

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΟ ΤΡΙΩΝ ΑΞΟΝΩΝ ΜΕ ΤΗΝ
ΧΡΗΣΗ PIC18F455»



Της φοιτήτριας
Μαντιού Βασιλικής
Αρ. Μητρώου: 511058

Επιβλέπων
Όνοματεπώνυμο: Αριστοτέλης
Καζακόπουλος
Βαθμίδα: Καθηγητής

Ημερομηνία: Σεπτέμβριος 2021

Τίτλος Δ.Ε.: Επιταχυνσιόμετρο τριών αξόνων με την χρήση μικροελεγκτή PIC18F4550.

Κωδικός Δ.Ε. 17182

Ονοματεπώνυμο φοιτητή: Βασιλική Μαντιού

Ονοματεπώνυμο εισηγητή: Αριστοτέλης Καζακόπουλος

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε.: Απρίλιος 2019

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε.: Σεπτέμβριος 2021

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

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

«Στην μνήμη της μητέρας μου»

Πρόλογος

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΠΙΑΕ και πραγματεύεται την υλοποίηση μίας κατασκευής ενός επιταχυνσιομέτρου 3 αξόνων. Στόχος της είναι η μέτρηση της επιτάχυνσης στους άξονες X, Y, Z με την χρήση του PIC18F4550 και η απεικόνιση τους σε μία οθόνη LCD.

Για την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής απαιτήθηκε η γνώση των μικροελεγκτών PIC καθώς και η γνώση επάνω στην σχεδίαση και κατασκευή ηλεκτρονικής πλακέτας PCB.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η κατασκευή επιταχυνσιόμετρου τριών αξόνων. Η ανάπτυξη της κατασκευής γίνεται με την βοήθεια του αισθητηρίου ADXL335 και του μικροελεγκτή PIC18F4550. Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται ο σκοπός της πτυχιακής εργασίας και γίνεται αναφορά στον ορισμό ορισμένων βασικών εννοιών όπως είναι η επιτάχυνση η μονάδα μέτρησης G και οι γωνίες Euler. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η λειτουργία των κυριών μερών που απαρτίζουν την κατασκευή που είναι το επιταχυνσιόμετρο και ο μικροελεγκτής. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων που απαρτίζουν την κατασκευή και παρουσιάζεται το ηλεκτρονικό κύκλωμα της συσκευής. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής και περιγράφεται ο τρόπος κατασκευής προγραμματισμού και λειτουργίας του . Στο τελευταίο κεφάλαιο αναφέρονται διάφορες βελτιώσεις που μπορούν να γίνουν και το πεδίο εφαρμογής της κατασκευής.

Abstract

The subject of the present thesis is the construction of a three-axis accelerometer. The development of the construction is done with the help of the ADXL335 sensor and the PIC18F4550 microcontroller. The first chapter mentions the purpose of the thesis and refers to the definition of some basic concepts such as acceleration, unit G and Euler angles. The second chapter presents the operation of the main parts that form the construction which is the accelerometer and the microcontroller. The third chapter describes the electronic components that the construction consists of as well as the electronic circuit of the device. The fourth chapter presents the flow diagram of the construction and describes how it was made, programmed and works. The last chapter mentions various improvements that can be made and the scope of the construction.

Ευχαριστίες

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Αριστοτέλη Καζακόπουλο για την καθοδήγηση του κατά την υλοποίηση της εργασίας, καθώς και τον καθηγητή μου κ. Άγγελο Γιακουμή για την βοήθειά του. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την στήριξη που μου παρείχε όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	vi
Περίληψη.....	vii
Abstract	viii
Ευχαριστίες	ix
Περιεχόμενα	x
Κατάλογος Εικόνων	xii
Κατάλογος Πινάκων.....	xiii
Συνομογραφίες.....	xiv
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή.....	1
1.1 Θέμα και σκοπός εργασίας.....	1
1.2 Επιτάχυνση.....	2
1.3 Ορισμός μεγέθους “G”	2
1.4 Γωνίες Euler	2
Κεφάλαιο 2ο: Επιταχυνσιόμετρα και μικροελεγκτές	4
2.1 Ορισμός επιταχυνσιόμετρου.....	4
2.2 Χρήση επιταχυνσιόμετρου	4
2.3 Τρόπος λειτουργίας επιταχυνσιόμετρου.....	6
2.4 Τα χαρακτηριστικά ενός επιταχυνσιόμετρου	7
2.5 Είδη επιταχυνσιόμετρου.....	9
2.5.1 Χωρητικό επιταχυνσιόμετρο	10
2.5.2 Πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο.....	10
2.5.3 Επιταχυνσιόμετρο πιεζοαντίστασης.....	11
2.6 Κριτήρια επιλογής επιταχυνσιόμετρου.	12
2.7 Μικροελεγκτές	14
2.7.1 Διαφορές μικροελεγκτή – μικροεπεξεργαστή	14
2.7.2 Αρχιτεκτονική δομή των μικροελεγκτών	15
2.7.3 Αρχιτεκτονική Von Neumann και Αρχιτεκτονική Harvard	20
2.7.4 Προγραμματισμός μικροελεγκτή	21
2.7.5 Πλεονεκτήματα –Μειονεκτήματα Μικροελεγκτών	21
2.7.6 Κατασκευαστές μικροελεγκτών	22
2.8 ADC	23
2.8.1 Τρόπος μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό	23
2.8.2 Κύρια χαρακτηριστικά ADC.....	24

2.8.3	Τύποι ADC	25
Κεφάλαιο 3ο:	Εξαρτήματα κατασκευής.....	31
3.1	Αισθητήρας ADXL335	31
3.1.1	Τρόπος λειτουργίας.....	32
3.1.2	Σύνδεση με τον μικροελεγκτή PIC18F4550.....	33
3.2	PIC18F4550	34
3.2.1	Διάγραμμα ακίδων PIC18F4550	34
3.2.2	Ταλαντωτής και ρολόι.....	35
3.2.3	Οργάνωση μνήμης.....	36
3.2.4	Δομή Interrupts.....	37
3.2.5	Θύρες εισόδου/εξόδου (I/O) γενικού σκοπού	37
3.2.6	Timers.....	38
3.2.7	Analog to digital converter	39
3.2.8	Universal Serial Bus-USB.....	40
3.2.9	Master Synchronous Serial Port (MSSP)	40
3.2.10	Σύνδεση PIC18F4550 με το κύκλωμα	41
3.3	LCD 16X2	42
3.4	Τροφοδοσία κατασκευής.....	43
3.5	Λίστα ηλεκτρονικών εξαρτημάτων	44
3.6	Σχηματικό κύκλωμα κατασκευής.....	45
Κεφάλαιο 4ο:	Υλοποίηση και λειτουργία κατασκευής	46
4.1	Σχεδίαση κυκλώματος.....	46
4.2	Δημιουργία πλακέτας PCB.....	48
4.3	Προγραμματισμός μικροελεγκτή	50
4.4	Διάγραμμα ροής	51
4.5	Προσομοίωση λειτουργίας κατασκευής.....	51
4.6	Λειτουργία κατασκευής.....	55
Κεφάλαιο 5ο:	Συμπεράσματα.....	60
5.1	Πεδίο εφαρμογής.....	60
5.2	Βελτιώσεις κατασκευής.....	60
5.3	Επίλογος.....	60
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		61
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ - Κώδικας στον CCS C Compiler.....		64

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1 Μπλοκ διάγραμμα λειτουργίας της κατασκευής 'επιταχυνσιόμετρο τριών αξόνων με χρήση PIC 18F4550'.....	1
Εικόνα 1.2 Pitch, Yaw, Roll οι γωνίες περιστροφής. [15]	3
Εικόνα 2.1 Σχέδιο τυπικού επιταχυνσιόμετρου [16].....	4
Εικόνα 2.2 Αναπαράσταση επιταχυνσιόμετρου χωρίς την άσκηση δυνάμεων.....	6
Εικόνα 2.3 Αναπαράσταση επιταχυνσιόμετρου όταν μετακινείται προς τα δεξιά.....	7
Εικόνα 2.4 Αναπαράσταση επιταχυνσιόμετρου που ασκείται επάνω του μόνο η δύναμη της βαρύτητας.....	7
Εικόνα 2.5 Τρόπος λειτουργίας χωρητικού επιταχυνσιόμετρου. [17]	10
Εικόνα 2.6 Εσωτερικό πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο. [18].....	11
Εικόνα 2.7 Εσωτερικό επιταχυνσιόμετρο πιεζοαντίστασης [19]	12
Εικόνα 2.8 Διάφοροι τύποι επιταχυνσιόμετρων και που χρησιμοποιούνται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους όπως θόρυβος, κατανάλωση ενέργειας, εύρος κλίμακας g, εύρος ζώνης συχνοτήτων. [20].....	13
Εικόνα 2.9 Block διάγραμμα μικροεπεξεργαστή (επάνω). Block διάγραμμα μικροελεγκτή (κάτω) [21]	14
Εικόνα 2.10 Τι υπάρχει στο εσωτερικό ενός μικροελεγκτή. [22]	15
Εικόνα 2.11 Block διάγραμμα μικροελεγκτή [11]	16
Εικόνα 2.12 Block διάγραμμα της MCU [11].....	17
Εικόνα 2.13 Σύνδεση μικροελεγκτή με εξωτερική μνήμη. [11]	19
Εικόνα 2.14 Παρουσίαση των δυο τύπων αρχιτεκτονικής a) Ενιαία μνήμη προγράμματος και δεδομένων (αρχιτεκτονική Von-Neumann) b) Ξεχωριστή μνήμη προγράμματος και δεδομένων (αρχιτεκτονική Harvard). [21].....	21
Εικόνα 2.15 Διάφοροι τύποι μικροελεγκτών από διαφορετικούς κατασκευαστές. [23].....	22
Εικόνα 2.16 Σύμβολο ADC.....	23
Εικόνα 2.17 Ανάλυση σήματος 24 bit (πορτοκαλί), ανάλυση σήματος 16 bit (γκρι).	24
Εικόνα 2.18 Κύκλωμα Successful Approximation Concept ADC.....	26
Εικόνα 2.19 Κύκλωμα Δέλτα-σίγμα ADC.....	27
Εικόνα 2.20 Κύκλωμα Dual Slope ADC.....	28
Εικόνα 2.21 Κύκλωμα Flash ADC.....	29
Εικόνα 2.22 Κύκλωμα Flash ADC.....	29
Εικόνα 3.1 Εικόνα 13 Επιταχυνσιόμετρο ADXL335.....	31
Εικόνα 3.2 Εσωτερικό επιταχυνσιόμετρο ADXL335 [24].....	31
Εικόνα 3.3 Επιταχυνσιόμετρο με πυκνωτή [25].....	33
Εικόνα 3.4 Σύνδεση αισθητηρίου με τον μικροελεγκτή.	34
Εικόνα 3.5 Διάγραμμα ακίδων μικροελεγκτή. [26]	35
Εικόνα 3.6 Οργάνωση μνήμης προγράμματος του PIC18F4550.....	36
Εικόνα 3.7 Λογικές πύλες I/O PIC 18F4550.....	38
Εικόνα 3.8 A/D Converter του PIC18F4550.....	40
Εικόνα 3.9 LCD 16x2.....	42
Εικόνα 3.10 Κύκλωμα τροφοδοσίας κατασκευής.....	44
Εικόνα 3.11 Κύκλωμα κατασκευής.....	45
Εικόνα 4.1 Top overlay στο Altium.....	46

Εικόνα 4.2 Η τελική μορφή της PCB στο Altium μαζί με όλα τα layers	46
Εικόνα 4.3 Το top overlay για εκτύπωση	47
Εικόνα 4.4 Το bottom της PCB για την εκτύπωση	47
Εικόνα 4.5 Φωτογραφία PCB πριν τις κολλήσεις	48
Εικόνα 4.6 Φωτογραφία PCB μετά την κόλληση του μικροελεγκτή	48
Εικόνα 4.7 Φωτογραφία κάτω όψης PCB μετά τις κολλήσεις	49
Εικόνα 4.8 Φωτογραφία της κατασκευής μετά την ολοκλήρωση όλων των κολλήσεων	49
Εικόνα 4.9 PICKIT 3 [28]	50
Εικόνα 4.10 Το περιβάλλον το MPLAB x IPE	50
Εικόνα 4.11 Διάγραμμα ροής επιταχυνσιόμετρου τριών αξόνων	51
Εικόνα 4.12 Έναρξη εφαρμογής	52
Εικόνα 4.13 Πάτημα 1ου κουμπιού. Εμφάνιση των συντεταγμένων x, y, z από τους ADCs	52
Εικόνα 4.14 Πάτημα 2ου κουμπιού. Εμφάνιση αναλογικών τάσεων του αισθητηρίου στους 3 άξονες.	53
Εικόνα 4.15 Πάτημα 3ου κουμπιού. Εμφάνιση γωνιών Θ , Ψ , Φ	53
Εικόνα 4.16 Εμφάνιση γωνιών Roll, Pitch, Yaw	54
Εικόνα 4.17 Πλαγιάζοντας τον αισθητήρα στον άξονα x.	54
Εικόνα 4.18 Πλαγιάζοντας τον αισθητήρα στον άξονα y.	55
Εικόνα 4.19 Πλαγιάζοντας τον αισθητήρα στον άξονα z.	55
Εικόνα 4.20 Έναρξη λειτουργίας κατασκευής	56
Εικόνα 4.21 Εμφάνιση γωνιών Euler	56
Εικόνα 4.22 Εμφάνιση γωνιών Φ , Θ , Ψ	57
Εικόνα 4.23 Εμφάνιση συντεταγμένων x, y, z	57
Εικόνα 4.24 Εμφάνιση raw data	58
Εικόνα 4.25 Πλαγιάζοντας τον αισθητήρα στον άξονα x.	58
Εικόνα 4.26 Πλαγιάζοντας τον αισθητήρα στον άξονα y.	59
Εικόνα 4.27 Πλαγιάζοντας τον αισθητήρα στον άξονα z.	59

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Τύποι ADC και τα χαρακτηριστικά τους	25
Πίνακας 2 Χαρακτηριστικά του επιταχυνσιόμετρου ADXL335	32
Πίνακας 3 Σύνδεση αισθητηρίου με μικροελεγκτή	33
Πίνακας 4 Σύνδεση ακίδων μικροελεγκτή	41
Πίνακας 5 Σύνδεση ακίδων LCD	43
Πίνακας 6 Πίνακας ηλεκτρονικών εξαρτημάτων	44

Συντομογραφίες

Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΙΠΙΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
Π.Ε.	Πτυχιακή Εργασία
LCD	Liquid Crystal Display (Οθόνη υγρού κρυστάλλου)
S.I.	Le Système International
INS	Inertial navigation system
MEMS	Microelectromechanical systems
ACN	Automated Collision Notification
AC	Alternating current
DC	Direct current
PZT	Lead zirconate titanate
SMD	Surface Mount Devices
RADAR	RAdio Detection And Ranging
IC	Integrated Circuit
MPU	Microprocessor unit
RAM	Random access memory
ROM	Read-Only Memory
CPU	Central Processing Unit
ADC	Analog to Digital Converter
DAC	Digital to Analog Converter
MCU	Microcontroller unit
I/O	Input/output
SR	Status Register
PC	Program Counter
GRP	General Purpose Register
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
EPROM	Erasable Programmable Read-Only Memory
OTP	One-Time-Programmable Memory
MSB	Most Significant Bit
LSB	Least Significant Bit
AAF	Anti Aliasing Filter

DAQ	Data Acquisition System
DSP	Digital Signal Processor
USB	Universal Serial Bus
PLL	Phase Locked Loop
SFR	Special Function Register
CCP	Capture, Compare and PWM
PWM	Pulse-width modulation
SIE	Serial Interface Engine
MSSP	Master Synchronous Serial Port
SPI	Serial Peripheral Interface
I2C	Inter Integrated Circuit

