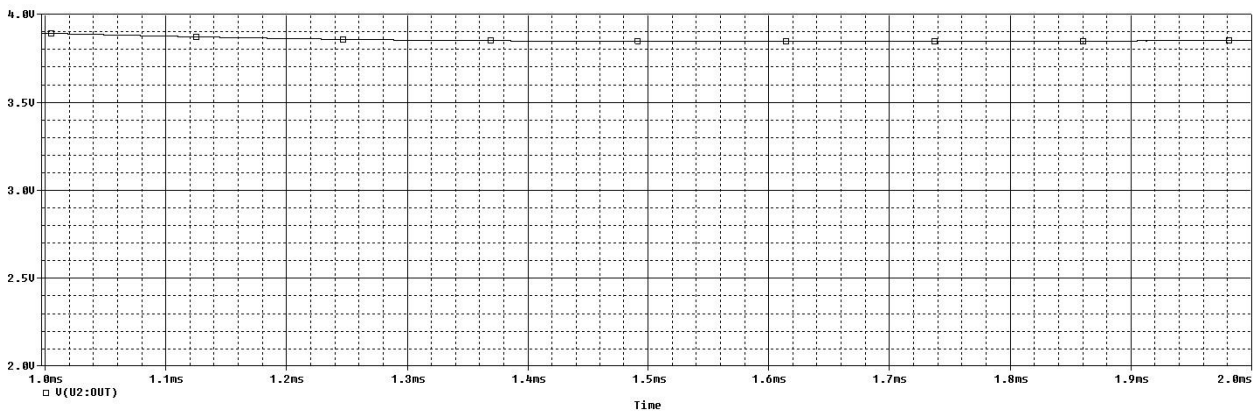


Εικόνα 3.5: Κύκλωμα PLL για αποχρώσεις μπλε



Εικόνα 3.6: Έξοδος φίλτρου για το χρώμα Cadet Blue

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται η τάση εξόδου του φίλτρου όταν το κύκλωμα του PLL λειτουργεί για τις αποχρώσεις του μπλε και έχει αναγνωρισθεί το χρώμα Cadet Blue το οποίο είναι το πρώτο χρώμα για τις αποχρώσεις του μπλέ.



Εικόνα 3.7: Έξοδος φίλτρου για το χρώμα Sky Blue

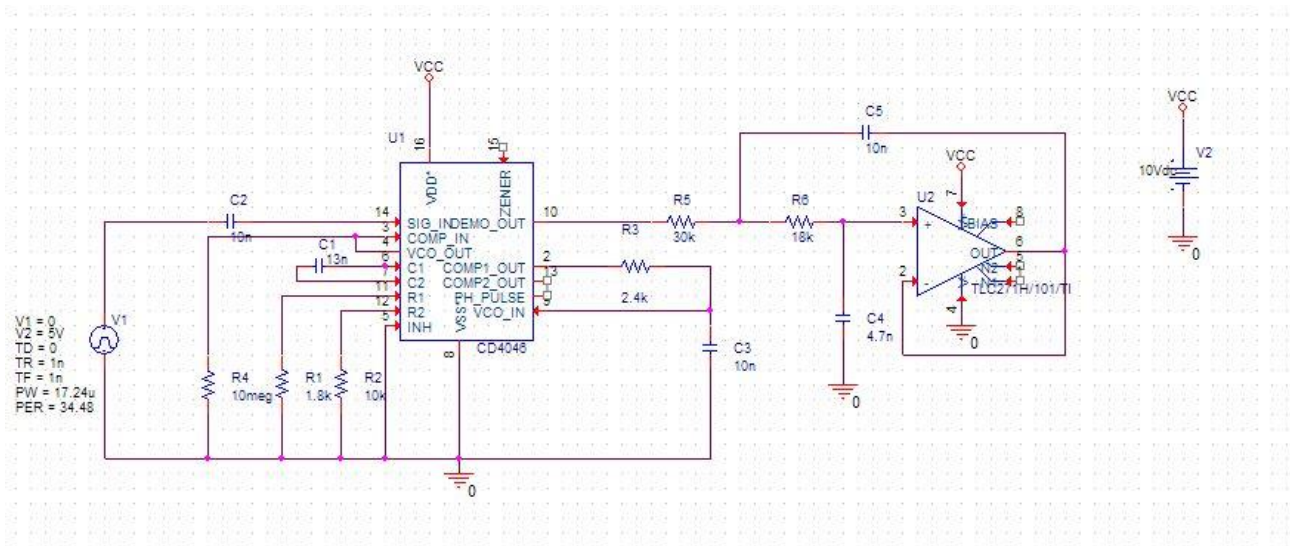
Στην συγκεκριμένη περίπτωση φαίνεται η τάση εξόδου του φίλτρου όταν αναγνωρισθεί το χρώμα Sky Blue το οποίο είναι το τελευταίο χρώμα στην κατηγορία αυτή.

### 3.3.3 Αποχρώσεις κοκκινού χρώματος

Τα χρώματα του κόκκινου τα οποία θα μπορούν να αγνωριστούν από το κύκλωμα μας καταγράφονται στον παρακάτω πίνακα. Ακόμη στον πίνακα έχουν καταγραφή και τα ποσοστά του RGB καθώς και η συχνότητα για το κάθε χρώμα.

Χρώμα	R	G	B	Συχνότητα
Fire Brick	178	34	34	24.98kHz
Crimson	220	20	60	29.7kHz
Medium Violet Red	199	21	133	30.3kHz
Red	255	0	0	31.5kHz
Indian Red	205	92	92	33.5kHz
Orange Red	255	69	0	34.1kHz

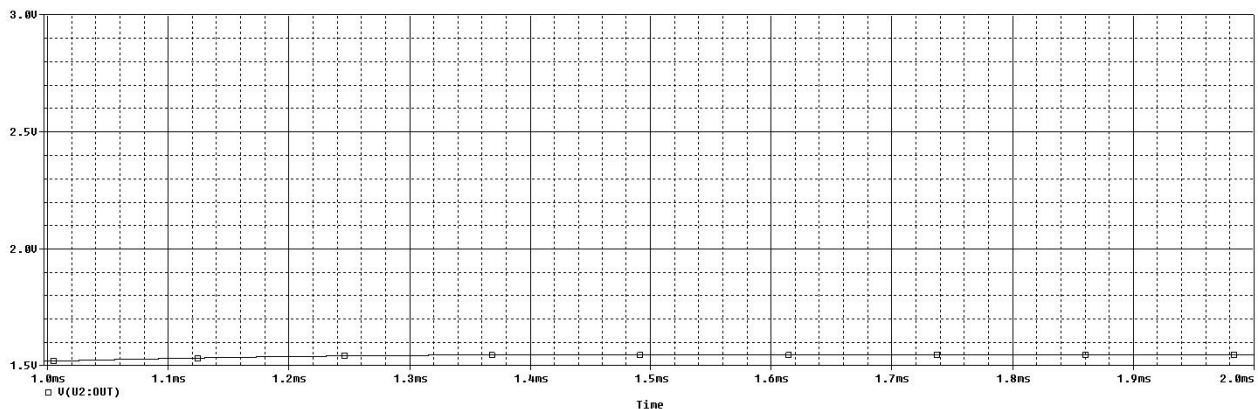
Πίνακας 3.3: Αποχρώσεις Κοκκινού



Εικόνα 3.8: Κύκλωμα PLL για αποχρώσεις κόκκινου

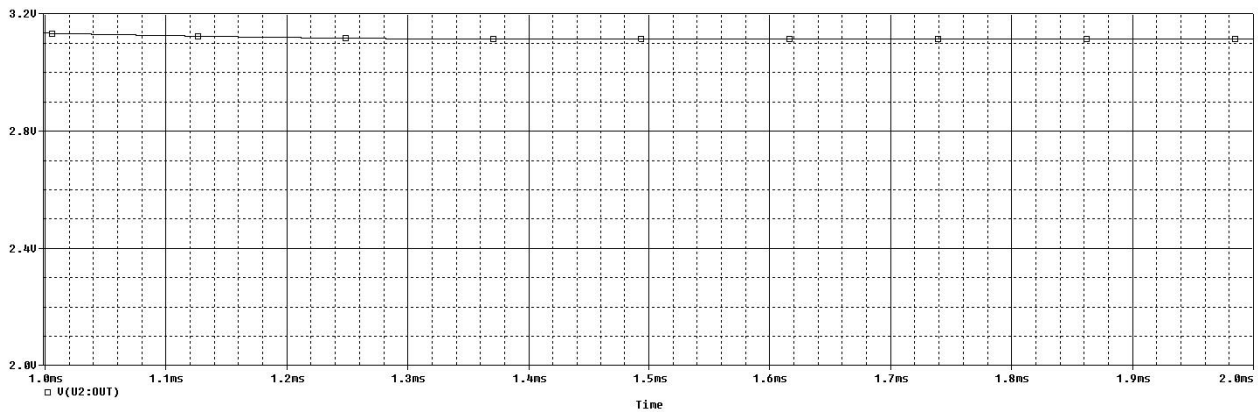
Με βάση τις συχνότητες των κόκκινων χρωμάτων οι οποίες κυμαίνονται από 24kHz – 34kHz ορίζουμε την κεντρική συχνότητα του VCO στα 30kHz. Η τιμή του πυκνωτή  $C_1$  καθορίζεται από το γράφημα του datasheet ως  $C_1=6nF$ .

Κατά την προσομοίωση του κυκλώματος στο μοντέλο του PSPICE παρατηρήθηκε ότι υπάρχει κάποιο σφάλμα στο μοντέλο του PLL. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος αλλάχθηκε η τιμή της χωρητικότητας του πυκνωτή  $C_1$ , δηλαδή  $C_1=13n$



Εικόνα 3.9: Έξοδος φίλτρου για το χρώμα Fire Brick

Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η έξοδος του φίλτρου όταν το χρώμα που θα αναγνωρισθεί είναι το Fire Brick το οποίο είναι το πρώτο χρώμα για τις αποχρώσεις του κόκκινου



Εικόνα 3.10: Έξοδος φίλτρου για το χρώμα Orange Red

Στην συγκεκριμένη εικόνα παρουσιάζεται η τάση εξόδου από το φίλτρο όταν η είσοδος του PLL ανιχνεύσει το χρώμα Orange Red το οποίο είναι το τελευταίο χρώμα στην κατηγορία αυτή.

### 3.4 Μικροελεγκτής PIC18F4550

Ο μετατροπέας σήματος αναλογικού σε ψηφιακό (ADC) χρησιμοποιείται για να μετατρέψει ένα αναλογικό σήμα, όπως η τάση, σε ψηφιακή μορφή έτσι ώστε ένας μικροελεγκτής να μπορεί να το διαβάσει και να το επεξεργαστεί. Μερικοί μικροελεγκτές έχουν ενσωματωμένους 12 μετατροπείς ADC. Οι ADC μετατροπείς είναι συνήθως 8 , 10 , 12 , 16 bit, και έχουν 256 έως 56635 επίπεδα κβαντοποίησης. Οι περισσότεροι μικροελεγκτές PIC που ενσωματώνουν ADC έχουν αποπολυπλεγμένες εισόδους του ADC ,ώστε να παρέχουν περισσότερα από ένα αναλογικά κανάλια εισόδου.

Ο μικροελεγκτής PIC18F4550 έχει έως 10 κανάλια εισόδου των 12- bit. Η διαδικασία μετατροπής ADC πρέπει να αρχίσει από το πρόγραμμα χρήστη και μπορεί να πάρει αρκετά msec για να ολοκληρωθεί. Οι ADC μετατροπείς παράγουν συνήθως μια μικροδιακοπή όταν μια μετατροπή ολοκληρωθεί έτσι ώστε το πρόγραμμα του χρήστη να μπορεί να διαβάσει τα στοιχεία γρήγορα. Οι ADC μετατροπείς είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι στον έλεγχο και στην επίβλεψη εφαρμογών, αφού οι περισσότεροι αισθητήρες ( θερμοκρασίας, πίεσης, υγρασίας κ.τ.λ.) παράγουν αναλογική τάση στην έξοδο.

Ο μικροελεγκτής PIC18F4550 χρησιμοποιείται για να γίνει η μετατροπή του σήματος από αναλόγικό σε ψηφιακό. Με την μετατροπή αυτήν και την παρακάτω διαδικασία που ακολουθεί εμφανίζει τα αντίστοιχα μηνύματα σε οθόνη lcd.

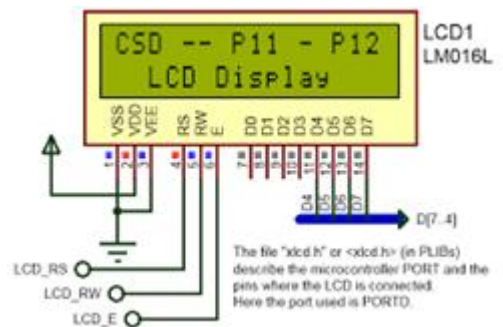
Στο κύκλωμα μας έχουν τοποθετηθεί ένας διακόπτης 3 θέσεων, 3 led και 3 ρέλε όπου σε κάθε ρελέ υπάρχει και ένας πυκνωτής για την λειτουργία της βαθμίδας PLL. Χρησιμοποιήθηκαν 3 πυκνωτές διότι οι συχνότητες των αποχρώσεων ανήκουν σε διαφορετικά εύρη. Ο μικροελεγκτής αντιλαμβάνεται την θέση που έχει ο δικόπτης και ενεργοποιεί το αντίστοιχο ρελέ ώστε να λειτουργεί το κύκλωμα με τον σωστο πυκνωτή για το σωστό χρώμα. Ταυτόχρονα όμως και ανάλογα με την θέση του διακόπτη ο μικροελεγκτής στέλνει σήμα και στο αντίστοιχο led για την ενεργοποίηση του με το οποίο δηλώνεται το χρώμα για το οποίο θα λειτουργεί η βαθμίδα PLL.

### 3.5 Μονάδα Απεικόνισης

Σε κάθε περίπτωση το σήμα θα οδηγείται σε ένα A/D μετατροπέα, οι έξοδοι του οποίου τροφοδοτούν μια σειρά φωτεινών αριθμών ή οθόνη υγρών κρυστάλλων.

Οι πιο διαδεδομένες LCD οθόνες είναι η LM016L και η LM032L οι οποίες έχουν το πλεονέκτημα να έχουν ενσωματωμένο μικροεπεξεργαστή. Πλεονέκτημα των οθονών αυτών είναι ότι συνδέονται απ' ευθείας με τον μικροελεγκτή του κυκλώματος απλοποιώντας κατά πολύ την συνδεσμολογία με το υπόλοιπο κύκλωμα. Στην εικόνα 3.11 φαίνεται μια τέτοια οθόνη (2 γραμμών, 16 χαρακτήρων ανά γραμμή). Η οθόνη αυτή διαθέτει οπίσθιο φωτισμό με αποτέλεσμα να είναι περισσότερο ευανάγνωστη από τις απλές οθόνες LCD.[4]

Στην διάταξη μας έχουμε χρησιμοποιήσει οθόνη lcd η οποία έχει ενσωματωμένη τον μικροελεγκτή της Hitachi (HD44780) και είναι αυτός που χαρακτηρίζει τον τρόπο επικοινωνίας με τον μικροελεγκτή PIC18F4550.