1. Εισαγωγή

1.1 Θέμα και σκοπός εργασίας

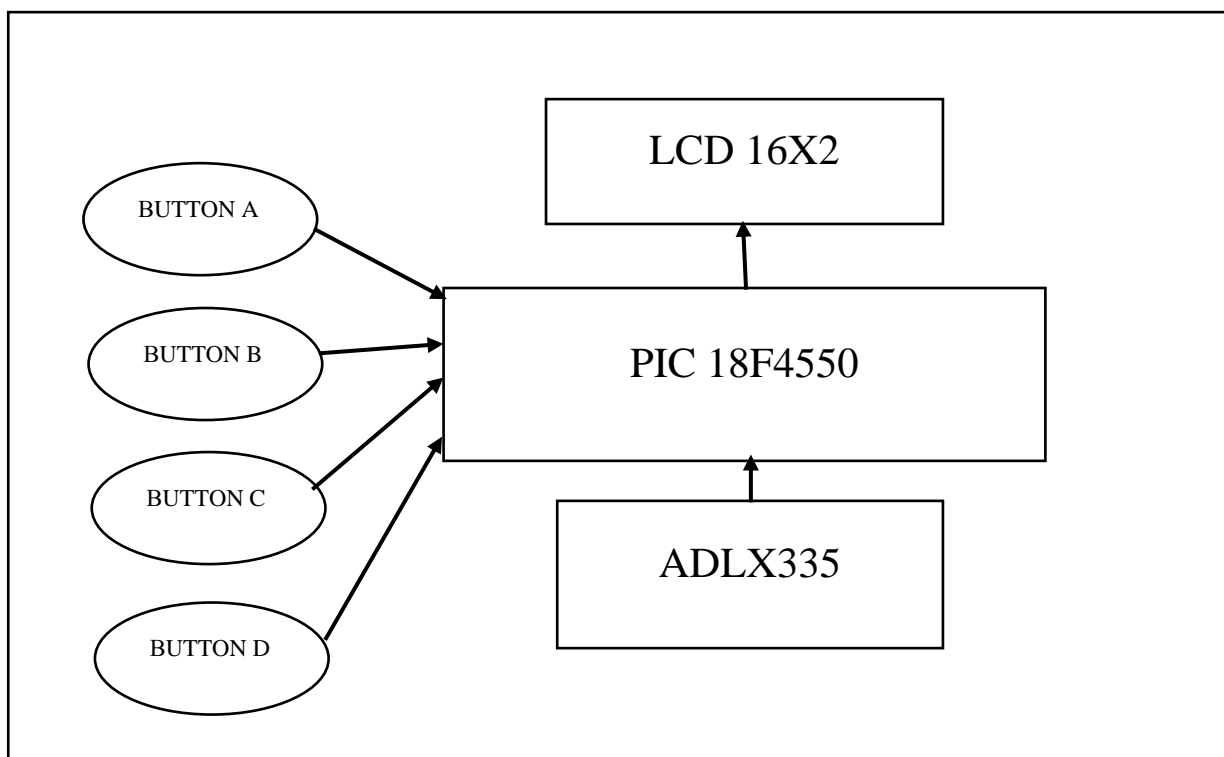
Στις μέρες μας, οι αισθητήρες κίνησης και μετατόπισης μας βοηθούν όλο και περισσότερο στην καθημερινότητα μας, μερικές φορές, χωρίς να το ξέρουμε. Μία τέτοια περίπτωση αισθητήρα είναι και το επιταχυνσιόμετρο, ένα αισθητήριο μέτρησης της επιτάχυνσης, το οποίο βρίσκεται από τα smartphone μέχρι και τα αυτοκίνητα μας βοηθώντας μας σε πολλές εφαρμογές.

Στην παρούσα εργασία λοιπόν, έχει κατασκευαστεί και θα παρουσιαστεί ένα επιταχυνσιόμετρο τριών αξόνων με την χρήση του μικροελεγκτή PIC18F4550.

Πιο συγκεκριμένα, η κατασκευή χρησιμοποιεί το αισθητήριο ADXL335 για να μετρήσει την επιτάχυνση, έπειτα ο μικροελεγκτής, αναλόγως με την εντολή που θα του δίνει ο χρήστης πατώντας το ανάλογο πλήκτρο, μετατρέπει την τιμή είτε σε τριγωνομετρικές γωνίες Φ , Ψ , Θ είτε σε γωνίες περιστροφής είτε σε τιμές του συστήματος συντεταγμένων x,y,z και έπειτα εμφανίζει την τιμή σε μία οθόνη LCD.

Εάν η γωνία κλίσης της συσκευής είναι μεγαλύτερη από 30 μοίρες, εμφανίζεται το ανάλογο μήνυμα στην οθόνη.

Παρακάτω παρουσιάζεται το μπλοκ διάγραμμα της κατασκευής.



Εικόνα 1.1 Μπλοκ διάγραμμα λειτουργίας της κατασκευής 'επιταχυνσιόμετρο τριών αξόνων με χρήση PIC 18F4550'.

1.2 Επιτάχυνση

Η επιτάχυνση αποτελεί μία από τις θεμέλιες έννοιες της φυσικής, καθώς συνδυάζει την κινηματική φυσική με την δυναμική φυσική. Σύμφωνα με το πρώτο αξίωμα του Νεύτωνα, αυτό της αδράνειας, ένα σώμα θα διατηρεί την κινητική του κατάσταση εφόσον η συνισταμένη των εξωτερικών δυνάμεων που δρουν πάνω του είναι μηδενική. Αυτό σημαίνει ότι ένα σώμα θα μένει ακίνητο ή θα διατηρεί την ταχύτητά του σταθερή εφόσον το σύνολο των δυνάμεων που επιδρούν σε αυτό είναι μηδέν. Επομένως, στην περίπτωση που η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται στο σώμα δεν είναι μηδέν, η ταχύτητα του σώματος μεταβάλλεται. Η επιτάχυνση εκφράζει το ρυθμό αλλαγής αυτής της ταχύτητας, δηλαδή, το πόσο γρήγορα αλλάζει η ταχύτητα ενός σώματος σε μία τυχαία χρονική στιγμή με άλλα λόγια, εκφράζει τη μεταβολή της ταχύτητας στη μονάδα του χρόνου. Η ταχύτητα είναι ένα διανυσματικό μέγεθος, επομένως, για να μεταβληθεί αρκεί να μεταβληθεί τουλάχιστον ένα από τα τρία στοιχεία που τη χαρακτηρίζουν, δηλαδή το μέτρο, η φορά και η διεύθυνση του διανύσματος. Με βάση την σχέση της ταχύτητας με την επιτάχυνση συμπεραίνουμε πως και η δεύτερη, δηλαδή η επιτάχυνση αποτελεί επίσης ένα διανυσματικό μέγεθος. Η επιτάχυνση συμβολίζεται με το γράμμα 'α' και αναπαρίσταται μαθηματικά από μία διανυσματική συνάρτηση της θέσης όπου η διεύθυνσή της εξαρτάται από το είδος της κίνησης ως προς την τροχιά της και η φορά της εξαρτάται από το είδος της κίνησης ως προς τον ρυθμό μεταβολής. Η σχέση της στιγμιαίας επιτάχυνσης είναι η εξής:

$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t} \frac{v(t+\Delta t) - v(t)}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2r}{dt^2} \quad (1.1)$$

όπου v η ταχύτητα και r η θέση ενός σώματος ως προς ένα αυθαίρετα επιλεγμένο σύστημα αξόνων.

Η μονάδα μέτρησης της επιτάχυνσης στο σύστημα μονάδων S.I. είναι το 1 m/s^2 (1 μέτρο ανά δευτερόλεπτο στο τετράγωνο.) [1]

1.3 Ορισμός μεγέθους “G”

Ως ‘G’ ορίζεται η επιτάχυνση της βαρύτητας, δηλαδή η επιτάχυνση που θα έχει ένα σώμα όταν βρεθεί μέσα στο βαρυτικό πεδίο της Γης. Μία μονάδα δύναμης G ορίζεται στον πλανήτη Γη ως 9.8 m/s^2 αλλά ποικίλει ελαφρώς ανάλογα με την απόσταση του αντικειμένου από την Γη (ανύψωση). Για άλλους πλανήτες η τιμή είναι διαφορετική λόγω των διακυμάνσεων της βαρυτικής έλξης. [2]

$$\mathbf{G} = 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (1.2)$$

1.4 Γωνίες Euler

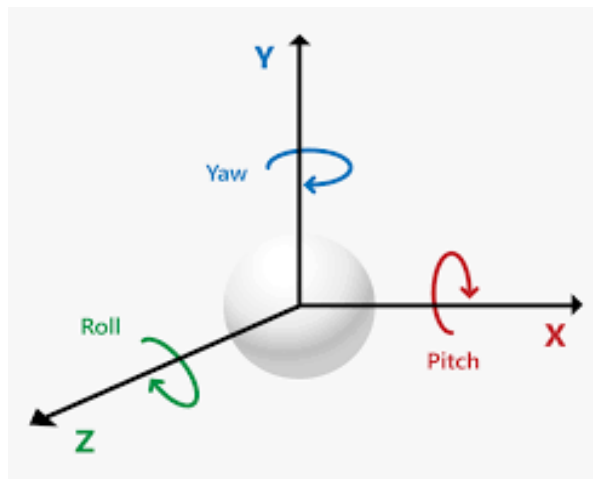
Οι γωνίες Euler είναι τρεις γωνίες, οι οποίες χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τον προσανατολισμό ενός αντικειμένου σε σχέση με ένα σταθερό σύστημα συντεταγμένων. Οι τρεις αυτές γωνίες μπορούν να μας δώσουν μία ακριβή εκτίμηση της περιστροφής ενός σώματος στους τρεις άξονες, άρα μας δίνουν την δυνατότητα να βρούμε τον προσανατολισμό του. Αντίστοιχα με τους τρεις άξονες του συστήματος συντεταγμένων (x,y,z) έχουμε τις γωνίες κύλισης (roll), ανύψωσης (pitch) και στροφής (yaw). Για την μελέτη της περιστροφής ενός αντικειμένου στον τρισδιάστατο χώρο, ορίζουμε τρία συστήματα αναφοράς: το πλαίσιο αναφοράς του αντικειμένου το οποίο μελετάμε, το πλαίσιο αναφοράς του αισθητήρα και το παγκόσμιο πλαίσιο αναφοράς, δηλαδή το πλαίσιο αναφοράς

της Γης. Αν ο αισθητήρας είναι επάνω στο αντικείμενο τότε οι δύο πρώτες τιμές είναι ίδιες άρα το πλαίσιο αναφοράς του σώματος δεν μας χρειάζεται. Επομένως η θέση περιγράφεται, ως το πλαίσιο αναφοράς του αισθητήρα προς το πλαίσιο αναφοράς της Γης. Οι μετατοπίσεις των αξόνων περιστροφής δίνουν τις γωνίες Euler, και υπολογίζονται από μαθηματικούς τύπους. Καθώς οι γωνίες Θ , Ψ και Φ βρίσκονται στην περιοχή από -90° έως $+90^\circ$ πρέπει να τις μετατρέψουμε έτσι ώστε να βρίσκονται στην περιοχή από -180° έως $+180^\circ$ ώστε να μπορεί να υπολογιστεί μία πλήρης γωνία περιστροφής 360° . Ο υπολογισμός αυτός γίνεται με την βοήθεια του τόξου της εφαπτομένης και μπορεί να εκφραστεί όπως υποδεικνύεται παρακάτω:

$$\text{atan2}(y, x) = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y}{x}\right) & \text{if } x > 0, \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) + \pi & \text{if } x < 0 \text{ and } y \geq 0, \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) - \pi & \text{if } x < 0 \text{ and } y < 0, \\ +\frac{\pi}{2} & \text{if } x = 0 \text{ and } y > 0, \\ -\frac{\pi}{2} & \text{if } x = 0 \text{ and } y < 0 \\ \text{undefined} & \text{if } x = 0 \text{ and } y = 0 \end{cases} \quad (1.3)$$

Τα αποτελέσματα της παραπάνω συνάρτησης βρίσκονται στην περιοχή από $-\pi$ έως π . Για να μετατρέψουμε αυτές τις τιμές από ακτίνια σε μοίρες πολλαπλασιάζουμε με το πηλίκο της σχέση $180/\pi$ που ισούται περίπου με 57.295. Το αποτέλεσμα θα είναι στην κλίμακα από -180° έως $+180^\circ$, για να το ανάγουμε στην κλίμακα 0° έως 360° απλά προσθέτουμε κάθε φορά $+180$.

Οι γωνίες Euler είναι πολύ χρήσιμες για την κατανόηση των περιστροφών που πραγματοποιούνται στον κάθε άξονα. [3]

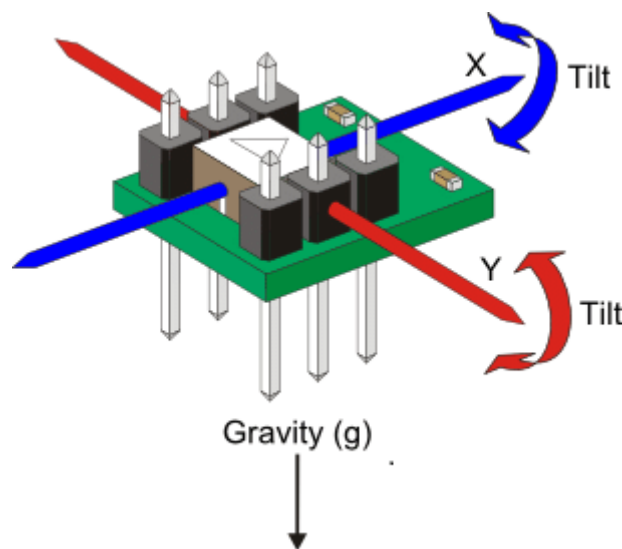


Εικόνα 1.2 Pitch, Yaw, Roll οι γωνίες περιστροφής. [15]

2. Επιταχυνσιόμετρα και μικροελεγκτές

2.1 Ορισμός επιταχυνσιόμετρου

Το επιταχυνσιόμετρο είναι μία ηλεκτρομηχανική συσκευή που ανιχνεύει στατικές και δυναμικές δυνάμεις επιτάχυνσης. Το επιταχυνσιόμετρο μπορεί να μετρήσει την επιτάχυνση σε έναν, δύο ή τρεις άξονες. Οι στατικές δυνάμεις περιλαμβάνουν τη βαρύτητα, ενώ οι δυναμικές δυνάμεις μπορούν να περιλαμβάνουν κραδασμούς και κίνηση. Η επιτάχυνση ορίζεται ως μέτρο ανά δευτερόλεπτο στο τετράγωνο (m/s^2) ή διαφορετικά ως δύναμη G. Η επιτάχυνση που μετρά το επιταχυνσιόμετρο είναι η επιτάχυνση που αντιλαμβάνεται σε σχέση με την ελεύθερη πτώση και είναι αισθητή από ανθρώπους και αντικείμενα. Με άλλα λόγια, σε κάθε σημείο του χωροχρόνου, η αρχή της ισοδυναμίας εγγυάται την ύπαρξη ενός τοπικού αδρανειακού συστήματος αναφοράς και το επιταχυνσιόμετρο μετράει την επιτάχυνση σε σχέση με αυτό το σύστημα. [4]



Εικόνα 2.1 Σχέδιο τυπικού επιταχυνσιόμετρου [16]

2.2 Χρήση επιταχυνσιόμετρου

Το επιταχυνσιόμετρο χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλούς κλάδους. Πιο συγκεκριμένα:

- **Στον τομέα της μηχανικής:** Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση της επιτάχυνσης ενός οχήματος. Τα επιταχυνσιόμετρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση κραδασμών σε αυτοκίνητα, μηχανήματα, κτίρια, συστήματα ελέγχου διεργασιών και εγκαταστάσεις ασφαλείας. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση της σεισμικής δραστηριότητας, της κλίσης, των κραδασμών μίας μηχανής, της δυναμικής απόστασης και της ταχύτητας με ή χωρίς την επίδραση της βαρύτητας.
- **Στον τομέα της βιολογίας:** Τα επιταχυνσιόμετρα χρησιμοποιούνται επίσης όλο και περισσότερο στις επιστήμες της βιολογίας. Οι εγγραφές υψηλής συχνότητας δι-αξονικής ή τρι-αξονικής επιτάχυνσης επιτρέπουν τη διάκριση μοτίβων στις συμπεριφορές ζώων. Όλο και περισσότερο, ερευνητές αναπτύσσουν επιταχυνσιόμετρα με πρόσθετη τεχνολογία, όπως κάμερες ή μικρόφωνα, για να κατανοήσουν καλύτερα τη συμπεριφορά των ζώων στην άγρια φύση.
- **Βιομηχανία:** Τα επιταχυνσιόμετρα χρησιμοποιούνται επίσης για την παρακολούθηση της καλής λειτουργίας μηχανημάτων για την αναφορά κραδασμών και μεταβολών στον

περιστρεφόμενο εξοπλισμό τους όπως είναι οι στρόβιλοι, οι αντλίες, οι ανεμιστήρες, οι κύλινδροι, ή κάποιο ελάττωμα σε ρουλεμάν. Τα δεδομένα δόνησης του επιταχυνσιόμετρου επιτρέπουν στο χρήστη να παρακολουθεί τις μηχανές και να εντοπίζει αυτά τα σφάλματα πριν ο περιστρεφόμενος εξοπλισμός αποτύχει πλήρως.

- **Οικοδομική και δομική παρακολούθηση:** Τα επιταχυνσιόμετρα χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της κίνησης και των κραδασμών μιας δομής που εκτίθεται σε δυναμικά φορτία. Τα δυναμικά φορτία προέρχονται από διάφορες πηγές όπως: ανθρώπινη δραστηριότητα, κατασκευαστικές εργασίες, φορτία ανέμου, αποτυχία εδάφους και σεισμοί. Σε δομικές κατασκευές, η μέτρηση και η καταγραφή του τρόπου με τον οποίο μια δομή ανταποκρίνεται σε τέτοιου είδους δυναμικά φορτία είναι κρίσιμη για την αξιολόγηση της ασφάλειας και της βιωσιμότητας μιας κατασκευής.
- **Ιατρικές εφαρμογές:** Κάποιοι απινιδωτές νέας τεχνολογίας χρησιμοποιούν pads που περιέχουν επιταχυνσιόμετρα για τη μέτρηση του βάθους της συμπίεσης στο στήθος. Τα τελευταία χρόνια, αρκετές εταιρείες έχουν παράγει και εμπορεύονται αθλητικά ρολόγια για δρομείς που περιέχουν επιταχυνσιόμετρα για να προσδιορίσουν την ταχύτητα και την απόσταση του δρομέα που το φοράει. Τα επιταχυνσιόμετρα έχουν χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό παραμέτρων βάρδισης. Αυτό το είδος αισθητήρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση και την παρακολούθηση ανθρώπων καθώς και σε εφαρμογές βιονικών άκρων και άλλων τεχνητών μελών του σώματος.
- **Πλοήγηση:** Ένα αδρανειακό σύστημα πλοήγησης (INS) είναι ένα βοήθημα πλοήγησης που χρησιμοποιεί έναν υπολογιστή και αισθητήρες κίνησης (επιταχυνσιόμετρα) για να υπολογίζει συνεχώς μέσω dead reckoning τη θέση, τον προσανατολισμό και την ταχύτητα (κατεύθυνση και ταχύτητα κίνησης) ενός κινούμενου αντικειμένου χωρίς την ανάγκη εξωτερικών αναφορών, παράμετροι που είναι απολύτως απαραίτητοι για τη λειτουργία του αυτόματου πιλότου και τη ναυσιπλοΐα αεροπλάνων, πλοίων και υποβρυχίων.
- **Μέσα μεταφοράς:** Μία από τις πιο κοινές χρήσεις για τα επιταχυνσιόμετρα MEMS είναι στα συστήματα ανάπτυξης αερόσακων για σύγχρονα αυτοκίνητα. Σε αυτήν την περίπτωση, τα επιταχυνσιόμετρα χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση της ταχείας αρνητικής επιτάχυνσης του οχήματος για να προσδιορίσουν τότε συνέβη μια σύγκρουση και τη σοβαρότητα της σύγκρουσης. Μια άλλη κοινή χρήση τους στα αυτοκίνητα είναι στα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου σταθερότητας, τα οποία χρησιμοποιούν ένα πλευρικό επιταχυνσιόμετρο για τη μέτρηση των δυνάμεων στροφής. Μια άλλη εφαρμογή σε αυτοκίνητα είναι η παρακολούθηση του θορύβου και των κραδασμών, συνθήκες που προκαλούν ενόχληση για τους οδηγούς και τους επιβάτες και μπορεί επίσης να είναι ενδείξεις μηχανικών βλαβών. Τα τρένα με κλίση χρησιμοποιούν επιταχυνσιόμετρα και γυροσκόπια για τον υπολογισμό της απαιτούμενης κλίσης. Τα συστήματα αυτόματης ειδοποίησης σύγκρουσης (ACN) χρησιμοποιούν επίσης επιταχυνσιόμετρα σε ένα σύστημα για να ζητήσουν βοήθεια σε περίπτωση σύγκρουσης του οχήματος. Επίσης σε οχήματα τα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου ευστάθειας χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της πραγματικής κίνησης του οχήματος. Ένας υπολογιστής συγκρίνει την πραγματική κίνηση του οχήματος με την είσοδο του τιμονιού και του γκαζιού του οδηγού. Ο υπολογιστής ελέγχου σταθερότητας μπορεί να φρενάρει επιλεκτικά μεμονωμένους τροχούς ή / και να μειώσει την ισχύ του κινητήρα για να ελαχιστοποιήσει τη διαφορά μεταξύ της εισόδου του οδηγού και της πραγματικής κίνησης του οχήματος. Αυτό μπορεί να αποτρέψει την περιστροφή ή την ανατροπή του οχήματος. Χρησιμοποιείται επίσης σε ορισμένους καταγραφείς δεδομένων για την παρακολούθηση των χειρισμών κατά τη μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων.
- **Ηφαιστειολογία:** Τα σύγχρονα ηλεκτρονικά επιταχυνσιόμετρα χρησιμοποιούνται σε συσκευές τηλεπισκόπησης που προορίζονται για την παρακολούθηση ενεργών ηφαιστειών για την ανίχνευση της κίνησης του μάγματος.
- **Ηλεκτρονικές συσκευές:** Τα επιταχυνσιόμετρα ενσωματώνονται όλο και περισσότερο σε ηλεκτρονικές συσκευές για τον εντοπισμό του προσανατολισμού της συσκευής, για παράδειγμα, για να περιστρέψει την οθόνη ανάλογα με το που στρέφεται η συσκευή (smartphone, tablet). Ένας αισθητήρας ελεύθερης πτώσης είναι ένα επιταχυνσιόμετρο που χρησιμοποιείται σε φορητούς υπολογιστές και σκληρούς δίσκους για να ανιχνεύσει εάν μία συσκευή υποστεί απότομη πτώση. Στη συνέχεια, μπορεί να εφαρμόσει μέτρα ασφαλείας, για

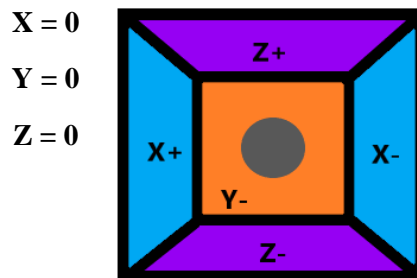
την αποφυγή απώλειας δεδομένων κατά την πρόσκρουση. Σε κινητές συσκευές μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως βηματόμετρα, σε συνδυασμό με εξειδικευμένες εφαρμογές. Κονσόλα βιντεοπαιχνιδιών όπως το Nintendo Wii και το Sony Playstation χρησιμοποιούν χειριστήρια που περιέχουν επιταχυνσιόμετρο τριών αξόνων για να ανιχνεύουν την κατεύθυνση της κίνησης του χρήστη.

- **Σταθεροποίηση εικόνας:** Οι βιντεοκάμερες χρησιμοποιούν επιταχυνσιόμετρα για σταθεροποίηση εικόνας. Ορισμένες κάμερες φωτογραφιών χρησιμοποιούν επιταχυνσιόμετρα για τη λειτουργία anti-blur. Η κάμερα καθυστερεί τη λήψη της εικόνας όταν κινείται η κάμερα. Όταν η κάμερα είναι ακινητοποιημένη τότε μόνον η κάμερα τραβάει την φωτογραφία. Ορισμένες ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές περιέχουν επιταχυνσιόμετρα για τον προσδιορισμό του προσανατολισμού της φωτογραφίας που λαμβάνεται και επίσης για την περιστροφή της τρέχουσας εικόνας κατά την προβολή.[4]

2.3 Τρόπος λειτουργίας επιταχυνσιόμετρου

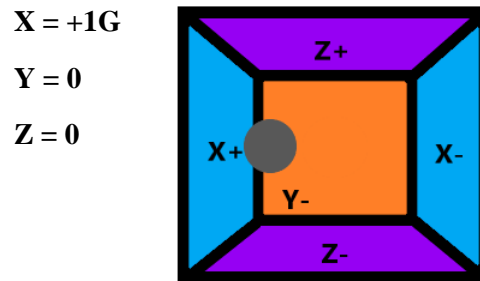
Η κύρια αρχή λειτουργίας ενός επιταχυνσιόμετρου είναι η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια. Όταν μια μάζα, κάτι σαν ελατήριο, το οποίο υπάρχει μέσα στον αισθητήρα, αρχίζει να κινείται προς τα κάτω υφίσταται επιτάχυνση. Αυτή η επιτάχυνση μετατρέπεται σε μια ποσότητα ηλεκτρικού σήματος που χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις της διακύμανσης στη θέση της συσκευής.

Για την περιγραφή του τρόπου λειτουργίας του επιταχυνσιόμετρου, ας φανταστούμε έναν κύβο που μέσα του υπάρχει μία ελεύθερη μάζα, για παράδειγμα μία σφαίρα, όπως φαίνεται στην εικόνα μας. Έπειτα θέτουμε ως άξονες κάθε ζευγάρι πλευρών του κύβου αυτού. Στις εικόνες που ακολουθούν έχει αφαιρεθεί η πλευρά Y+ έτσι ώστε να έχουμε την εικόνα στο εσωτερικό του κύβου. Όταν αυτός ο κύβος τοποθετηθεί σε ακίνητο περιβάλλον χωρίς βαρύτητα η σφαίρα θα αιωρείται στο κέντρο του.



Εικόνα 2.2 Αναπαράσταση επιταχυνσιόμετρου χωρίς την άσκηση δυνάμεων.

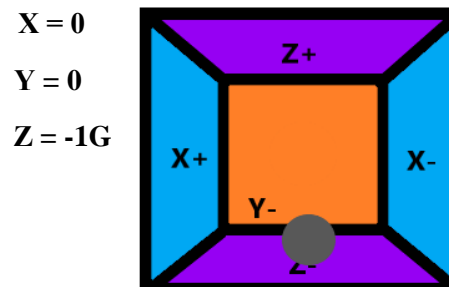
Αν ο κύβος ξαφνικά μετακινηθεί προς τα δεξιά, επιταχύνοντας με 1G, η σφαίρα μας θα χτυπήσει στην πλευρά X+. Μετρώντας την δύναμη πίεσης που ασκεί η σφαίρα στην πλευρά του κύβου, προκύπτει ως αποτέλεσμα τιμή +1G στην X διεύθυνση.



Εικόνα 2.3 Αναπαράσταση επιταχυνσιόμετρου όταν μετακινείται προς τα δεξιά.

Στη πραγματικότητα το επιταχυνσιόμετρο ανιχνεύει την δύναμη αυτή η οποία είναι αντίθετη με την φορά του διανύσματος επιταχύνσεως. Αυτή η δύναμη ονομάζεται αδρανειακή δύναμη.

Στο τελευταίο παράδειγμα, έχουμε τοποθετήσει τον κύβο στη επιφάνεια της Γης, η σφαίρα θα πέσει στην πλευρά Z- και θα ασκήσει μία δύναμη της τάξεως του 1G στην κάτω πλευρά, όπως φαίνεται στην εικόνα.



Εικόνα 2.4 Αναπαράσταση επιταχυνσιόμετρου που ασκείται επάνω του μόνο η δύναμη της βαρύτητας.

Στην περίπτωση αυτή ο κύβος είναι ακίνητος αλλά και πάλι βλέπουμε μία ένδειξη -1G στην διεύθυνση Z-. Η πίεση της σφαίρας στην επιφάνεια του κύβου δημιουργήθηκε λόγω της δύναμης της βαρύτητας. [5]

2.4 Τα χαρακτηριστικά ενός επιταχυνσιόμετρου

Η δόνηση είναι ένα μηχανικό δυναμικό φαινόμενο το οποίο περιλαμβάνει περιοδική ταλαντευτική κίνηση σε σχέση με ένα σημείο αναφοράς. Σε ορισμένες περιπτώσεις όπως για παράδειγμα στην γραμμική επιτάχυνση μπορεί ο παράγοντας της ταλάντωσης να αλλάζει, αλλά οι παράμετροι και ο σχεδιασμός του αισθητηρίου παραμένουν τα ίδια. Το επιταχυνσιόμετρο μπορεί να χαρακτηριστεί ως

Κεφάλαιο 2

ένα αισθητήριο πρώτου βαθμού το οποίο περιέχει ένα σύστημα στήριξης σε σχήμα ελατηρίου και ένα πλαίσιο με ιδιότητες απόσβεσης.

Το μαθηματικό μοντέλο ενός επιταχυνσιόμετρου είναι το παρακάτω:

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dy}{dt} + kx = M \frac{d^2y}{dt^2} \quad (2.1)$$

όπου M είναι η μάζα η οποία κρέμεται από ένα ελατήριο με ακαμψία k και συντελεστή απόσβεσης b .

Λύνοντας την παραπάνω εξίσωση με τη χρήση του μετασχηματισμού Laplace καταλήγουμε στην παρακάτω σχέση.

$$Ms^2X(s) + bsX + kX(s) = -MA(s) \quad (2.2)$$

Όπου $X(s)$ και $A(s)$ είναι ο μετασχηματισμός Laplace για τις μεταβλητές $x(t)$ και d^2y/d^2x αντίστοιχα. Λύνοντας ως προς $X(s)$, καταλήγουμε στην παρακάτω σχέση.

$$X(s) = -\frac{MA(s)}{Ms^2+bs+k} \quad (2.3)$$

Εισάγοντας μία μεταβλητή $\omega_0 = \sqrt{k/M}$ και $2\zeta\omega_0 = b/M$ τότε η παραπάνω εξίσωση μπορεί να οριστεί ως:

$$X(s) = -\frac{A(s)}{s^2+2\zeta\omega_0s+\omega_0^2} \quad (2.4)$$

Η τιμή ω_0 αντιπροσωπεύει την γωνιακή συχνότητα του επιταχυνσιόμετρου με απουσία απόσβεσης και η τιμή ζ αντιπροσωπεύει την τιμή της ομαλής απόσβεσης. Θέτοντας την παρακάτω σχέση:

$$G(s) = -\frac{1}{s^2+2\zeta\omega_0s+\omega_0^2} \quad (2.5)$$

η προηγούμενη εξίσωση γίνεται $X(s) = G(s)A(s)$ και η λύση της μπορεί να εκφραστεί με αντίστροφο μετασχηματισμό Laplace ως εξής:

$$x(t) = L^{-1}\{G(s)A(s)\} \quad (2.6)$$

η οποία, από το θεώρημα συνέλιξης για το μετασχηματισμό Laplace, μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$x(t) = \int_0^t g(t-\tau)\alpha(\tau)d\tau \quad (2.7)$$

Όπου a είναι η μεταβλητή που συμβολίζει την χρονικά εξαρτώμενη ώθηση του σώματος που επιταχύνεται και η μεταβλητή $g(t)$ προέρχεται από τον αντίστροφο μετασχηματισμό Laplace της σχέσης $L^{-1}\{G(s)\}$. Θέτοντας $\omega = \omega_0\sqrt{1-\zeta^2}$ τότε η παραπάνω εξίσωση έχει δύο λύσεις, η μία είναι για ($\zeta < 1$)

$$x(t) = \int_0^t -\frac{1}{\omega} e^{-\zeta\omega(t-\tau)} \sin \omega(t-\tau) a(\tau) d\tau \quad (2.8)$$

και η άλλη είναι για ($\zeta > 1$)

$$x(t) = \int_0^t -\frac{1}{\omega} e^{-\zeta\omega(t-\tau)} \sinh \omega(t-\tau) a(\tau) d\tau \quad (2.9)$$

όπου $\omega = \omega_0\sqrt{\zeta^2-1}$.

Ένα σωστά σχεδιασμένο κατασκευασμένο και βαθμονομημένο επιταχυνσιόμετρο θα πρέπει να έχει μία σαφώς αναγνωρίσιμη φυσική συχνότητα και μία απόκριση συχνότητας στην οποία μπορεί να γίνει η πιο ακριβής μέτρηση. Μέσα σε αυτή την περιοχή απόκρισης συχνότητας καθώς η συχνότητα δόνησης αλλάζει, η έξοδος του αισθητηρίου θα αντικατοπτρίζει σωστά τις αλλαγές χωρίς να πολλαπλασιάζει το σήμα με τυχών μεταβολές στην χαρακτηριστική συχνότητα του επιταχυνσιομέτρου.