Εικόνα 3.11: Οθόνη LCD

### 3.6 Πρόγραμμα μικροελεγκτή

Στον μικροελεγκτή έχει ενσωματωθεί το πρόγραμμα που ακολουθεί με το οποίο γίνεται η επεξεργασία του σήματος. Γίνεται η μετατροπή του σήματος που προέρχεται από το βαθυπερατό φίλτρο από αναλογικό σε ψηφιακό καθώς και η λειτουργία του διακόπτη με τα ρελέ.

```
#include <main.h>
```

```
#include <lcd.h>
```

```
#include<math.h>
```

```
#use standard_io ( A )
```

```
#use standard_io ( B)
```



```

else if (input(PIN_D1)==1&&input(PIN_D0)==0) //mple
{
    output_high(PIN_D7);
    output_high(PIN_D3);
    mple();
}
else if (input(PIN_D0)==1&&input(PIN_D1)==1) //prasino
{
    output_high(PIN_D6);
    output_high(PIN_D4);
    prasino();
}
}
}
}

```

```

void init (void) {
    set_tris_d(0b11000000);
    set_tris_b(0x00);
    PORTB=0x00;
    set_tris_a(0x01);
    setup_adc_ports( AN0 | VSS_VDD ); //ακροδέκτης εισόδου του μετατροπέα Ao
    setup_adc ( ADC_CLOCK_INTERNAL ); //επιλογή του εσωτερικού ρολογιού για τις μετατροπές
    set_adc_channel ( 0 ); // επιλογή του καναλιού 0, αντιστοιχεί στον ακροδέκτη Ao
}

```

```

void prasino (void){

```

```

v = (float32) ( read_adc() *5)/1023;

```

// η τιμή που διαβάζεται από τον μετατροπέα είναι η read\_adc. Η τιμή αυτή πολλαπλασιάζεται με την τιμή 5/1023, δηλαδή  $\frac{\text{τάση τροφοδοσίας}}{\text{βήμα μετατροπέα}}$  και προκύπτει σαν αποτέλεσμα η τιμή της τάσης στην αναλογική είσοδο.

```

if (v>=4.48&&v<=4.68){

```

```

LCD_PutCmd (CLEAR_DISP);

}

else if (v>=4.15&&v<=4.35){
LCD_PutCmd (CLEAR_DISP);
LCD_SetPosition ( LINE_1 + 1 );
printf ( LCD_PutChar, "SpringGreen");
LCD_SetPosition ( LINE_2 + 0 );
printf ( LCD_PutChar, "R:0 G:255 B:127");
}

else if (v>=3.95&&v<=4.14){
LCD_PutCmd (CLEAR_DISP);
LCD_SetPosition ( LINE_1 + 1 );
printf ( LCD_PutChar, "MediumSeaGreen");
LCD_SetPosition ( LINE_2 + 0 );
printf ( LCD_PutChar, "R:60 G:211 B:113");
}

else if (v>=3.42&&v<=3.62){
LCD_PutCmd (CLEAR_DISP);
LCD_SetPosition ( LINE_1 + 4 );
printf ( LCD_PutChar, "Lime");
LCD_SetPosition ( LINE_2 + 0 );
printf ( LCD_PutChar, "R:0 G:255 B:0");
}

else if (v>=3&&v<=3.2){
LCD_PutCmd (CLEAR_DISP);
LCD_SetPosition ( LINE_1 + 3 );

```

```
printf ( LCD_PutChar, "OliveDrab");
LCD_SetPosition ( LINE_2 + 0 );
printf ( LCD_PutChar, "R:107 G:142 B:35");
}
```

```
else if (v>=2.82&&v<=2.99){
LCD_PutCmd (CLEAR_DISP);
LCD_SetPosition ( LINE_1 + 3 );
printf ( LCD_PutChar, "SeaGreen");
LCD_SetPosition ( LINE_2 + 0 );
printf ( LCD_PutChar, "R:46 G:142 B:87");
}
```

```
else if (v>=2.25&&v<=2.45){
LCD_PutCmd (CLEAR_DISP);
LCD_SetPosition ( LINE_1 + 2 );
printf ( LCD_PutChar, "ForestGreen");
LCD_SetPosition ( LINE_2 + 0 );
printf ( LCD_PutChar, "R:34 G:139 B:34");
}
```

```
else if (v>=2&&v<=2.22){
LCD_PutCmd (CLEAR_DISP);
LCD_SetPosition ( LINE_1 + 4 );
printf ( LCD_PutChar, "Green");
LCD_SetPosition ( LINE_2 + 0 );
printf ( LCD_PutChar, "R:0 G:128 B:0");
}
```

```
else if (v>=1.62&&v<=1.82){
LCD_PutCmd (CLEAR_DISP);
```

```

LCD_SetPosition ( LINE_1 + 3 );
printf ( LCD_PutChar, "DarkGreen");
LCD_SetPosition ( LINE_2 + 0 );
printf ( LCD_PutChar, "R:0 G:100 B:0");
}

else if(v>4.95){
LCD_PutCmd (CLEAR_DISP);
LCD_SetPosition ( LINE_1 + 3 );
printf ( LCD_PutChar, "No Colourgreen");

}

delay_ms(100); }

```

```

void kokkino (void) {

v = (float32) ( read_adc() *5)/1023;
if (v>=1.64&&v<=1.84){
LCD_PutCmd (CLEAR_DISP);
LCD_SetPosition ( LINE_1 + 1 );
printf ( LCD_PutChar, "FireBrick");
LCD_SetPosition ( LINE_2 + 0 );
printf ( LCD_PutChar, "R:0 G:250 B:154");
}

else if (v>=3.1&&v<=3.2){
LCD_PutCmd (CLEAR_DISP);
LCD_SetPosition ( LINE_1 + 1 );
printf ( LCD_PutChar, "OrangeRed");
}
}

```

```

LCD_SetPosition ( LINE_2 + 0 );
printf ( LCD_PutChar, "R:0 G:255 B:127");
}
else if (v>=2.96&&v<=3.09){
LCD_PutCmd (CLEAR_DISP);
LCD_SetPosition ( LINE_1 + 1 );
printf ( LCD_PutChar, "IndianRed");
LCD_SetPosition ( LINE_2 + 0 );
printf ( LCD_PutChar, "R:60 G:211 B:113");
}
else if (v>=2.71&&v<=2.91){
LCD_PutCmd (CLEAR_DISP);
LCD_SetPosition ( LINE_1 + 4 );
printf ( LCD_PutChar, "Red");
LCD_SetPosition ( LINE_2 + 0 );
printf ( LCD_PutChar, "R:0 G:255 B:0");
}

else if (v>=2.53&&v<=2.68){
LCD_PutCmd (CLEAR_DISP);
LCD_SetPosition ( LINE_1 + 1 );
printf ( LCD_PutChar, "MediumVioletRed");
LCD_SetPosition ( LINE_2 + 0 );
printf ( LCD_PutChar, "R:107 G:142 B:35");
}

else if (v>=2.4&&v<=2.52){
LCD_PutCmd (CLEAR_DISP);
LCD_SetPosition ( LINE_1 + 3 );
printf ( LCD_PutChar, "Crimson");
LCD_SetPosition ( LINE_2 + 0 );