Ένα ρευστό υλικό με συγκεκριμένο ιξώδες χρησιμοποιείται σε πολλά επιταχυνσιόμετρα για να βελτιώσει το εύρος των συχνοτήτων μέσω περιορισμού των θορύβων. Πολύ συχνά χρησιμοποιείται το λάδι σιλικόνης ως μέσο απόσβεσης.

Κατά την βαθμονόμηση ενός επιταχυνσιόμετρου πρέπει να καθοριστούν πολλά από τα χαρακτηριστικά του όπως αυτά που παραθέτονται παρακάτω.

- Η ευαισθησία είναι ο λόγος μίας ηλεκτρικής εξόδου προς μία μηχανική είσοδο. Συνήθως εκφράζεται σε volt ανά μονάδα επιτάχυνσης υπό καθορισμένες συνθήκες. Για παράδειγμα, η ευαισθησία μπορεί να οριστεί ως $1 \text{ V} / \text{G}$.
- Η απόκριση συχνότητας είναι το σήμα της εξόδου σε μια περιοχή συχνοτήτων όπου ο αισθητήρας λειτουργεί. Είναι συγκεκριμένη σε σχέση με μια συχνότητα αναφοράς, η οποία είναι εκεί όπου η ευαισθησία είναι συγκεκριμένη.
- Η μηδενική έξοδος καθορίζεται για τη θέση του αισθητήρα όπου ο ευαίσθητος (ενεργός) άξονάς του είναι κάθετος προς τη βαρύτητα της γης. δηλαδή στους αισθητήρες που έχουν ένα εξάρτημα DC στο σήμα εξόδου, η βαρυντική επίδραση πρέπει να εξαλειφθεί πριν από την έξοδο, καθώς δεν προσδιορίζεται μηχανική είσοδος.
- Η γραμμικότητα του επιταχυνσιόμετρου καθορίζεται στο δυναμικό εύρος των σημάτων εισόδου. [6]

2.5 Είδη επιταχυνσιομέτρου

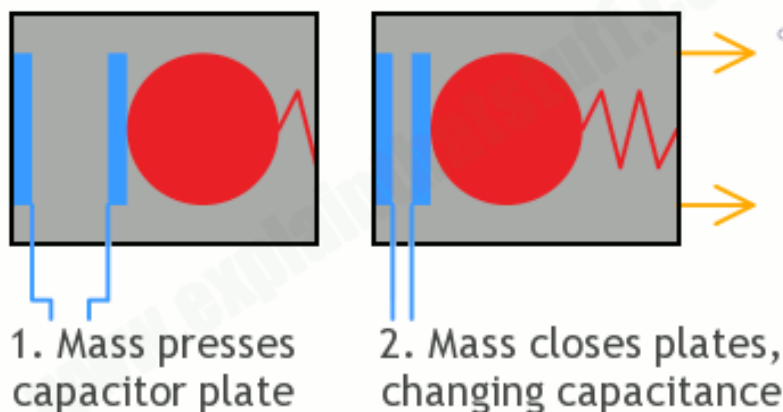
Γενικά, υπάρχουν τρεις διαφορετικές κατηγορίες επιταχυνσιομέτρων. Οι τρεις αυτές κατηγορίες είναι τα χωρητικά, τα πιεζοηλεκτρικά και τα επιταχυνσιόμετρα πιεζοαντίστασης. Επίσης, τα επιταχυνσιόμετρα χωρίζονται με βάση το τύπο της απόκρισης της τάσης τους σε AC και DC. Σε ένα επιταχυνσιόμετρο απόκρισης AC, όπως υποδηλώνει το όνομα, η έξοδος είναι AC. Μια τέτοια

συσκευή AC είναι κατάλληλη μόνο για την μέτρηση δυναμικών συμβάντων και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της στατικής λειτουργίας της επιτάχυνσης όπως, για παράδειγμα, η βαρύτητα και οι συνεχείς επιταχύνσεις. Σε ένα επιταχυνσιόμετρο απόκρισης DC, από την άλλη, η έξοδος είναι DC και μπορεί να ανταποκριθεί σε μηδενική συχνότητα. Ως εκ τούτου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της στατικής, καθώς και της δυναμικής επιτάχυνσης. [7]

2.5.1 Χωρητικό επιταχυνσιόμετρο

Το χωρητικό επιταχυνσιόμετρο είναι ο τύπος επιταχυνσιόμετρου που χρησιμοποιείται πιο συχνά. Αυτά τα επιταχυνσιόμετρα προσδιορίζουν την επιτάχυνση ενός αντικειμένου μετρώντας την αλλαγή στην χωρητικότητα ενός πυκνωτή. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στην τοποθέτηση ενός βάρους το οποίο στηρίζεται σε ελατήρια. Το ένα άκρο του ελατηρίου είναι στερεωμένο σε έναν πυκνωτή, το άλλο άκρο στο τοποθετημένο βάρος. Όταν ασκούνται δυνάμεις στο αισθητήριο, το βάρος μετακινεί το ελατήριο, το οποίο με την σειρά του αλλάζει την χωρητικότητα στον πυκνωτή, μέσω της αλλαγής της απόστασης μεταξύ των στελεχών του πυκνωτή. Όταν το αισθητήριο υφίσταται την δύναμη της επιτάχυνσης, η απόσταση μεταξύ των πλακών του πυκνωτή αλλάζει, καθώς κινείται το διάφραγμα του αισθητήρα και επομένως, αλλάζει και η χωρητικότητα του πυκνωτή. Το βασικότερο πλεονέκτημα του χωρητικού επιταχυνσιόμετρου είναι η δυνατότητα της απευθείας ενσωμάτωσής του σε πλακέτα τυπωμένου. Ένα μειονέκτημα του χωρητικού επιταχυνσιόμετρου είναι η μικρή ακρίβεια μετρήσεων σε περιπτώσεις υψηλών συχνοτήτων πράγμα που το καθιστά μη ταιριαστό για πιο ειδικές βιομηχανικές εφαρμογές. [8]

Capacitive accelerometer

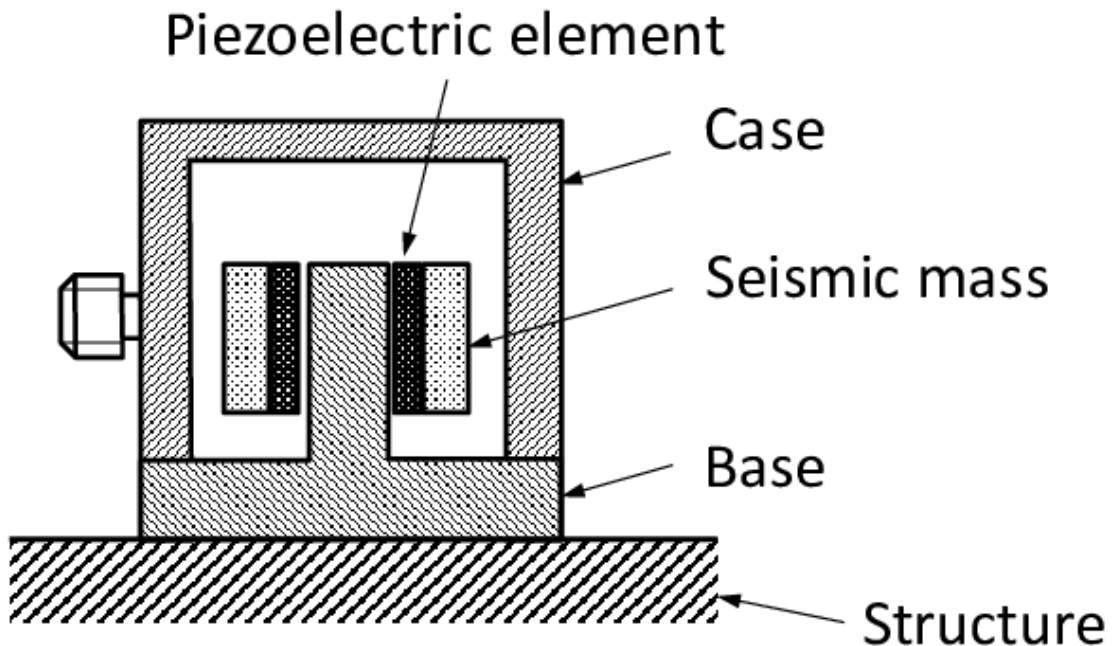


Εικόνα 2.5 Τρόπος λειτουργίας χωρητικού επιταχυνσιόμετρου. [17]

2.5.2 Πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο.

Ένα πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο χρησιμοποιεί το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο (τα πιεζοηλεκτρικά υλικά παράγουν ηλεκτρισμό όταν σε αυτά ασκηθεί πίεση) και αποτελείται από μια μάζα η οποία είναι προσαρτημένη σε ένα πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο ο οποίος είναι τοποθετημένος μέσα σε μία θήκη. Όταν το επιταχυνσιόμετρο υπόκειται σε κραδασμούς, η μάζα στον κρύσταλλο παραμένει ακίνητη στο διάστημα λόγω αδράνειας. Ως αποτέλεσμα, η μάζα συμπιέζει και τεντώνει τον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο. Αυτή η δύναμη είναι ανάλογη της επιτάχυνσης σύμφωνα με τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, $F = ma$, και δημιουργεί ένα φορτίο. Στη συνέχεια, το φορτίο της εξόδου μετατρέπεται σε

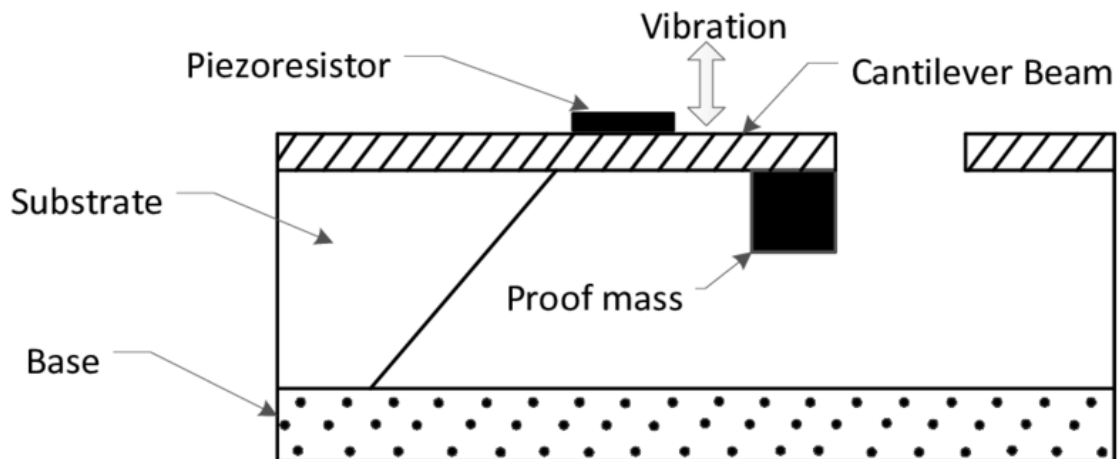
έξοδο τάσης χαμηλής σύνθετης αντίστασης. Το στοιχείο που χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις τέτοιων αισθητήρων είναι συνήθως το PZT, (κράμα ζirkονίου, τιτανίου, μολύβδου). Τα πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα έχουν υψηλή ακρίβεια και ευαισθησία. Μπορούν να μετρήσουν επιταχύνσεις μέχρι μερικών δεκάδων G. [8]



Εικόνα 2.6 Εσωτερικό πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο. [18]

2.5.3 Επιταχυνσιόμετρο πιεζοαντίστασης

Το επιταχυνσιόμετρο πιεζοαντίστασης αλλάζει την αντίσταση του, που έχει το ρόλο ενός ελατηρίου, ανάλογα με την αντίσταση που ασκείται σε αυτό. Τέτοιου τύπου επιταχυνσιόμετρα στερεώνονται επάνω σε αντικείμενα τα οποία υπολογίζουν τις αλλαγές στο μέγεθός τους λόγω της παραμόρφωσης. Τα επιταχυνσιόμετρα πιεζοαντίστασης έχουν πολύ μεγάλο εύρος ζώνης το οποίο επιτρέπει τη χρήση τους για τη μέτρηση σοκ μικρής διάρκειας (υψηλής συχνότητας). Τα επιταχυνσιόμετρα πιεζοαντίστασης έχουν την ικανότητα να μετρήσουν έως και 0 Hertz οπότε μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τον ακριβή υπολογισμό ταχύτητας ή μετατόπισης. Τα επιταχυνσιόμετρα πιεζοαντίστασης έχουν συνήθως πολύ χαμηλή ευαισθησία, γεγονός που τα καθιστά λιγότερο χρήσιμα σε δοκιμές κραδασμών. Επίσης, τα επιταχυνσιόμετρα πιεζοαντίστασης είναι ευαίσθητα στη διακύμανση της θερμοκρασίας, επομένως απαιτούν αντιστάθμιση θερμοκρασίας. Τα επιταχυνσιόμετρα πιεζοαντίστασης είναι πολύ πιο ακριβά από τα χωρητικά επιταχυνσιόμετρα MEMS, επομένως δεν χρησιμοποιούνται γενικά για δοκιμές χαμηλότερης συχνότητας και πλάτους. [8]



Εικόνα 2.7 Εσωτερικό επιταχυνσιόμετρο πιεζοαντίστασης [19]

2.6 Κριτήρια επιλογής επιταχυνσιόμετρου.

Καθένα από τα παραπάνω είδη επιταχυνσιόμετρου έχει τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς του. Σημαντικό ρόλο πριν την επιλογή του αισθητηρίου παίζει η κατανόηση των βασικών διαφορών που έχουνε μεταξύ τους τα διαφορετικά είδη και των απαιτήσεων της εφαρμογής.

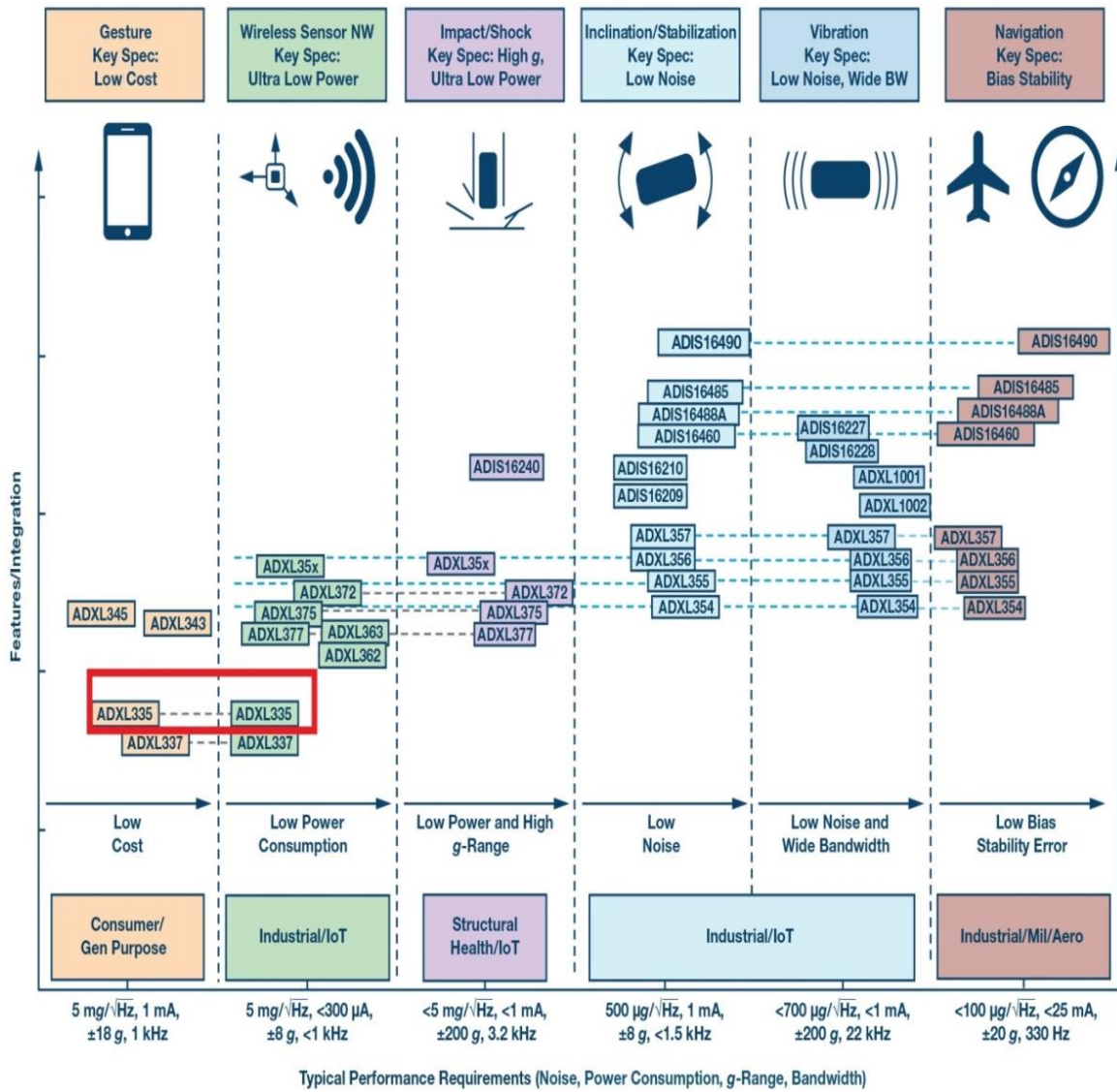
Πρώτων για μετρήσεις στατικών ή πολύ χαμηλών συχνοτήτων ή σε περίπτωση που χρειάζονται πληροφορίες όπως η ταχύτητα ή ο ρυθμός μετατόπισης επιλέγουμε μόνο αισθητήρες απόκρισης DC. Για την μέτρηση δυναμικών γεγονότων μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ένα επιταχυνσιόμετρο DC είτε ένα AC. Όταν μας χρειάζεται μόνο η δυναμική μέτρηση, η επιλογή μεταξύ DC ή AC είναι πραγματικά θέμα προτίμησης.

Περίληπτικά, το πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο είναι ο πιο ανθεκτικός τύπος λόγω της απλής κατασκευής και των ανθεκτικών ιδιοτήτων υλικού. Για δυναμικές μετρήσεις σε υψηλές θερμοκρασίες (>150°C), το πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο είναι η προφανής επιλογή ή, στις περισσότερες περιπτώσεις, η μόνη επιλογή. Με αυτού του τύπου το αισθητήριο πρέπει να χρησιμοποιείται ένα ομοαξονικό καλώδιο χαμηλού θορύβου λόγω της υψηλής σύνθετης αντίστασης του, και ένας ενισχυτή φορτίου. Το πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο με έξοδο τάσης είναι ο πιο δημοφιλής τύπος επιταχυνσιόμετρου για δυναμικές μετρήσεις. Προσφέρει μικρό μέγεθος, μεγάλο εύρος ζώνης και ενσωματωμένο μετατροπέα φορτίου. Τα πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές μέτρησης δονήσεων. Για το λόγο αυτό τα συναντάμε συχνά σε βιομηχανικές εφαρμογές για διαγνωστικό έλεγχο μηχανημάτων και οργάνων.

Τα χωρητικά επιταχυνσιόμετρα έχουν αρκετά μικρή περιοχή μέτρησης συχνοτήτων. Η χαμηλού κόστους κατηγορία SMD των συσκευών αυτών είναι κατάλληλη για χρήση σε αυτοκίνητα και εφαρμογές της αγοράς όπου η ακρίβεια δεν αποτελεί προτεραιότητα. Τα πιο ακριβά αισθητήρια τα χωρητικά επιταχυνσιόμετρα πυριτίου MEMS έχουν καλή σταθερότητα, πολύ χαμηλό θόρυβο, χαμηλή ισχύ σύνθετης αντίστασης και έξοδο πλήρους κλίμακας από $\pm 2V$ έως $\pm 5V$. Τα περισσότερα απαιτούν ρυθμιζόμενη τάση DC. Χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε κινητά, φορητό εξοπλισμό, καθώς και στα ευρέως καταναλωτικά ηλεκτρονικά λόγω του μικρού κόστους και μεγέθους τους.

Τα επιταχυνσιόμετρα πιεζοαντίστασης (piezoresistive) μπορούν να χειριστούν τη στατική επιτάχυνση και να παράγουν ακριβή δεδομένα ταχύτητας και μετατόπισης. Το μεγάλο εύρος ζώνης καλύπτει επίσης τις ανάγκες μέτρησης δυναμικών μετρήσεων. Τα αισθητήρια αυτού του τύπου προσφέρουν διάφορους βαθμούς απόσβεσης (από $\zeta = 0,1$ έως $0,8$) απόκριση που τα καθιστά κατάλληλο για χρήση

σε ποικίλες συνθήκες, συμπεριλαμβανομένων δοκιμών καταπόνησης. Τα επιταχυνσιόμετρα πιεζοαντίστασης είναι μακράν ο καλύτερος τύπος για μετρήσεις παλμών/κρούσεων όπου το εύρος συχνοτήτων και το πλάτος είναι συνήθως υψηλά. Παραδείγματα περιλαμβάνουν δοκιμές σύγκρουσης αυτοκινήτων και δοκιμές όπλων. Παρακάτω παραθέτετε μία εικόνα με διάφορα μοντέλα επιταχυνσιομέτρων τα χαρακτηριστικά τους και σε ποιον τομέα χρησιμοποιούνται. Μέσα στο κόκκινο πλαίσιο επισημαίνεται το αισθητήριο που έχει χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία. [7]



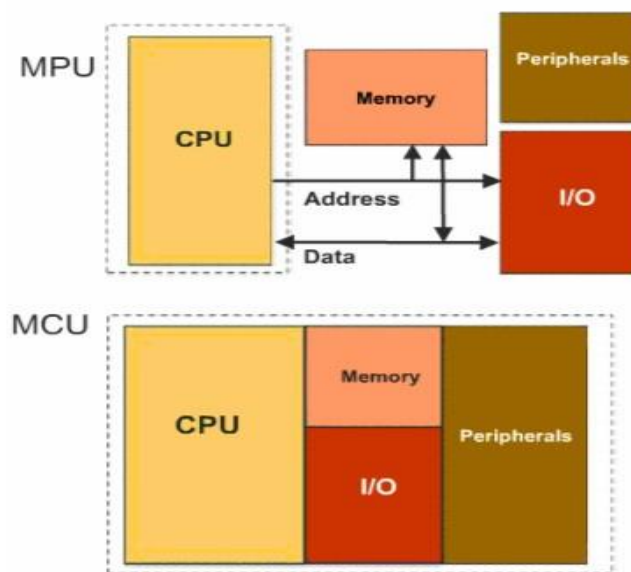
Εικόνα 2.8 Διάφοροι τύποι επιταχυνσιομέτρων και που χρησιμοποιούνται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους όπως θόρυβος, κατανάλωση ενέργειας, εύρος κλίμακας g, εύρος ζώνης συχνοτήτων. [20]

2.7 Μικροελεγκτές

Ο μικροελεγκτής είναι μια συσκευή ολοκληρωμένου κυκλώματος (IC) που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο τμημάτων ενός ηλεκτρονικού συστήματος, συνήθως μέσω μιας μονάδας μικροεπεξεργαστή (MPU), μίας μνήμης και ορισμένων περιφερειακών. Οι μικροελεγκτές έχουν βελτιστοποιηθεί για να λειτουργούν σε ενσωματωμένες εφαρμογές που απαιτούν τόσο λειτουργίες επεξεργασίας όσο και ανταποκρινόμενη αλληλεπίδραση με ψηφιακά, αναλογικά ή ηλεκτρομηχανικά εξαρτήματα. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος αναφοράς σε αυτήν την κατηγορία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων είναι ο όρος "μικροελεγκτής".

2.7.1 Διαφορές μικροελεγκτή – μικροεπεξεργαστή

Μερικές φορές οι χρήστες χρησιμοποιούν τον όρο "μικροεπεξεργαστής" ή "MPU" όταν αναφέρονται σε έναν μικροελεγκτή, αλλά αυτές οι δύο συσκευές δεν το ίδιο. Τόσο οι μικροεπεξεργαστές όσο και οι μικροελεγκτές λειτουργούν ως ολοκληρωμένα συστήματα υπολογιστών μικρού μεγέθους, αλλά εξυπηρετούν διαφορετικούς σκοπούς. Ο όρος "επεξεργαστής" χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό ενός συστήματος που αποτελείται από μια κεντρική μονάδα επεξεργασίας χωρίς να έχει κάποια μνήμη όπως RAM ή ROM, αυτές συνδέονται εξωτερικά εάν χρειαστούν. Από την άλλη ένας μικροελεγκτής δίνει μεγαλύτερη έμφαση στις πρόσθετες μονάδες υλικού που επιτρέπουν στη συσκευή να ελέγχει ένα σύστημα αντί απλώς να εκτελεί οδηγίες και να αποθηκεύει δεδομένα, καθώς εκτός από την CPU περιλαμβάνει μνήμες (πτητικές και μη πτητικές), θύρες εισόδου εξόδου, μετατροπείς ADC και timers όλα ενσωματωμένα σε ένα και μόνο chip. Στο παρακάτω μπλογκ διάγραμμα φαίνονται οι διαφορές ανάμεσα στα δύο συστήματα.



Εικόνα 2.9 Block διάγραμμα μικροεπεξεργαστή (επάνω). Block διάγραμμα μικροελεγκτή (κάτω) [21]

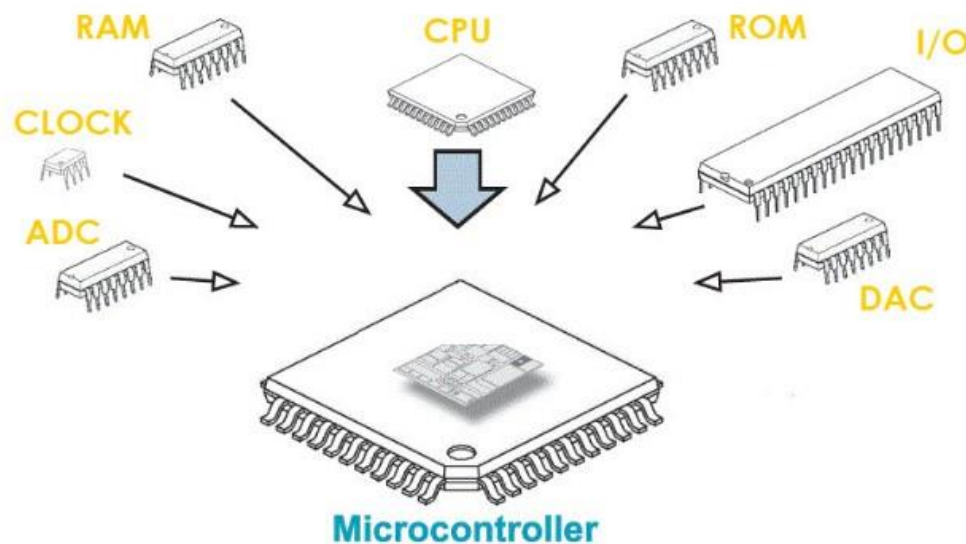
Ο μικροελεγκτής είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε να εκτελεί συγκεκριμένες διεργασίες. Είναι ένα ηλεκτρονικό εξάρτημα το οποίο συναντάται σε πολλές ηλεκτρονικές συσκευές, όπως ψυγεία και τηλέφωνα καθώς χρησιμοποιείται για να εκτελεί κάθε φορά συγκεκριμένες εντολές οι οποίες είναι καταχωρημένες στην μόνιμη μνήμη του. Αντίθετα ένας μικροεπεξεργαστής χρησιμοποιείται για πιο

αόριστες εργασίες που χρειάζονται περισσότερη υπολογιστική δύναμη, γι' αυτό και τους συναντάμε σε smartphones και υπολογιστές.

Ένας μικροελεγκτής είναι ένα προγραμματιζόμενο σύστημα, σχεδιασμένο σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα. Ένας μικροελεγκτής περιέχει μια κεντρική μονάδα επεξεργασίας, κυκλώματα μνήμης, έναν αριθμό καταχωρητών και κυκλώματα ελέγχου περιφερειακών εξαρτημάτων. Έτσι κάθε μικροελεγκτής έχει την ικανότητα να εκτελέσει πράξεις ανάμεσα σε μεταβλητές, να λάβει και να στείλει σήματα στο εξωτερικό περιβάλλον και να καταχωρήσει τιμές στη μνήμη RAM που διαθέτει. Το πρόγραμμα που εκτελεί ένας μικροελεγκτής αποθηκεύεται μόνιμα στην μνήμη του προγράμματος. [9]

2.7.2 Αρχιτεκτονική δομή των μικροελεγκτών

Η βασική δομή του μικροελεγκτή έχει τα εξής στοιχεία.

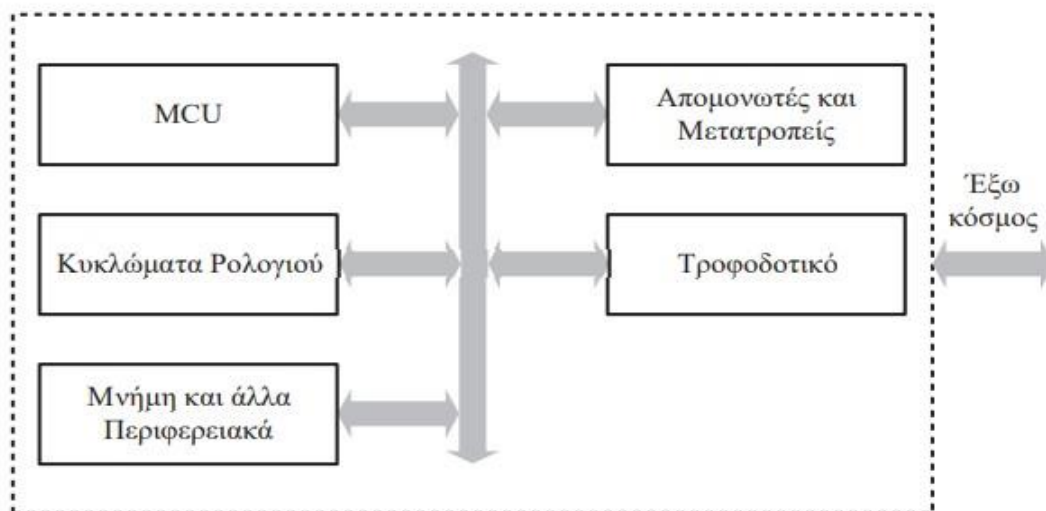


Εικόνα 2.10 Τι υπάρχει στο εσωτερικό ενός μικροελεγκτή. [22]

- CPU: Η κεντρική μονάδα επεξεργασίας του μικροελεγκτή ονομάζεται CPU, που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά και αποκωδικοποίηση των δεδομένων και για την αποτελεσματική εκτέλεση εντολών. Χρησιμοποιώντας μια κεντρική μονάδα επεξεργασίας, όλα τα στοιχεία του μικροελεγκτή συνδέονται σε ένα συγκεκριμένο σύστημα. Οι οδηγίες που λαμβάνονται μέσω της προγραμματιζόμενης μνήμης μπορούν να αποκωδικοποιηθούν μέσω της CPU. Οι λειτουργίες της CPU αναλύονται παρακάτω διεξοδικότερα.
- Μνήμη: Σε έναν μικροελεγκτή η μνήμη αποθηκεύει όλα τα δεδομένα καθώς και προγράμματα. Οι μικροελεγκτές έχουν σχεδιαστεί με κάποια ποσότητα μνήμης RAM, μνήμης ROM είτε μνήμης flash για να αποθηκεύουν τον πηγαίο κώδικα του προγράμματος. Τα διαφορετικά είδη μνήμης του μικροελεγκτή αναλύονται περαιτέρω παρακάτω.
- Θύρες εισόδου/εξόδου I/O: Αυτές οι θύρες χρησιμοποιούνται για την διασύνδεση διαφορετικών εξαρτημάτων όπως LCD και αισθητήρια
- Σειριακές θύρες: Οι σειριακές θύρες χρησιμοποιούνται για την παροχή σειριακών διεπαφών μεταξύ μικροελεγκτή, καθώς και μια ποικιλία άλλων περιφερειακών, όπως η παράλληλη θύρα.