```

```
printf ( LCD_PutChar, "R:46 G:142 B:87");  
}
```

```
else if(v>4.95){  
LCD_PutCmd (CLEAR_DISP);  
LCD_SetPosition ( LINE_1 + 3 );  
printf ( LCD_PutChar, "No Coloured");  
  
}  
delay_ms(100); }
```

```
void mple (void){  
  
v = (float32) ( read_adc() *5)/1023;  
if (v>=1.7&&v<=1.9){  
LCD_PutCmd (CLEAR_DISP);  
LCD_SetPosition ( LINE_1 + 1 );  
printf ( LCD_PutChar, "CadetBlue");  
LCD_SetPosition ( LINE_2 + 0 );  
printf ( LCD_PutChar, "R:0 G:250 B:154");  
}  
  
else if (v>=2&&v<=2.22){  
LCD_PutCmd (CLEAR_DISP);  
LCD_SetPosition ( LINE_1 + 1 );  
printf ( LCD_PutChar, "CornFlowerBlue");  
LCD_SetPosition ( LINE_2 + 0 );  
printf ( LCD_PutChar, "R:0 G:255 B:127");  
}  
  
}
```

```
else if (v>=2.5&&v<=2.7){
LCD_PutCmd (CLEAR_DISP);
LCD_SetPosition ( LINE_1 + 1 );
printf ( LCD_PutChar, "DeepSkyBlue");
LCD_SetPosition ( LINE_2 + 0 );
printf ( LCD_PutChar, "R:60 G:211 B:113");
}
```

```
else if (v>=2.9&&v<=3.1){
LCD_PutCmd (CLEAR_DISP);
LCD_SetPosition ( LINE_1 + 4 );
printf ( LCD_PutChar, "Cyan");
LCD_SetPosition ( LINE_2 + 0 );
printf ( LCD_PutChar, "R:0 G:255 B:0");
}
```

```
else if (v>=3.77&&v<=3.97){
LCD_PutCmd (CLEAR_DISP);
LCD_SetPosition ( LINE_1 + 3 );
printf ( LCD_PutChar, "AquaMarine");
LCD_SetPosition ( LINE_2 + 0 );
printf ( LCD_PutChar, "R:107 G:142 B:35");
}
```

```
else if (v>=4.2&&v<=4.4){
LCD_PutCmd (CLEAR_DISP);
LCD_SetPosition ( LINE_1 + 3 );
printf ( LCD_PutChar, "SkyBlue");
LCD_SetPosition ( LINE_2 + 0 );
printf ( LCD_PutChar, "R:46 G:142 B:87");
}
```

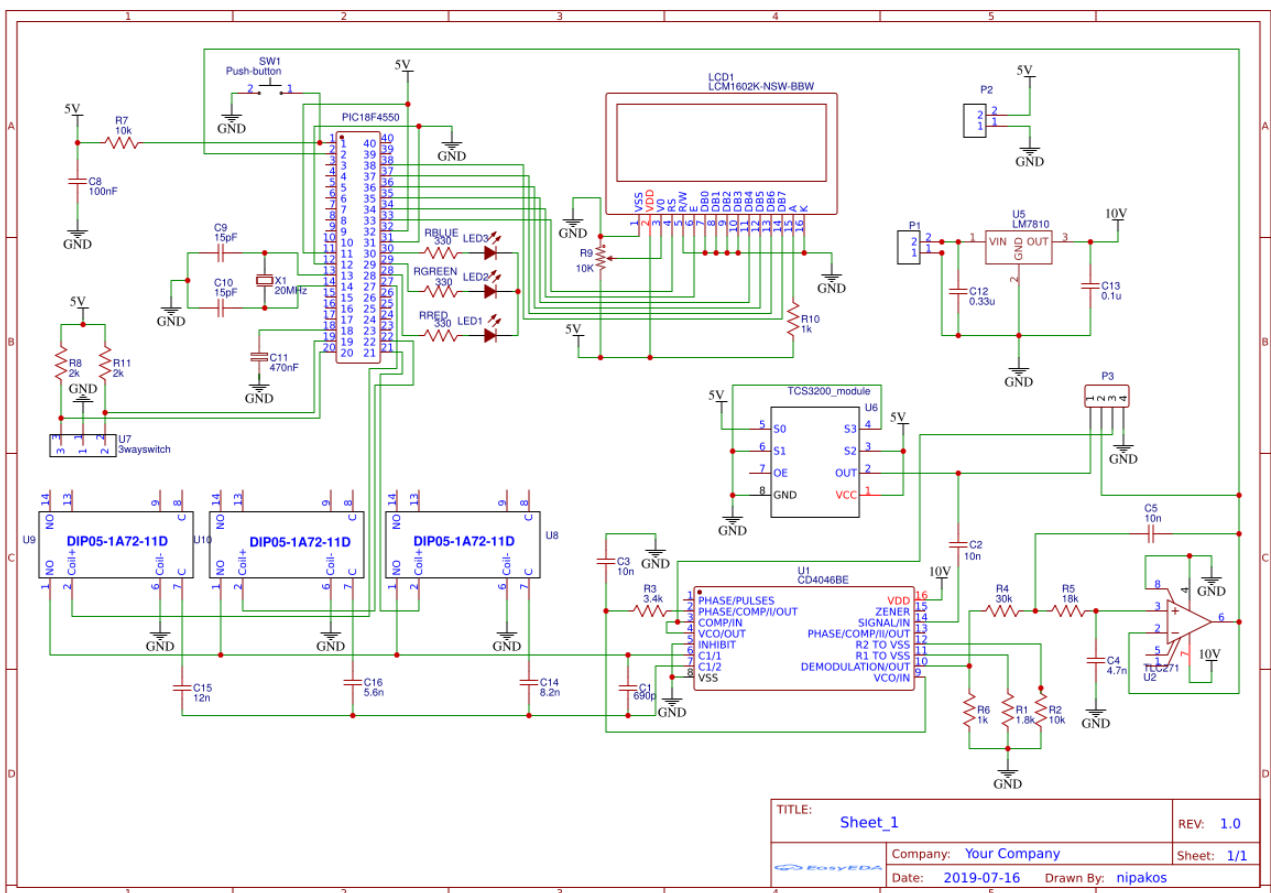
```
}  
  
else if(v>4.95){  
LCD_PutCmd (CLEAR_DISP);  
LCD_SetPosition ( LINE_1 + 3 );  
printf ( LCD_PutChar, "No Colourblue");  
}  
    delay_ms(100); }
```

## 4. Τελικό Κύκλωμα – Αποτελέσματα

Το τελικό κικλωμα αφού δοκιμάστηκε πάνω σε ράστερ σχεδιάστηκε για πλακέτα PCB με την βοήθεια του προγράμματος Easyeda. Η τροφοδοσία όλου του κυκλώματος γίνεται με έναν απλό AC-DC converter με μέγιστο ρεύμα 0.2A. Ο συγκεκριμένος AC-DC converter δίνει τάση εξόδου 12V και 5V. Τα 12V χρησιμοποιούνται ως είσοδος στον σταθεροποιητή τάσης που υπάρχει στο κύκλωμα για να έχουμε από εκεί τα 10V για την λειτουργία του PLL και του βαθυπερατού φίλτρου. Τα 5V χρησιμοποιούνται για την λειτουργία του αισθητήρα, του μικροελεγκτή και της οθόνης LCD.

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται η τελική διάταξη που περιλαμβάνει:

- αισθητήρα χρώματος TCS3200
- κύκλωμα PLL
- 3 ρελέ
- βαθυπερατό φίλτρο
- μικροελεγκτή PIC18F4550
- οθόνη LCD για την απεικόνιση



Εικόνα 4.8: Τελική διάταξη

Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται τα αποτελέσματα από το πρόγραμμα προσομοιώσεις PSPICE και από τις μετρήσεις που έγιναν όταν το κύκλωμα ήταν σε λειτουργία. Συγκεκριμένα στον Πίνακα 4.1 καταγράφονται οι μετρήσεις όταν το κύκλωμα PLL λειτουργούσε για τις αποχρώσεις του πρασίνου, στον Πίνακα 4.2 καταγράφονται τα αποτελέσματα για τις αποχρώσεις του μπλέ και στον Πίνακα 4.3 τα αποτελέσματα για τις αποχρώσεις του κόκκινου.