- Timers: Ένας μικροελεγκτής περιλαμβάνει timers, ή διαφορετικά μετρητές. Αυτοί χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση όλων των λειτουργιών χρονισμού και καταμέτρησης σε έναν μικροελεγκτή. Η κύρια λειτουργία του μετρητή είναι να μετράει εξωτερικούς παλμούς, ενώ οι λειτουργίες που εκτελούνται μέσω του χρονοδιακόπτη είναι συναρτήσεις ρολογιού, γεννήτρια παλμών, διαμορφώσεις, μέτρηση συχνότητας και ταλαντώσεις.
- ADC: Η κύρια λειτουργία του ADC είναι να αλλάζει τα σήματα από αναλογικό σε ψηφιακό. Για το ADC, τα απαιτούμενα σήματα εισόδου είναι αναλογικά και η παραγωγή ενός ψηφιακού σήματος χρησιμοποιείται σε διάφορες ψηφιακές εφαρμογές, όπως συσκευές μέτρησης. Ο μετατροπέας ADC περιγράφεται πολύ αναλυτικά παρακάτω.
- DAC: Η κύρια λειτουργία του DAC είναι η μετατροπή ψηφιακού σήματος σε αναλογικό και χρησιμοποιείται για την εκτέλεση αντιστρεπτικών λειτουργιών του ADC. Γενικά, αυτή η συσκευή χρησιμοποιείται για τη διαχείριση αναλογικών συσκευών, όπως κινητήρες DC. [10]

Στη παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το block διάγραμμα των βαθμίδων ενός μικροελεγκτή. Το διάγραμμα αυτό συμπεριλαμβάνει έναν μικροελεγκτή (MCU) και περιφερειακά κυκλώματα υποστήριξης.

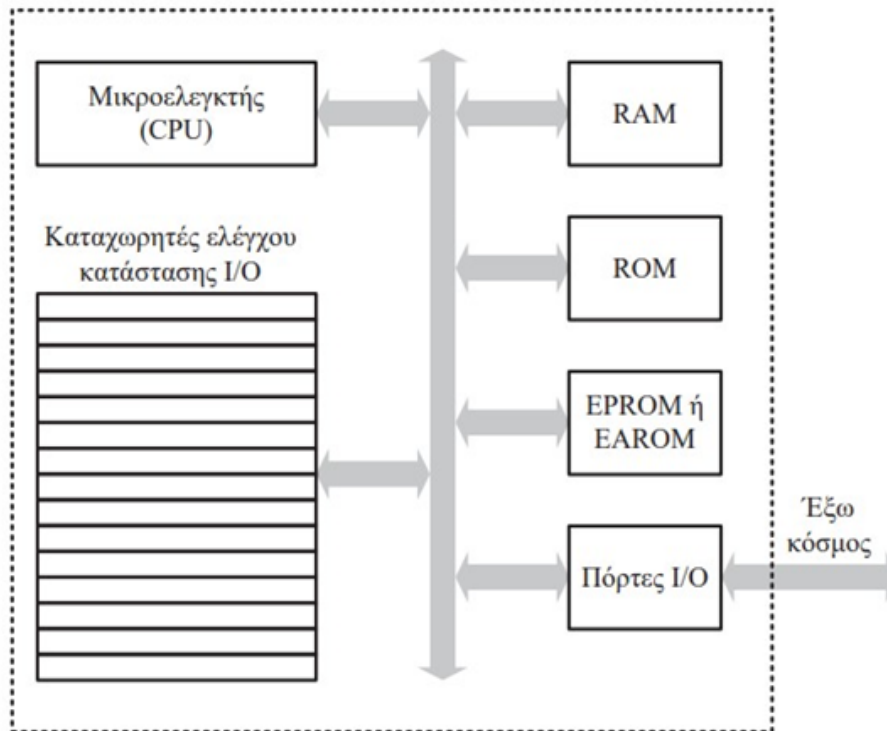


Εικόνα 2.11 Block διάγραμμα μικροελεγκτή [11]

Η μονάδα του μικροελεγκτή (MCU) εσωτερικά αποτελείται από τρία κύρια μέρη τα οποία συνδέει μεταξύ τους ένας εσωτερικός διάδρομος. Τα τρία κύρια μέρη είναι τα εξής:

- Η μονάδα κεντρικής επεξεργασίας (CPU).
- Η μνήμη (πτητική και μη πτητική).
- Διάφοροι καταχωρητές.

Η μονάδα του μικροελεγκτή έχει εξωτερικά ακίδες για τροφοδοσία και εισόδους/εξόδους (I/O). Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το block διάγραμμα της MCU.



Εικόνα 2.12 Block διάγραμμα της MCU [11]

Η μονάδα κεντρικής επεξεργασίας (CPU) ελέγχει τη λειτουργία του μικροελεγκτή. Απαρτίζεται από την αριθμητική/λογική μονάδα, τον ελεγκτή ακολουθίας και εσωτερικούς καταχωρητές, όπως ο αποκωδικοποιητής εντολών, ο καταχωρητής εντολών, ο μετρητής προγράμματος, ο καταχωρητής κατάστασης, ο συσσωρευτής, ο δείκτης σωρού (Stack Pointer) και οι καταχωρητές γενικού σκοπού. Εκτός από αυτούς τους καταχωρητές οι οποίοι υπάρχουν σε κάθε επεξεργαστή, ανάλογα τον μικροελεγκτή μπορεί να υπάρχουν και άλλοι καταχωρητές.

Η αριθμητική/λογική μονάδα δίνει τη δυνατότητα στον επεξεργαστή να πραγματοποιεί αριθμητικές και λογικές πράξεις. Μια τέτοια μονάδα μπορεί να κάνει αριθμητικές προσθέσεις και αφαιρέσεις. Κάποιες, πιο εξελιγμένες μπορούν επιπλέον να κάνουν πολλαπλασιασμό και διαίρεση. Στην πρώτη περίπτωση όπου η μονάδα δεν έχει την δυνατότητα για πολλαπλασιασμό και διαίρεση οι πράξεις αυτές γίνονται με διαδοχικές προσθέσεις ή αφαιρέσεις υπό τον έλεγχο ακολουθίας που καθορίζεται από μια υπορουτίνα. Κυκλώματα αποτελούμενα από λογικές πύλες όπως AND, OR και NOT δίνουν τη δυνατότητα στον επεξεργαστή να παίρνει λογικές αποφάσεις και να κάνει πράξεις. Τα δεδομένα που λαμβάνει η λογική μονάδα αποθηκεύονται προσωρινά σε καταχωρητές που βρίσκονται μέσα σε αυτή.

Ο ελεγκτής ακολουθίας είναι διαφορετικός σε κάθε μικροελεγκτή. Οι λειτουργίες του είναι οι παρακάτω.

- Παράγει του παλμούς για τον χρονισμό των διάφορων μονάδων του μικροελεγκτή.

Κεφάλαιο 2

- Ανακαλεί εντολές του προγράμματος που προέρχονται από την μνήμη, έπειτα τις αποκωδικοποιεί και τέλος παράγει τα σήματα που χρειάζονται για την εκτέλεση των εντολών.
- Κατευθύνει την αριθμητική/λογική μονάδα έτσι ώστε να εκτελέσει τις αριθμητικές και λογικές πράξεις. Κάνει έλεγχο στις πόρτες εισόδου εξόδου κατά την εισαγωγή και εξαγωγή πληροφοριών και καθορίζει τη ροή των πληροφοριών μεταξύ της μνήμης, των περιφερειακών μονάδων και της αριθμητικής/λογικής μονάδας.
- Πριν και μετά από κάθε λειτουργία λαμβάνει και στέλνει σήματα στις μονάδες που αφορά αυτή η λειτουργία.

Στο εσωτερικό του μικροεπεξεργαστή υπάρχουν διάφοροι καταχωρητές. Κάποιοι από αυτούς είναι ο καταχωρητής κατάστασης SR (Status Register), ο μετρητής προγράμματος PC (Program Counter) και ο δείκτης σωρού (Stack Pointer)

Ο συσσωρευτής (Accumulator) είναι ένας καταχωρητής ο οποίος έχει το ίδιο μέγεθος με την χωρητικότητα του μικροεπεξεργαστή (8 bit, 16 bit, 32 bit, 64bit...) και χρησιμοποιείται για όλες τις αριθμητικές και λογικές πράξεις. Εάν ο συσσωρευτής δεν είναι παρών, το αποτέλεσμα κάθε υπολογισμού πρέπει να αποθηκευτεί στην κύρια μνήμη. Η πρόσβαση στην κύρια μνήμη είναι πιο αργή από την πρόσβαση σε έναν καταχωρητή όπως ο συσσωρευτής. Ο συσσωρευτής μπορεί ακόμη να χρησιμοποιηθεί και για την προσωρινή αποθήκευση δεδομένων τα οποία πρόκειται να σταλούν σε μία μονάδα εξόδου ή στην μνήμη.

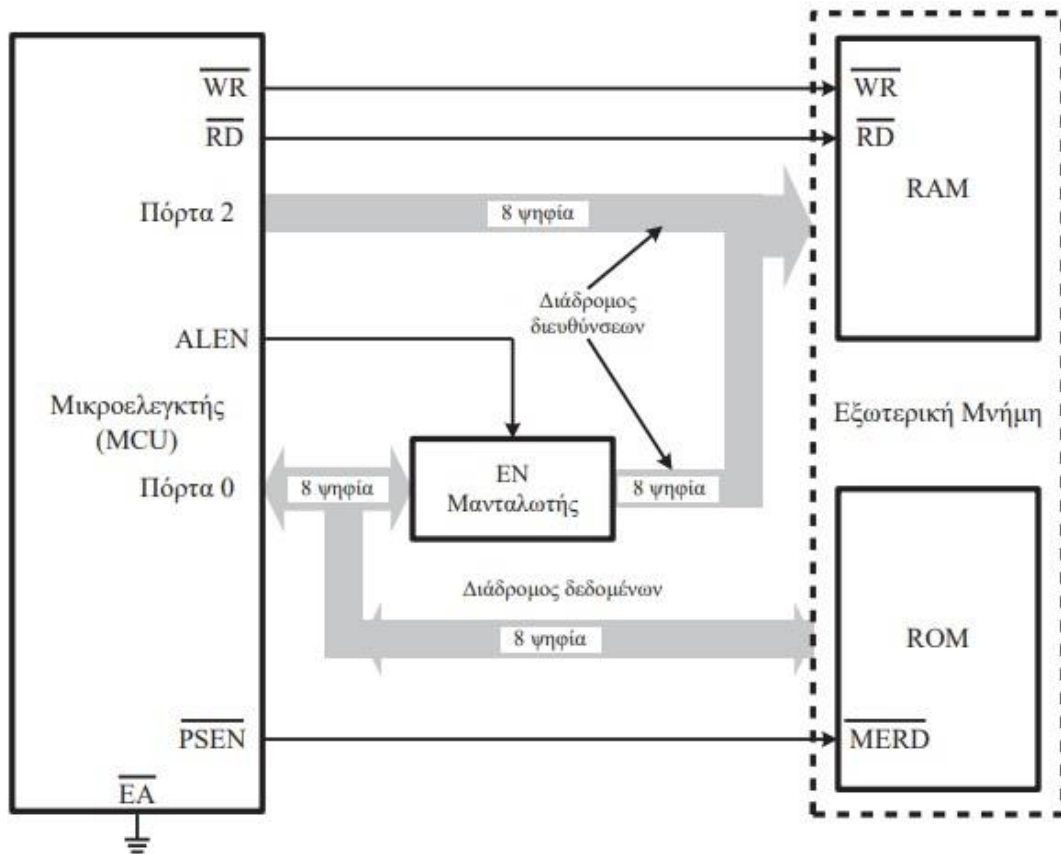
Σε περίπτωση που ο μικροεπεξεργαστής δεν διαθέτει συσσωρευτή, το ρόλο του παίρνουν οι καταχωρητές γενικού σκοπού GPR (general purpose registers) οι οποίοι είναι καταχωρητές που χρησιμοποιούνται για προσωρινή αποθήκευση πληροφοριών.

Οι καταχωρητές χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση εξειδικευμένης πληροφορίας και χωρίζονται στους καταχωρητές εισόδου/εξόδου (I/O) και τους καταχωρητές της CPU. Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες καταχωρητών I/O, οι καταχωρητές ελέγχου, οι καταχωρητές δεδομένων και οι καταχωρητές κατάστασης. Αυτοί οι καταχωρητές, μαζί με τη CPU και τις πόρτες εισόδου/εξόδου χρησιμοποιούνται για λειτουργίες εισόδου/εξόδου I/O. Κάθε καταχωρητής δεδομένων εισόδου/εξόδου, συνδέεται με την αντίστοιχη πόρτα I/O, που είναι μία ομάδα ακίδων η οποία αναπαριστά ένα μπλοκ δεδομένων και συνήθως έχει 8 γραμμές για την μεταφορά πληροφοριών ενός byte.

Οι καταχωρητές ελέγχου και κατάστασης χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και την εποπτεία των διεργασιών εισόδου/εξόδου του μικροελεγκτή. Οι μικροελεγκτές έχουν εσωτερικούς χρονιστές και καθένας από αυτούς, ανάλογα εάν είναι '1' ή '0' τοποθετεί και επανατοποθετεί ψηφία κατάστασης στον αντίστοιχο καταχωρητή κατάστασης

Εκτός από τις ακίδες οι οποίες είναι για τις πόρτες εισόδου/εξόδου υπάρχουν ακίδες τροφοδοσίας. Τέτοιες ακίδες είναι η ακίδα RESET, η οποία όταν ενεργοποιηθεί θέτει τον μικροελεγκτή στην αρχική του κατάσταση και άλλες ακίδες οι οποίες είναι διάφορες γραμμές ελέγχου και διαφέρουν σε κάθε μικροελεγκτή.

Στην περίπτωση όπου ένας μικροελεγκτής χρειαστεί περισσότερη μνήμη ή περισσότερες πόρτες εισόδου/εξόδου από αυτές που διαθέτει το ολοκληρωμένο, θα χρειαστούν κάποιες συνδέσεις με εξωτερικές γραμμές. Αυτές οι συνδέσεις γίνονται μέσω κάποιων πορτών οι οποίες επιλέγονται να χρησιμοποιηθούν ως εξωτερικές πηγές δεδομένων. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η συνδεσμολογία αυτής της περίπτωσης. [11]



Εικόνα 2.13 Σύνδεση μικροελεγκτή με εξωτερική μνήμη. [11]

Η μνήμη είναι το μέρος όπου αποθηκεύονται τα δεδομένα και τα προγράμματα, μπορεί να είναι μνήμη RAM, μνήμη ROM μνήμη Flash και μνήμη EEPROM.

- RAM: Η μνήμη RAM μπορεί και να διαβαστεί και να γραφτεί. Υπάρχουν δύο τύποι της RAM, στατική RAM και δυναμική RAM. Οι πληροφορίες που αποθηκεύονται στη στατική μνήμη RAM διατηρούνται όσο τροφοδοτείται η μνήμη. Η δυναμική μνήμη RAM πρέπει να ανανεώνεται περιοδικά για να διατηρείται αποθηκευμένη η πληροφορία. Η δυναμική μνήμη RAM χρησιμοποιείται ευρέως στους υπολογιστές αλλά όχι σε μικροελεγκτές
- ROM: Στους μικροελεγκτές που χρησιμοποιούν μνήμη ROM, οι πληροφορίες γράφονται κατά τη διαδικασία του προγραμματισμού του μικροελεγκτή κατασκευής και δεν αλλάζουν αργότερα. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητο να διασφαλιστεί ότι ο κώδικας προγράμματος και οι σταθερές τιμές δεδομένων είναι σωστές πριν από τη δημιουργία της κατασκευής. Σε μικροελεγκτές PIC η ένδειξη "CR" υποδεικνύει ότι η μνήμη του προγράμματος χρησιμοποιεί μνήμη ROM, για παράδειγμα, PIC16CR65 και PIC16CR72.
- EPROM και OTP: Οι μνήμες EPROM και OTP είναι πολύ παρόμοιες. Διαφέρουν μόνο στη συσκευασία τους. Η συσκευασία της μνήμης EPROM διαθέτει γυάλινο παράθυρο που επιτρέπει την υπεριώδη ακτινοβολία να περάσει και να διαγράψει τα δεδομένα. Οι συσκευές OTP χρησιμοποιούν την ίδια εσωτερική μνήμη χωρίς το γυάλινο παράθυρο. Επομένως, μόλις ο χρήστης την προγραμματίσει τα δεδομένα της δεν μπορούν να τροποποιηθούν ή να διαγραφούν. Σε μικροελεγκτές PIC, η ένδειξη "C" υποδεικνύει ότι χρησιμοποιούν μνήμη EPROM ή OTP, για παράδειγμα, ο PIC16C74B/JW είναι μια συσκευή EPROM, το επίθημα JW υποδεικνύει την ύπαρξη του γυάλινου παραθύρου για τη διαγραφή του περιεχομένου του.
- EEPROM: Η μνήμη EEPROM είναι μη πτητική μνήμη που μπορεί να διαβαστεί και να γραφτεί. Τα δεδομένα δεν χρειάζεται να διαγραφούν προηγουμένως από τις θέσεις μνήμης για να αποθηκευτούν οι νέες πληροφορίες σε αυτήν. Ο αριθμός των φορών που μπορεί η μνήμη EEPROM να γραφτεί είναι πεπερασμένος, αν και ο αριθμός αυτός είναι πολύ μεγάλος, συνήθως κάποια εκατομμύρια.

- Flash: Οι πληροφορίες στη μνήμη flash μπορούν να διαβαστούν και να γραφτούν σε μεμονωμένα κελιά. Ωστόσο, τα υπάρχοντα δεδομένα πρέπει να διαγραφούν πριν γραφτούν τα νέα δεδομένα σε ένα κελί. Η διαγραφή αυτή γίνεται σε ομάδες κελιών, και όχι σε μεμονωμένα κελιά και αυτή είναι η κύρια διαφορά της μνήμης flash σε σχέση την μνήμη EEPROM. Όταν τα δεδομένα διαγράφονται τα bits των κελιών ορίζονται '0'. Όταν τα δεδομένα γράφονται στην μνήμη τα bits των κελιών ορίζονται '1'. Υπάρχει η δυνατότητα ένα bit που είναι '0' να γίνει '1' ενώ για να αλλάξει ένα bit από '1' σε '0' πρέπει να διαγραφεί όλη η ομάδα κελιού του συγκεκριμένου bit. Η μνήμη flash μπορεί να γραφτεί και να διαγραφεί ένα πεπερασμένο αριθμό φορών, αν και ο αριθμός αυτός είναι πολύ μεγάλος, της τάξης των εκατομμυρίων. Η ένδειξη "F" σε συσκευές PIC υποδεικνύει ότι χρησιμοποιούν μνήμη flash, για παράδειγμα, PIC18F4550. [12]

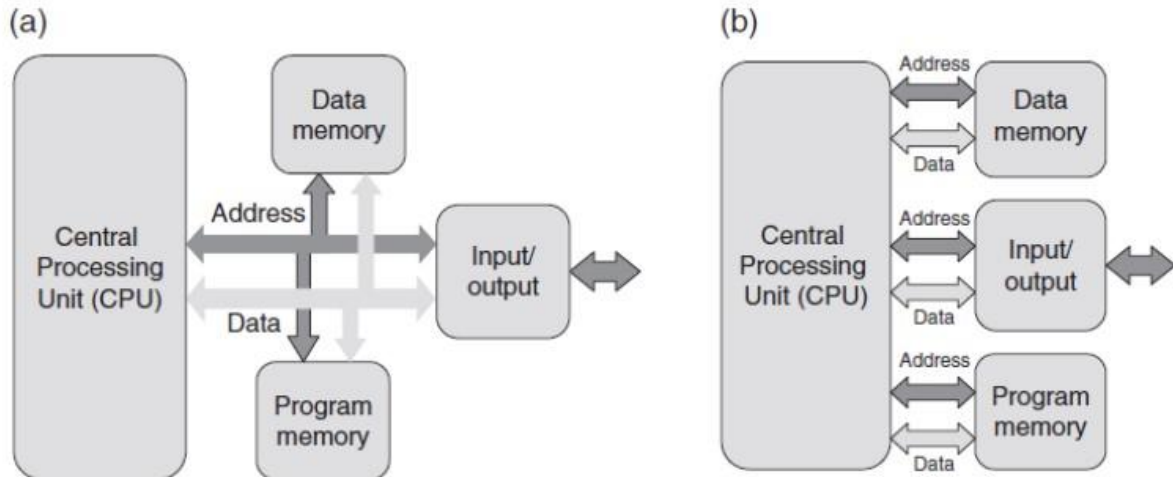
2.7.3 Αρχιτεκτονική Von Neumann και Αρχιτεκτονική Harvard

Η μνήμη ενός μικροελεγκτή αποθηκεύει τόσο δεδομένα όσο και οδηγίες. Οι οδηγίες πρέπει να προχωρούν διαδοχικά στη CPU έτσι ώστε να αποκωδικοποιηθούν και να εκτελεστούν. Η CPU μπορεί να διαβάσει τα δεδομένα από την μνήμη, ή να γράψει δεδομένα στην μνήμη. Ως εκ τούτου, ο τρόπος που η μνήμη είναι οργανωμένη και ο τρόπος που επικοινωνεί με την CPU καθορίζει την απόδοση της συσκευής. Τα δύο μοντέλα οργάνωσης της μνήμης ονομάζονται αρχιτεκτονικές Von Neumann και Harvard.

Η αρχιτεκτονική von Neumann χρησιμοποιεί μία μόνο μνήμη για την αποθήκευση οδηγιών και δεδομένων. Αυτό σημαίνει πως ένας και μοναδικός δίαυλος διευθύνσεων μπορεί να έχει πρόσβαση στις οδηγίες και τα δεδομένα του προγράμματος. Επίσης, ένας και μοναδικός δίαυλος δεδομένων μπορεί να μεταδώσει εντολές και δεδομένα προγράμματος. Η CPU στέλνει το ίδιο σήμα ελέγχου για ανάγνωση δεδομένων ή για ανάγνωση μιας οδηγίας. Δεν υπάρχουν ανεξάρτητα σήματα ελέγχου δεδομένων ή εντολών. Αν και η μνήμη ROM χρησιμοποιείται για την αποθήκευση εντολών και η μνήμη RAM χρησιμοποιείται για αποθήκευση δεδομένων, η CPU δεν κάνει αυτή την διάκριση και τις αντιμετωπίζει με τον ίδιο τρόπο. Από σκοπιά της CPU, τόσο η μνήμη ROM όσο και η μνήμη RAM αποτελούν μια ενιαία μνήμη μπλοκ στο οποίο η CPU στέλνει σήματα ελέγχου και δεδομένα.

Η αρχιτεκτονική Harvard χρησιμοποιεί διαφορετικές μνήμες για την αποθήκευση εντολών και δεδομένων. Η μνήμη του προγράμματος έχει το δικό της δίαυλο διευθύνσεων (instruction address bus), το δικό της δίαυλο δεδομένων και το δικό της δίαυλο ελέγχου. Η μνήμη δεδομένων αντίστοιχα έχει το δικό της δίαυλο διευθύνσεων, δίαυλο δεδομένων και δίαυλο ελέγχου. Η μνήμη του προγράμματος μπορεί μόνο να διαβαστεί ενώ η μνήμη δεδομένων μπορεί και να διαβαστεί και να γραφτεί.

Η αρχιτεκτονική von Neumann χρησιμοποιεί λιγότερες γραμμές από την αρχιτεκτονική Harvard, κάνοντας έτσι μια πολύ απλούστερη σύνδεση μεταξύ της CPU και της μνήμης. Ωστόσο, αυτού του είδους η αρχιτεκτονική δεν επιτρέπει ταυτόχρονο χειρισμό δεδομένων και εντολών επειδή υπάρχει μόνο ένας δίαυλος. Αντιθέτως, η αρχιτεκτονική Harvard επιτρέπει τον ταυτόχρονο χειρισμό δεδομένων και εντολών. Αυτό δίνει στην αρχιτεκτονική Harvard το πλεονέκτημα της ταχύτερης εκτέλεσης των προγραμμάτων. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται τα δύο διαφορετικά μοντέλα. [12]



Εικόνα 2.14 Παρουσίαση των δυο τύπων αρχιτεκτονικής a) Ενιαία μνήμη προγράμματος και δεδομένων (αρχιτεκτονική Von-Neumann) b) Ξεχωριστή μνήμη προγράμματος και δεδομένων (αρχιτεκτονική Harvard). [21]

2.7.4 Προγραμματισμός μικροελεγκτή

Αρχικά, οι μικροελεγκτές μπορούσαν να προγραμματιστούν μόνον στην γλώσσα προγραμματισμού assembly. Πλέον, έχουν την δυνατότητα να προγραμματιστούν και σε άλλες γλώσσες προγραμματισμού υψηλότερου επιπέδου, όπως είναι η C και η Python. Οι compilers γενικού σκοπού έχουν συνήθως κάποιους περιορισμούς στην υποστήριξη των μοναδικών χαρακτηριστικών των μικροελεγκτών. Για το λόγο αυτό ορισμένοι μικροελεγκτές διαθέτουν περιβάλλοντα που βοηθούν στην ανάπτυξη εφαρμογών.

Για ορισμένους μικροελεγκτές διατίθενται προσομοιωτές (simulators) που επιτρέπουν στον προγραμματιστή να αναλύσει ποια θα είναι η συμπεριφορά του μικροελεγκτή εάν χρησιμοποιηθεί με το συγκεκριμένο πρόγραμμα. Ένας προσομοιωτής δείχνει την κατάσταση του εσωτερικού επεξεργαστή καθώς και των εξόδων, όπως επίσης μπορεί να παράγει σήματα εισόδου. Οι προσομοιωτές είναι πολύ χρήσιμοι, καθώς μπορούν να προσομοιώσουν συνθήκες που διαφορετικά θα ήταν δύσκολο να αναπαραχθούν κατά βούληση στη φυσική εφαρμογή. Είναι ένας γρήγορος τρόπος εντοπισμού σφαλμάτων και ανάλυσης προβλημάτων.

2.7.5 Πλεονεκτήματα –Μειονεκτήματα Μικροελεγκτών

Τα πλεονεκτήματα χρήσης ενός μικροελεγκτή σε μία εφαρμογή, σε σχέση με την χρήση των στοιχείων που τον συνθέτουν ξεχωριστά είναι τα εξής:

- Μικρό μέγεθος.
- Χαμηλό κόστος.
- Αυτονομία: Πολλοί μικροελεγκτές δεν χρειάζονται επιπλέον ολοκληρωμένα κυκλώματα για την λειτουργία τους καθώς έχουν ενσωματωμένα περιφερειακά συστήματα όπως η μνήμη και οι θύρες επικοινωνίας.
- Χαμηλή κατανάλωση ισχύος: Οι μικροελεγκτές λειτουργούν σε χαμηλές συχνότητες και έτσι η κατανάλωση ισχύος είναι πολύ μικρή, της τάξης των mW ακόμη και μ W. Ακόμη μπορούν να εισέρχονται σε κατάσταση αναμονής (sleep mode).

- Μεγαλύτερος αριθμός διαθέσιμων ακροδεκτών ψηφιακών εισόδων – εξόδων: Επειδή δεν χρειάζεται η σύνδεση εξωτερικών περιφερειακών για το δεδομένο μέγεθος του ολοκληρωμένου κυκλώματος.
- Μικρή ευαισθησία σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές από άλλες ηλεκτρονικές συσκευές και μικρές εκπομπές ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Λόγω των χαμηλών ταχυτήτων λειτουργίας και τον μικρό αριθμό και μήκος διασυνδέσεων.
- Ευκολότερη υλοποίηση εφαρμογών. Οι απλούστερες διασυνδέσεις κάνουν πιο εύκολη και με μεγαλύτερη αξιοπιστία την διαδικασία ανάπτυξης μίας εφαρμογής.

Παρόλα αυτά η χρήση μικροελεγκτών σε εφαρμογές έχει και κάποια μειονεκτήματα τα οποία είναι:

- Ο προγραμματισμός του είναι σχετικά δύσκολος.
- Δεν μπορεί να γίνει αλλαγή του προγράμματος τους.
- Έχει περιορισμένη ισχύ, πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να εκτελέσει μικρό αριθμό διαδικασιών ταυτόχρονα.
- Δεν είναι δυνατή η απευθείας σύνδεση του με συσκευές υψηλής ισχύος. [9]

2.7.6 Κατασκευαστές μικροελεγκτών

Υπάρχουν πολλές εταιρίες που κατασκευάζουν μία μεγάλη ποικιλία μικροελεγκτών. Από μικρούς και φθηνούς μικροελεγκτές που χρησιμοποιούνται σε μικρές εφαρμογές έως και πολύ προηγμένους για πιο απαιτητικές εφαρμογές. Μερικές από τις πιο γνωστές εταιρίες κατασκευής μικροελεγκτών είναι οι παρακάτω. [9]

- ARM
- AnalogDevices
- Atmel
- Epson
- Hitachi
- Intel
- Microchip
- Motorola
- NEC
- Texas Instruments
- Toshiba



Εικόνα 2.15 Διάφοροι τύποι μικροελεγκτών από διαφορετικούς κατασκευαστές. [23]

2.8 ADC

Ο Analog to Digital Converter (ADC) είναι ένα ηλεκτρονικό εξάρτημα ευρείας χρήσης το οποίο μετατρέπει ένα αναλογικό ηλεκτρικό σήμα (συνήθως τάση) σε ψηφιακό. Οι ADC βρίσκονται στο μπροστινό μέρος κάθε ψηφιακού κυκλώματος που χρειάζεται να επεξεργαστεί σήματα που προέρχονται από το εξωτερικό περιβάλλον. Το σύμβολο του ADC είναι το παρακάτω:



Εικόνα 2.16 Σύμβολο ADC.

Η έξοδος ενός επιταχυνσιόμετρου είναι ένα παράδειγμα αναλογικής τιμής που πρέπει να μετατραπεί σε ψηφιακή έτσι ώστε να μπορέσει να επικοινωνήσει με έναν μικροεπεξεργαστή.

2.8.1 Τρόπος μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να μετατραπεί ένα αναλογικό σήμα σε ψηφιακό ο καθένας με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του. Η επιλογή του τύπου ADC για μια δεδομένη εφαρμογή καθορίζεται συνήθως από τις απαιτήσεις που έχει ο χρήστης: ανάλογα με το εάν χρειάζεται ταχύτητα, ακρίβεια ή χώρο, επιλέγει τον αντίστοιχο ADC.