Χρώμα	Τάση εξόδου PSPICE	Τάση εξόδου
Green	1V	1.9V
Forest Green	1.2V	2.0V
Sea Green	1.85V	2.35V
Olive Drab	2V	2.7V
Lime	2.5V	3.0V
Medium Sea Green	3V	3.4V
Spring Green	3.2V	3.5V
Medium Spring Green	3.4V	3.75V

Πίνακας 4.1

Χρώμα	Τάση εξόδου PSPICE	Τάση εξόδου
Cadet Blue	1.3V	1.64V
Corn Flower Blue	1.9V	1.84V
Dep Sky Blue	2.4V	2.3V
Cyan	2.9V	2.6V
Aqua Marine	3.6V	3.3V
Sky Blue	3.9V	3.5V

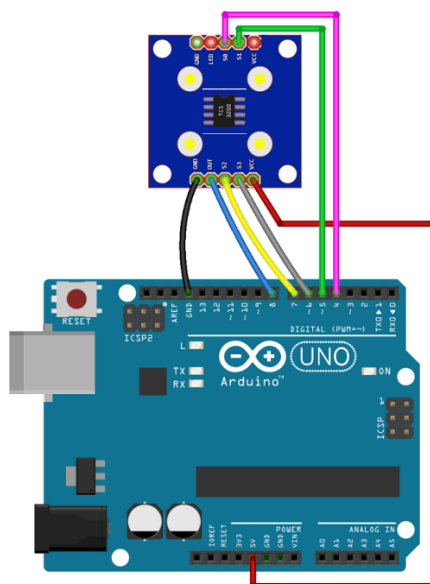
Πίνακας 4.2

Χρώμα	Τάση εξόδου PSPICE	Τάση εξόδου
Fire Brick	1.5V	1.1V
Crimson	2.3V	1.66V
Medium Violet Red	2.5V	1.72V
Red	2.8V	1.93V
Indian Red	2.9V	2.02V
Orange Red	3V	2.18V

Πίνακας 4.3

Κατά την προσομοίωση του κυκλώματος στο μοντέλο του PSPICE παρατηρήθηκε ότι υπάρχει κάποιο σφάλμα στο μοντέλο του PLL, γι αυτό τον λόγο τα αποτελέσματα του PSPICE και του πραγματικού κυκλώματος δεν είναι ακριβώς ίδια.

Μια άλλη διάταξη που δοκιμάστηκε ήταν η απευθείας σύνδεση του αισθητήρα σε ένα μικροελεγκτή Arduino. Στην εικόνα 4.2 φαίνεται η συνδεσμολογία του κυκλώματος. Στους πίνακες 4.4, 4.5 και 4.6 καταγράφονται τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις που έγιναν. Συγκεκριμένα έχουν καταγραφεί οι μετρήσεις των χρωμάτων που έγιναν με τον παλμογράφο και οι μετρήσεις με τη χρήση του Arduino.



Εικόνα 4.2: Κύκλωμα αισθητήρα με Arduino

Χρώμα	Συχνότητα Παλμογράφου	Συχνότητα Arduino
Dark Green	16.4 kHz	14.2-16.2 kHz
Green	19.1 kHz	15.8-16.12 kHz
Sea Green	23.2 kHz	19.2-20.0 kHz
Olive Drab	24.1kHz	20.0-20.8 kHz
Lime	26.5kHz	22.7-23.2 kHz
Spring Green	29.5 kHz	25.0-27.7 kHz
Medium Spring Green	30.8 kHz	26.3-31.0 kHz

Πίνακας 4.4: Συχνότητες Πρασίνου

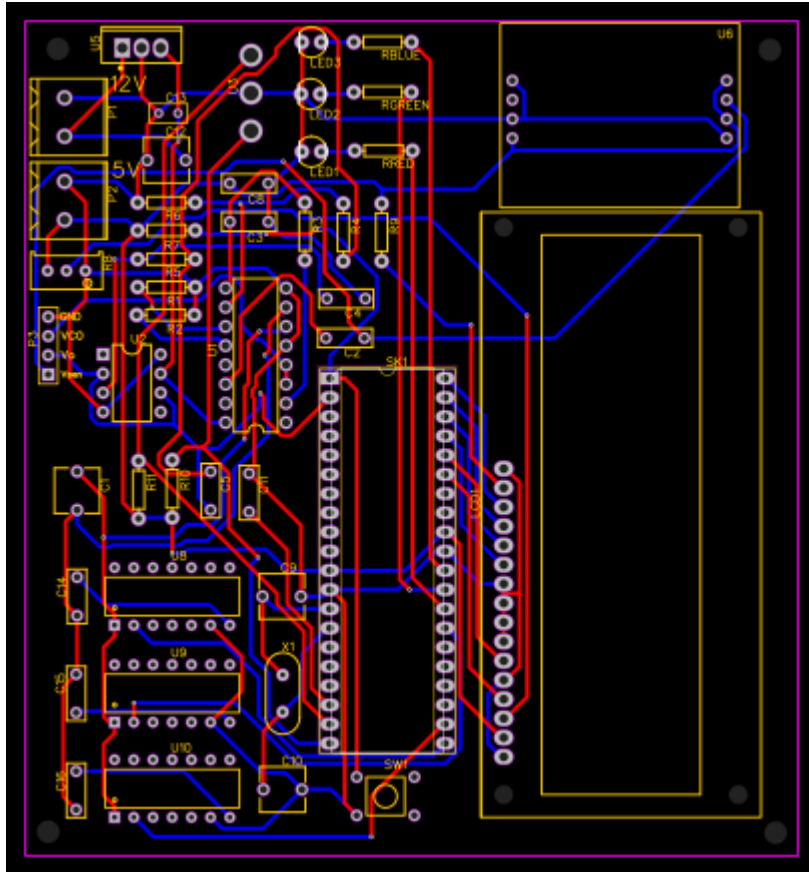
Χρώμα	Συχνότητα Παλμογράφου	Συχνότητα Arduino
Cadet Blue	36.0 kHz	31.2-32.2 kHz
Corn Flower Blue	40.0 kHz	33.3-34.2 kHz
Dep Sky Blue	44.25 kHz	38.4-39.0 kHz
Cyan	47.85 kHz	40.0-41.6 kHz
Aqua Marine	55.25 kHz	45.4-47.6 kHz
Sky Blue	58.48 kHz	50.0-52.6 kHz

Πίνακας 4.5: Συχνότητες Μπλε

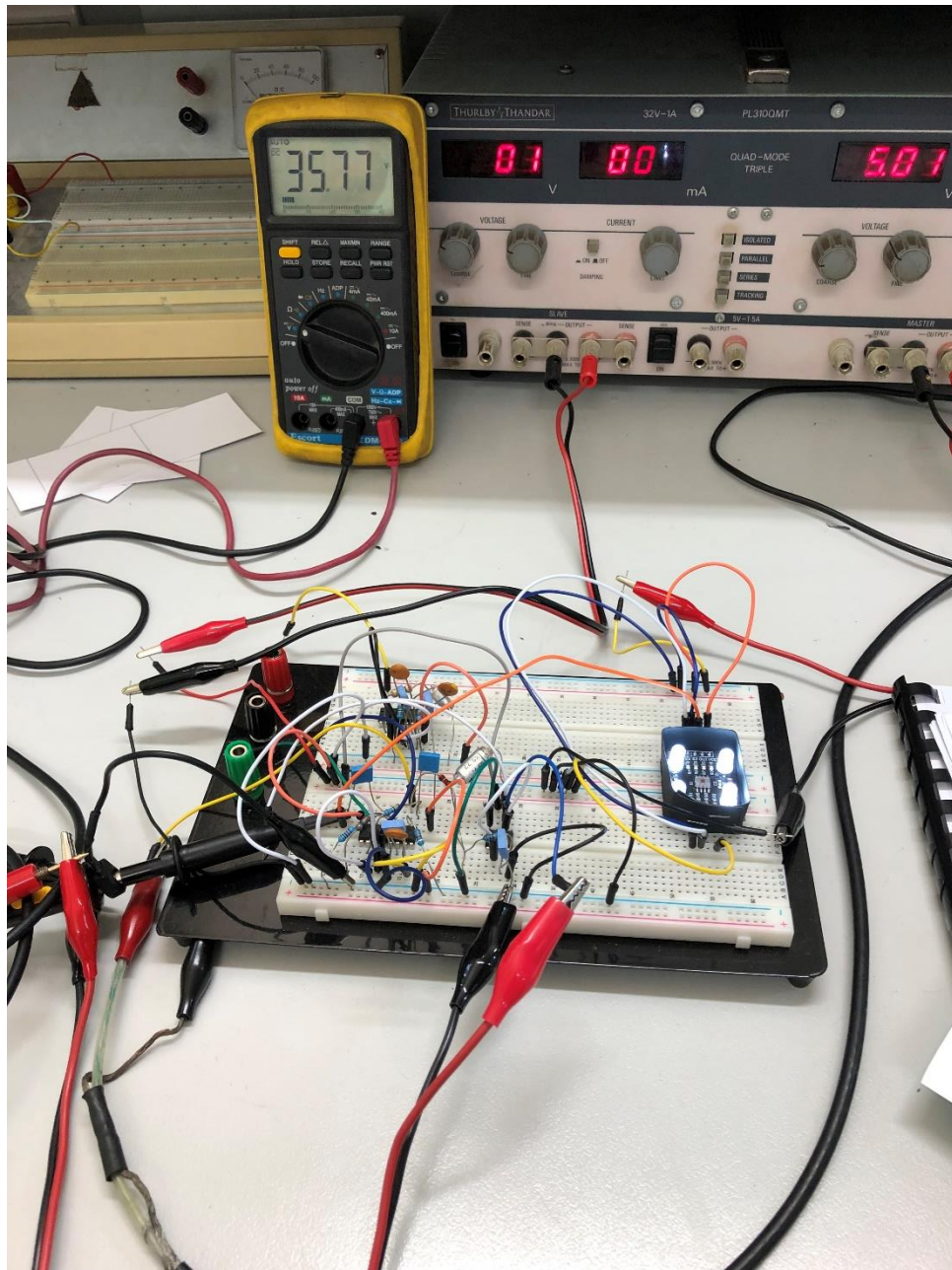
Χρώμα	Συχνότητα Παλμογράφου	Συχνότητα Arduino
Fire Brick	24.98 kHz	20.0-20.4 kHz
Crimson	29.7 kHz	25.0-25.6 kHz
Medium Violet Red	30.3 kHz	25.6-26.3 kHz
Red	31.5 kHz	26.3-27.7 kHz
Indian Red	33.5 kHz	28.6-29.4 kHz
Orange Red	34.1 kHz	29.4 kHz

Πίνακας 4.6: Συχνότητες Κόκκινου

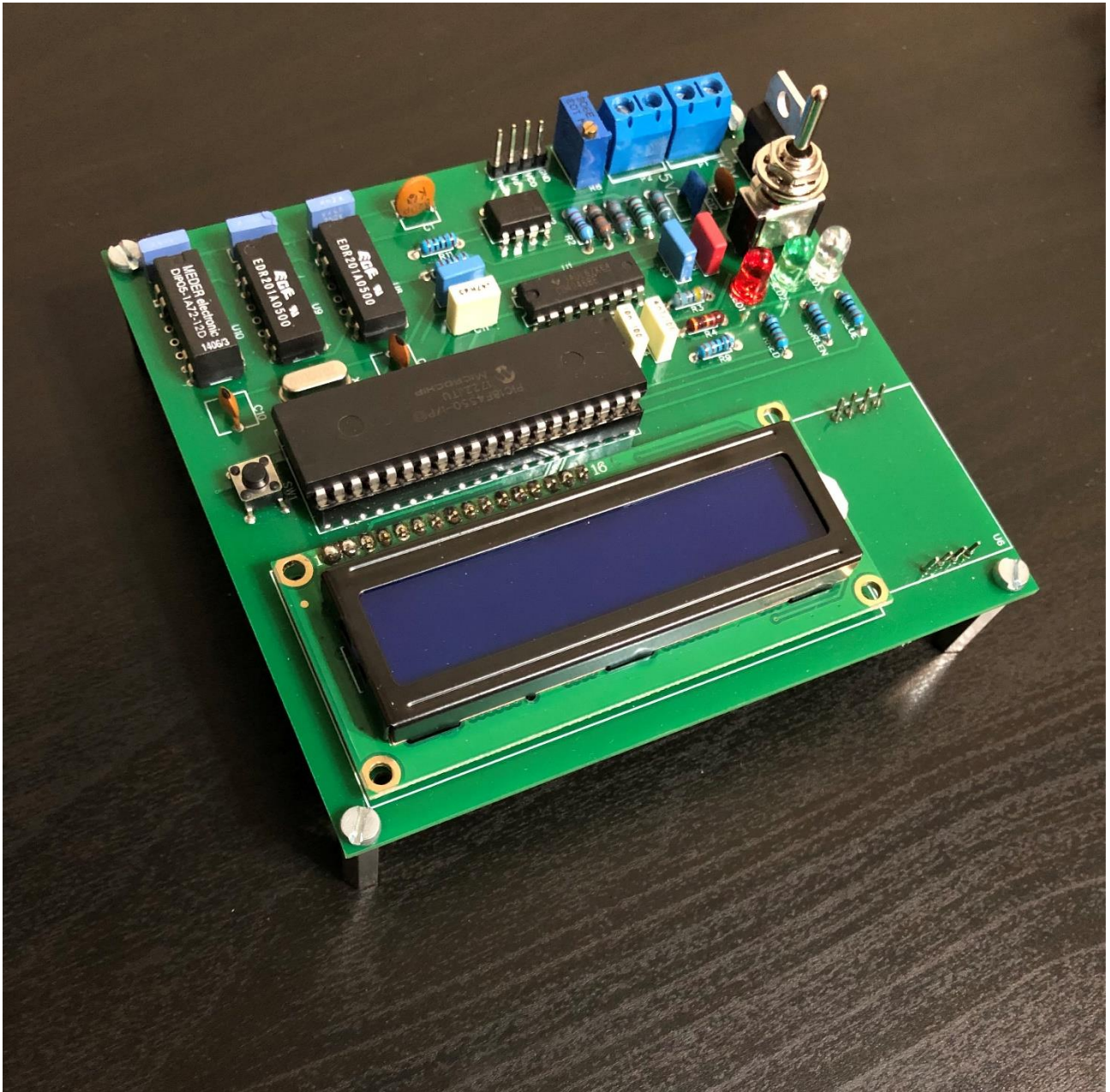
Στην εικόνα 4.3 φαίνεται το αποτόπωμα της πλακέτας με την βοήθεια του προγράμματος Easyeda



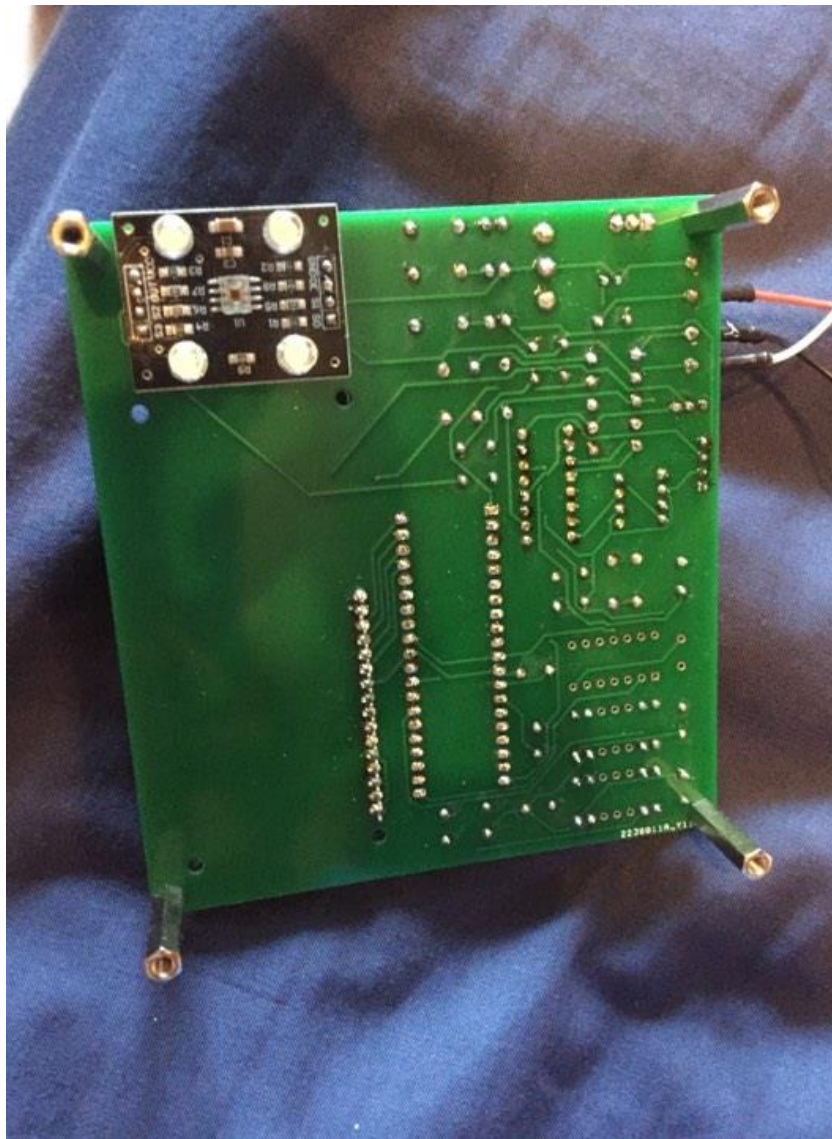
Εικόνα 4.3: Σχέδιο πλακέτας



Εικόνα 4.4: Υλοποίηση κυκλώματος στο ράστερ



Εικόνα 4.5: Πλακέτα με τα υλικά

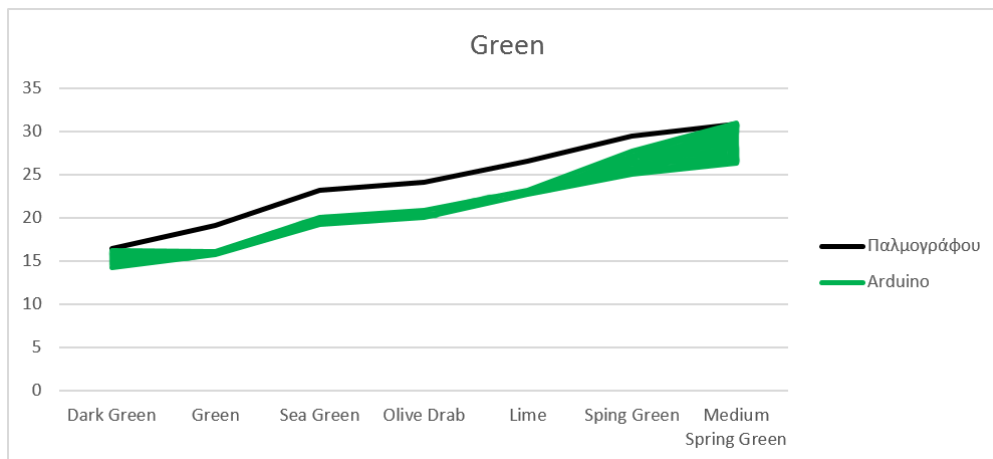


*Εικόνα 4.6: Πίσω όψη πλακέτας*

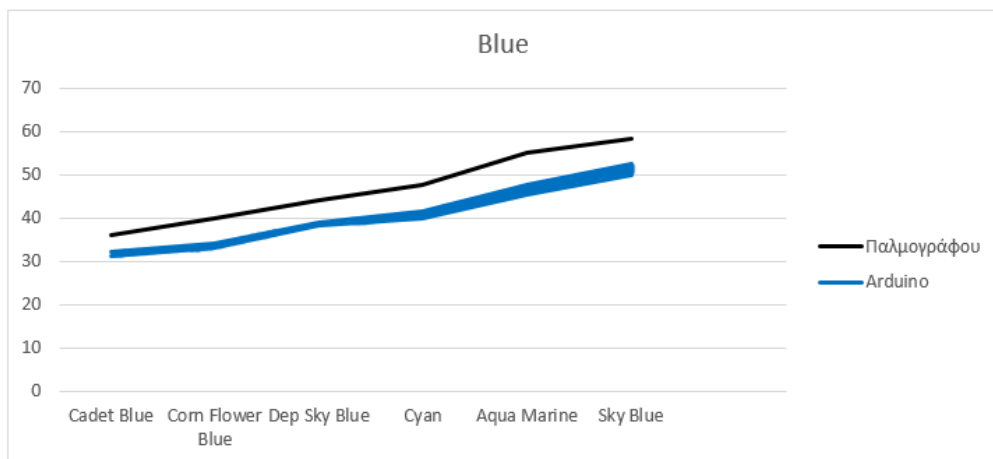
## 5. Συμπεράσματα

Με βάση την παραπάνω εργασία καταλήξαμε στα παρακάτω συμπεράσματα για την κάθε επιμέρους βαθμίδα του κυκλώματος.

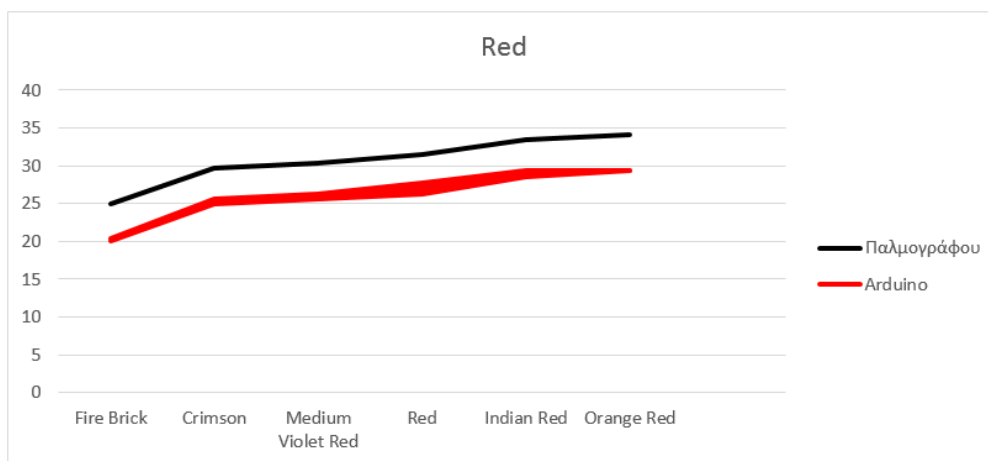
- Στην εναλλακτική διάταξη που δοκιμάστηκε που ήταν με την απευθείας σύνδεση του αισθητήρα πάνω σε ένα arduino, η συχνότητα που έπαιρνε για κάθε χρώμα δεν ήταν σταθερή οπότε ήταν αδύνατο να αναγνωρίσει την κάθε απόχρωση. Στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις παρατηρούμε ότι με τη χρήση της βαθμίδας PLL (μαύρη γραμμή) τα αποτελέσματα είναι πιο σταθερά σε σχέση με την μέτρηση του Arduino (σκιασμένη περιοχή). Αυτό ισχύει και για τις 3 αποχρώσεις για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε η διάταξη PLL.



Εικόνα 5.1: Γραφική παράσταση σύγκριση πράσινου χρώματος



Εικόνα 5.2: Γραφική παράσταση σύγκριση μπλέ χρώματος



Εικόνα 5.3: Γραφική παράσταση κόκκινου χρώματος

- Ο συγκεκριμένος αισθητήρας (TCS3200) που χρησιμοποιήθηκε διαθέτει μια σειρά φωτοδιόδων με 4 διαφορετικά φίλτρα (κόκκινο, πράσινο, μπλε και χωρίς φίλτρο). Παρατηρήθηκε ότι όταν ο αισθητήρας δοκιμάστηκε με την χρήση φίλτρου κάποιου χρώματος και μετρήθηκε χρώμα της αντίστοιχης απόχρωσης, η συχνότητα που παίρναμε στην έξοδο δεν είχε μεγάλη μεταβολή για κάθε απόχρωση. Για αυτό το λόγο και μετά από δοκιμές καταλήξαμε να χρησιμοποιήσουμε τον αισθητήρα χωρίς φίλτρο.
- Η διάταξη PLL είχε απόκλιση ανάμεσα στις θεωρητικές τιμές και στις πειραματικές. Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς ο κατασκευαστής δίνει απόκλιση 30% ανάμεσα στα θεωρητικά και στα πρακτικά.
- Η χρήση μικροελεγκτή ήταν απαραίτητη καθώς θέλαμε να μετατρέψουμε το αναλογικό σήμα σε ψηφιακό έτσι ώστε το όνομα κάθε απόχρωσης να εμφανίζεται σε μια LCD οθόνη. Ακόμη η θέση του διακόπτη καθορίζει ποιο ρελέ θα ενεργοποιήσει ο μικροελεγκτής.

## 6. Μελλοντικές αναβαθμίσεις

Η συγκεκριμένη διάταξη θα μπορούσε να εξελιχθεί και να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές. Οι αλλαγές που θα ήταν απαραίτητες είναι οι εξής, υπολογισμός του PLL για την συγκεκριμένη απόχρωση του χρώματος από κάθε είδος που χρησιμοποιείται σε κάθε εφαρμογή, αλλαγή προγράμματος μικροελεγκτή καθώς και προσθήκη διάφορων περιφερειακών εξαρτημάτων.

Μερικές εφαρμογές που θα μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν την συγκεκριμένη διάταξη είναι οι εξής:

### ➤ **Διαλογέας Χρωμάτων**

Οι ταξινομητές χρώματος ή οι διαχωριστές χρωμάτων (μερικές φορές αποκαλούνται οπτικοί ταξινομητές , ψηφιακοί διαλογείς ή ηλεκτρονικοί διαλογείς χρώματος ) είναι μηχανές που χρησιμοποιούνται στις γραμμές παραγωγής στην επεξεργασία τροφίμων και σε άλλες βιομηχανίες. Διαχωρίζουν τα αντικείμενα ανάλογα με τα χρώματα τους, ανιχνεύοντας τα χρώματα των πραγμάτων που περνούν μπροστά τους χρησιμοποιώντας μηχανικές ή πνευματικές συσκευές εκτόξευσης για την εκτροπή αντικειμένων των οποίων τα χρώματα δεν εμπίπτουν στην αποδεκτή περιοχή ή τα οποία επιθυμούν να σχηματίσουν ξεχωριστή ομάδα από τα υπόλοιπα.

### ➤ **Βιομηχανία Σιτηρών (γεωργικών προϊόντων)**

Οι διαλογείς χρώματος χρησιμοποιούνται κυρίως για τη διαλογή σιτηρών (γεωργικά προϊόντα). Η βιομηχανία διαλογής ρυζιού είναι η πρώτη μεγάλη αγορά. Η τεχνολογία ταξινόμησης του ρυζιού είναι σύμφωνη με τις διαφορές χρώματος των υλικών ρυζιού (αποφλοιωμένου ορυζώνα), χρησιμοποιώντας έναν οπτικό αισθητήρα CCD υψηλής ανάλυσης για να διαχωρίσει τις πέτρες, το μαύρο ρύζι κλπ. Είναι το τελικό βήμα μετά το γυάλισμα του ρυζιού με έναν ρυμουλκούμενο ρύζι . Η δεύτερη αγορά διαλογής χρησιμοποιείται σε χοντρά σιτηρά, όπως σιτάρι, καλαμπόκι, φιστίκια, διάφορα είδη φασολιών, σουσάμι κλπ. Οι μηχανές ταξινόμησης βελτιώνουν την ποιότητα του προϊόντος και προσθέτουν κοινωνικά οφέλη.

### ➤ **Βιομηχανία Τροφίμων**

Οι διαλογείς χρώματος χρησιμοποιούνται για τη βιομηχανία επεξεργασίας τροφίμων, όπως ο καφές, τα καρύδια και οι ελαιούχες καλλιέργειες. Ο στόχος είναι ο διαχωρισμός των αντικειμένων που έχουν αποχρωματιστεί, τοξικά (όπως η ερυσιγγέρα ), όχι τόσο ώριμα όσο απαιτείται, ή ακόμη με το κύτος μετά από αποξείδωση όπως οι ηλιόσποροι. Σε σύγκριση με τη χειρωνακτική διαλογή, τα μηχανήματα εξοικονομούν εργασία και χρόνο, έχουν μεγαλύτερη απόδοση και έχουν χαμηλότερο κόστος επεξεργασίας.

### ➤ **Ανακύκλωση**

Στη βιομηχανία ανακύκλωσης, οι διαχωριστές χρωμάτων μπορούν να διακρίνουν μεταξύ του έγχρωμου και του άχρωμου PET και των χρωματιστών και άχρωμων φυλλιδίων HDPE , καθώς και να είναι σε θέση να διαχωρίσουν τις νιφάδες με το χρώμα πριν από την επανασυσσωμάτωση. Οι διαχωριστές πλαστικού χρώματος χρησιμοποιούνται για τον διαχωρισμό πλαστικών νιφάδων ή κόκκων μικτού χρώματος. Οι διαχωριστές πλαστικού τύπου (Τεχνολογία διαλογής με αισθητήρα ) χρησιμοποιούνται για το διαχωρισμό πλαστικών με τα ίδια χρώματα αλλά με διαφορετικά υλικά. Η τεχνολογία που αναγνωρίζεται από τη βιομηχανία είναι η χρήση διαλογής χρωμάτων για τη διαλογή πλαστικών σφαιριδίων και ενός διαλογέα χρωμάτων τύπου ζώνης για την ταξινόμηση προϊόντων πλαστικών νιφάδων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Σύγχρονες εφαρμογές αναλογικών ηλεκτρονικών, Μιχαήλ Ν. Σπάσος – Κώστας Θ. Αμμοιρίδης, εκδ. Αίβαζή
2. Ηλεκτρικές μετρήσεις και αισθητήρες , Κ.Καλαϊτζάκης , εκδ. Κλειδάριθμος , 2010
3. Microchip, Data Sheets , PIC18F4550
4. Hitachi, LM032L DataSheets
5. Texas Advanced Optoelectronic Solutions, Data Sheets, TCS3200
6. C.I.E. Publication No 15.2 Colorimetry. Vienna: Central Bureau of the C.I.E; 1986: 74.
7. Goodkind R, Schwabacher WB. Use of a fiber-optic colorimeter for in vivo color measurements of 2830 anterior teeth. J Prosthet Dent 1987; 58:535-542
8. Brewer JD, Wee Alvin, Seghi R. Advances in color matching. Dent Clin North Am 2004; 48:341-358
9. Χρωματομετρία - Βασικές Αρχές, Ορφανάκος Κ. Βασίλειος, εκδ. Σταμούλη, Αθήνα 2004
10. Ηλεκτρονική 7η έκδοση, Malvino Albert – Bates David, 2011, Εκδόσεις Τζιόλα, Αθήνα
11. Η Τέχνη του Χρώματος, Γιοχάνες Ίπτεν, Εκδόσεις Ένωση Καθηγητών Καλλιτεχνικών Μαθημάτων, Αθήνα 1998
12. <https://en.wikipedia.org/wiki/Spectrophotometry>
13. [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%92%CE%B1%CF%83%CE%B9%CE%BA%CE%AC\\_%CF%87%CF%81%CF%8E%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B1](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%92%CE%B1%CF%83%CE%B9%CE%BA%CE%AC_%CF%87%CF%81%CF%8E%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B1)
14. <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A7%CF%81%CF%8E%CE%BC%CE%B1>