Όλοι οι ADC λειτουργούν βάσει της ίδιας αρχής: πρέπει να μετατρέψουν ένα σήμα σε έναν ορισμένο αριθμό δυαδικών ψηφίων N . Η ακολουθία των δυαδικών ψηφίων αντιπροσωπεύει τον αριθμό και κάθε bit έχει τη διπλάσια σημασία σε σχέση με το επόμενο, ξεκινώντας από το πιο σημαντικό Bit (MSB) μέχρι το ελάχιστο σημαντικό bit (LSB). Με λίγα λόγια, θέλουμε να βρούμε την ακολουθία των bits $b_{N-1}, b_{N-2} \dots b_0$ που αντιπροσωπεύει την αναλογική τιμή V_{in} όπως φαίνεται από την παρακάτω σχέση.

$$V_{in} = \sum_{n=0}^{N-1} b_n 2^{\frac{V_{ref}}{2^n}} \quad (2.10)$$

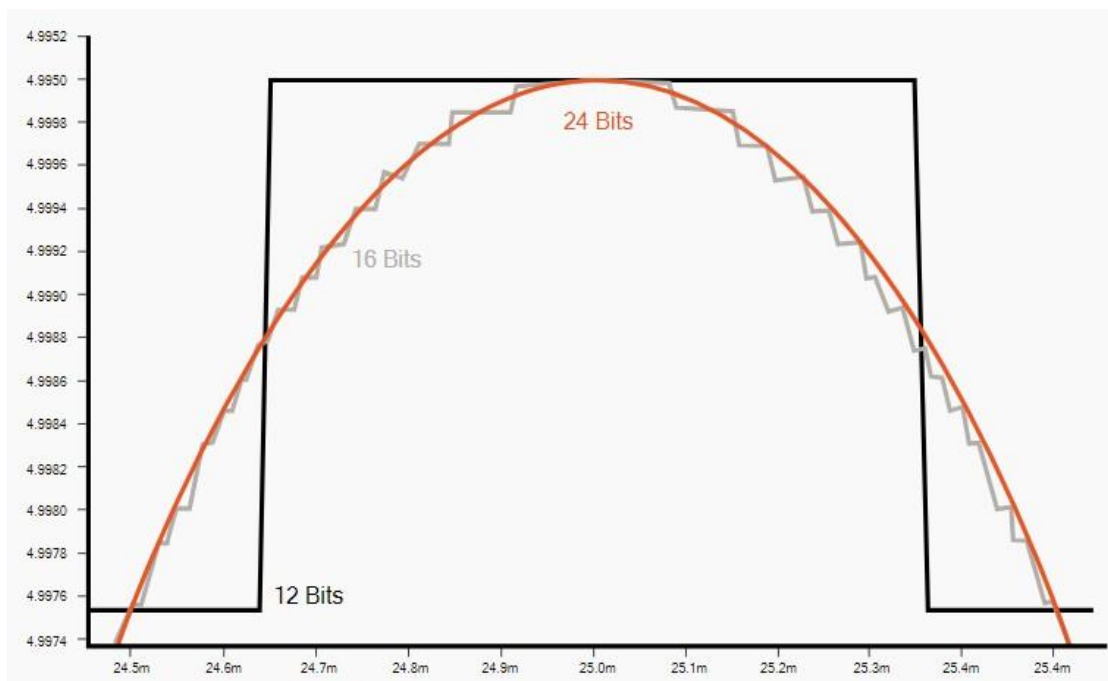
Οι μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC) χρειάζονται είσοδο τάσης αναφοράς (V_{ref}) για να λειτουργήσουν σωστά. Οι ADC μετατρέπουν αναλογικές εισόδους που μπορεί να κυμαίνονται από μηδέν Volt έως και σε μέγιστο επίπεδο τάσης που ονομάζεται τάση αναφοράς. Η τάση αναφοράς καθορίζει το ανώτατο όριο του τι μπορεί να μετατρέψει ο ADC. Επομένως, στην επιλογή τάσης αναφοράς (V_{ref}) το επίπεδο εξόδου τάσης και η αρχική ακρίβεια είναι το πρώτο μέλημα. Το MSB, λοιπόν ισούται με $V_{ref}/2$, το επόμενο με $V_{ref}/4$ κ.λπ. και το LSB ισούται με $V_{ref}/2^N$. Επομένως, όσο περισσότερα bits έχουμε τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια έχουμε στην ψηφιακή αναπαράσταση.[13]

2.8.2 Κύρια χαρακτηριστικά ADC

Τα κύρια χαρακτηριστικά που βοηθούν στην επιλογή ADC είναι τα παρακάτω:

- **Sample Rate:** Η τιμή που ορίζει το πόσο γρήγορα μπορεί ένας ADC να μετατρέψει ένα σήμα από αναλογικό σε ψηφιακό ονομάζεται ρυθμός δειγματοληψίας ή συχνότητα δειγματοληψίας (sample rate). Η επιλογή του εξαρτάται από την εφαρμογή. Για παράδειγμα, κάποια από τα μεγέθη που μετράμε συνήθως είναι τάσεις και ρεύματα εναλλασσόμενου ρεύματος, κραδασμούς, θερμοκρασία, τάση, και πίεση. Αυτά τα σήματα και οι αισθητήρες απαιτούν ρυθμό δειγματοληψίας στην περιοχή DC έως 200.000 δείγματα ανά δευτερόλεπτο (200 kS/s) κατά μέσο όρο, ενώ μερικές εφαρμογές απαιτούν δειγματοληψία έως 1.000.000 δειγμάτων ανά δευτερόλεπτο (1 MS/s). Ο ρυθμός δειγματοληψίας αναφέρεται συνήθως ως ο άξονας μέτρησης T (χρόνος) ή X.
- **Bit resolution:** είναι η τιμή η οποία ορίζει με πόση ακρίβεια μπορεί ένας ADC να μετατρέψει ένα σήμα από αναλογικό σε ψηφιακό. Ενώ ο ρυθμός δειγματοληψίας περιλαμβάνει τον άξονα χρόνου (T ή X) της ροής των ψηφιακών δεδομένων μας, η ανάλυση δυαδικών ψηφίων ή ένας αριθμός δυαδικών ψηφίων περιλαμβάνει τον άξονα του πλάτους (Y).

Οι πρώτοι μετατροπείς ADC ήταν 8-bit. Οι ADC 24-bit είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται πιο συχνά στα συστήματα λήψης δεδομένων που έχουν σχεδιαστεί για να κάνουν δυναμικές μετρήσεις και οι ADC 16-bit θεωρούνται συνήθως η ελάχιστη ανάλυση για σήματα γενικά. Υπάρχουν ορισμένα συστήματα χαμηλού επιπέδου που χρησιμοποιούν ADC 12-bit. Τα συστήματα με 24-bit ADC παρέχουν $2^{24} = 16,777,216$ bits. Έτσι, ένα εισερχόμενο σήμα ενός Volt μπορεί να διαιρεθεί σε περισσότερα από 16 εκατομμύρια κομμάτια στον άξονα y, όπως φαίνεται στο παρακάτω γράφημα.



Εικόνα 2.17 Ανάλυση σήματος 24 bit (πορτοκαλί), ανάλυση σήματος 16 bit (γκρι).

Τα 16,777,216 κομμάτια του ADC 24-bit μπορούν να αναπαραστήσουν πολύ καλύτερα το σήμα από τα μέγιστα θεωρητικά 65,656 κομμάτια ενός ADC 16-bit. Συνεπώς, η εμφάνιση των κυματομορφών έχει πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια. [14]

2.8.3 Τύποι ADC

Υπάρχουν πολλοί τύποι ADC αλλά οι 5 πιο σημαντικοί είναι οι παρακάτω:

- Successive Approximation (SAR) ADC
- Delta-sigma ($\Delta\Sigma$) ADC
- Dual Slope ADC
- Pipelined ADC
- Flash ADC

Στον παρακάτω πίνακα εμφανίζονται τα προτερήματα και τα μειονεκτήματα κάθε τύπου[14].

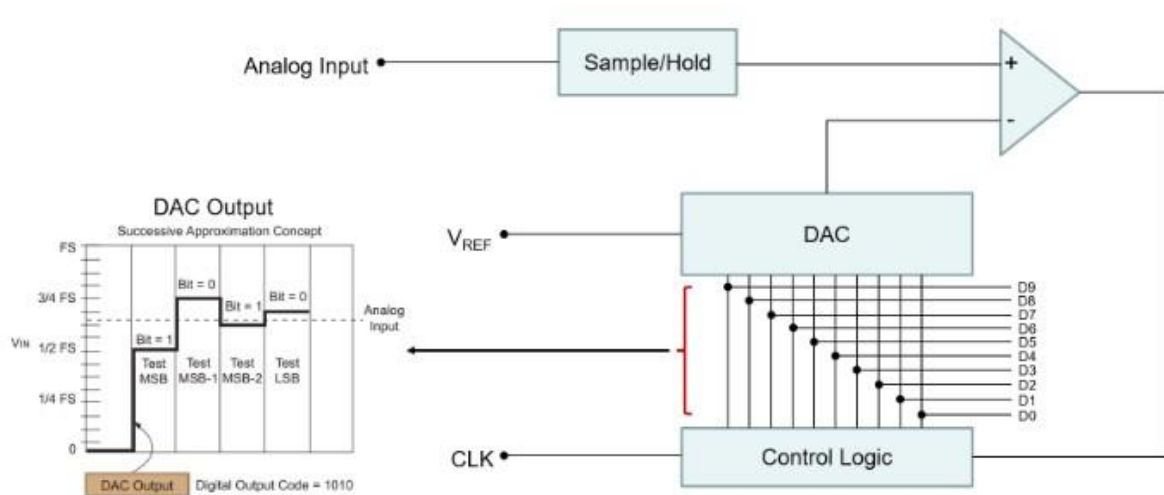
Πίνακας 1 Τύποι ADC και τα χαρακτηριστικά τους.

ADC TYPE	Pros	Cons	Max Resolution	Max Sample Rate	Main Applications
Successive Approximation (SAR)	Καλή αναλογία ταχύτητας/ανάλυσης	Χωρίς ενσωματωμένη προστασία από αλλοιώσεις	18 bits	10 Mhz	Συλλογή δεδομένων
Δέλτα σίγμα($\Delta\Sigma$)	Υψηλή δυναμική απόδοση, ενσωματωμένη προστασία από αλλοιώσεις	Δεν εντοπίζει μη φυσικά σήματα	32 bits	1 Mhz	Συλλογή δεδομένων για εφαρμογές με ήχο ή δόνηση
Dual Slope	Ακριβές, οικονομικό	Αργή ταχύτητα	20 bits	100 Hz	Βολτόμετρα
Pipelined	Γρήγορο	Περιορισμένη ανάλυση	16 bits	1 Gz	Παλμογράφοι
Flash	Το πιο γρήγορο	Χαμηλό bit resolution	12 bits	10 Ghz	Παλμογράφοι

2.8.3.1 Successive Approximation (SAR)

Παρακάτω αναλύεται περαιτέρω ο ADC successive approximation, καθώς τον συγκεκριμένο φέρει ενσωματωμένα ο μικροελεγκτής PIC18F4550 ο οποίος έχει επιλεγθεί για την κατασκευή μας.

Ο συγκεκριμένος ADC προσφέρει εξαιρετική ισορροπία ταχύτητας και ανάλυσης και χειρίζεται μεγάλη ποικιλία σημάτων με πολύ μεγάλη πιστότητα. Ο σχεδιασμός SAR είναι σταθερός και αξιόπιστος και τα chip είναι σχετικά φθηνά. Μπορούν να διαμορφωθούν και για τις περιπτώσεις όπου ένα τσιπ ADC "μοιράζεται" σε πολλά κανάλια εισόδου ή σε διαμορφώσεις όπου κάθε κανάλι εισόδου έχει το δικό του ADC για ταυτόχρονη δειγματοληψία σε πραγματικό χρόνο. Το μπλοκ διάγραμμα του SAR παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2.18 Κύκλωμα Successful Approximation Concept ADC.

Η αναλογική είσοδος των περισσότερων ADC είναι 5V. Ο τυπικός SAR ADC χρησιμοποιεί ένα κύκλωμα δειγματοληψίας και συγκράτησης που λαμβάνει τη ρυθμισμένη αναλογική τάση από το μπροστινό άκρο της ρύθμισης σήματος.

Ένα ενσωματωμένο Digital to Analog converter δημιουργεί μια αναλογική τάση αναφοράς ίση με την έξοδο του ψηφιακού κώδικα του δείγματος που συγκρατεί ένα κύκλωμα. Και τα δύο αυτά τροφοδοτούν έναν συγκριτή ο οποίος στέλνει το αποτέλεσμα της σύγκρισης στον SAR. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται για N διαδοχικούς χρόνους, με το N να είναι η ανάλυση bit του ίδιου του ADC, έως ότου βρεθεί η πλησιέστερη τιμή στο πραγματικό σήμα.

Τα SAR ADC δεν διαθέτουν ενσωματωμένο φίλτρο προστασίας αλλοιώσεων (AAF), οπότε εάν αυτό δεν προστεθεί πριν από το ADC και ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι πολύ χαμηλός ψευδή σήματα θα ψηφιοποιηθούν από το SAR ADC. Κάτι τέτοιο είναι ιδιαίτερα προβληματικό διότι είναι αδύνατο να διορθωθεί αργότερα.

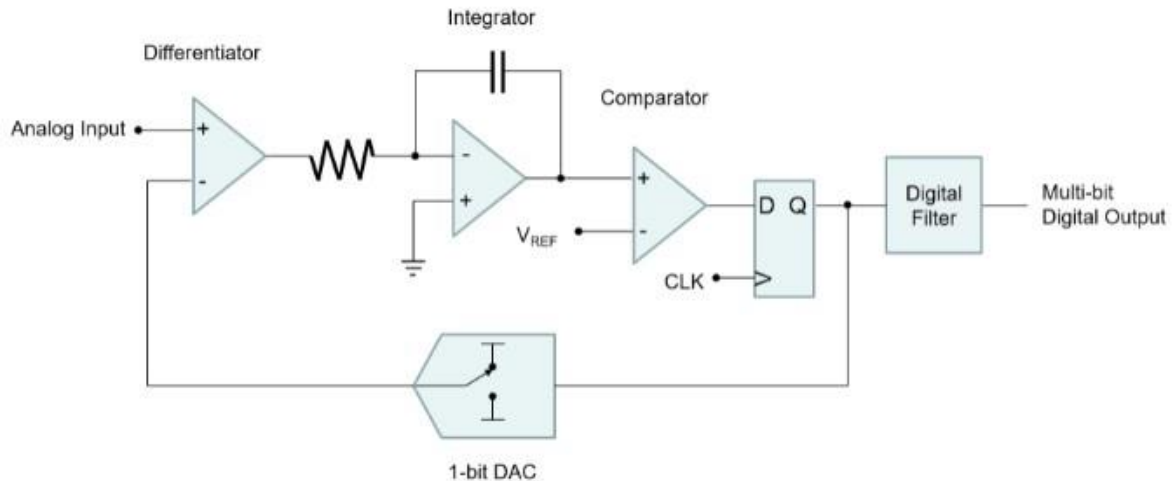
Τα πλεονεκτήματα του SAR είναι πως είναι ένα απλό κύκλωμα το οποίο χρειάζεται μόνο έναν συγκριτή και έχει την δυνατότητα υψηλότερου ρυθμού δειγματοληψίας σε σχέση με τους συγκριτές Δέλτα-Σιγμά..

Τα μειονεκτήματα του SAR είναι πως το φίλτρο κατά της αλλοίωσης πρέπει να προστεθεί εξωτερικά και το bit resolution είναι περιορισμένο σε σύγκριση με τους ADC δέλτα-σίγμα

Οι εφαρμογές που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο SAR ADC περιλαμβάνουν συστήματα DAQ, από συστήματα πολύπλεξης χαμηλού επιπέδου έως συστήματα ADC υψηλότερης ταχύτητας ανά κανάλι, βιομηχανικό έλεγχο και μετρήσεις.

2.8.3.2 Δέλτα-Σίγμα (ΔΣ)

Ένας νεότερος σχεδιασμός ADC είναι ο ADC δέλτα-σίγμα ADC (ή μετατροπέας δέλτα), ο οποίος εκμεταλλεύεται την τεχνολογία DSP (digital signal processor) προκειμένου να βελτιώσει την ανάλυση στον άξονα του πλάτους και να μειώσει τον θόρυβο.



Εικόνα 2.19 Κύκλωμα Δέλτα-σίγμα ADC.

Ο σχεδιασμός των ADC δέλτα-σίγμα τα καθιστά ιδανικά για δυναμικές εφαρμογές που απαιτούν όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ανάλυση στον άξονα του πλάτους. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται συχνά σε υψηλής τεχνολογίας εφαρμογές που έχουν να κάνουν με ήχο, κραδασμούς και σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών λήψης δεδομένων. Χρησιμοποιούνται επίσης εκτενώς σε βιομηχανικές εφαρμογές για μετρήσεις ακριβείας.

Ένα χαμηλοπερατό φίλτρο που εφαρμόζεται σε ένα DSP εξαλείφει ουσιαστικά τον θόρυβο, με αποτέλεσμα την εξαιρετική απόδοση σήματος προς θόρυβο. Οι ADC αυτού του είδους λειτουργούν με υπερ-δειγματοληψία των σημάτων σε πολύ υψηλότερο βαθμό από το επιλεγμένο ποσοστό δείγματος. Στη συνέχεια, το DSP δημιουργεί μια ροή δεδομένων υψηλής ανάλυσης από τα δεδομένα της υπερ-δειγματοληψίας με τον ρυθμό που έχει επιλέξει ο χρήστης. Αυτή η υπερ-δειγματοληψία μπορεί να είναι έως και εκατοντάδες φορές υψηλότερη από το επιλεγμένο ποσοστό δείγματος. Αυτή η προσέγγιση δημιουργεί ένα ρεύμα δεδομένων πολύ υψηλής ανάλυσης (συνήθως 24-bit) και έχει το πλεονέκτημα ότι επιτρέπει το φιλτράρισμα πολλαπλών σταδίων κατά της αλλοίωσης, καθιστώντας ουσιαστικά αδύνατη την ψηφιοποίηση ψευδών σημάτων. Ωστόσο, λόγω αυτής της διαδικασίας οι ADC δέλτα-σίγμα δεν είναι συνήθως τόσο γρήγοροι όσο, για παράδειγμα οι ADC SAR.

Τα πλεονεκτήματα του ADC Δέλτα-Σίγμα είναι η υψηλή έξοδος ανάλυσης (24 bit), μειωμένος θόρυβος και το εγγενές φιλτράρισμα κατά της αλλοίωσης.

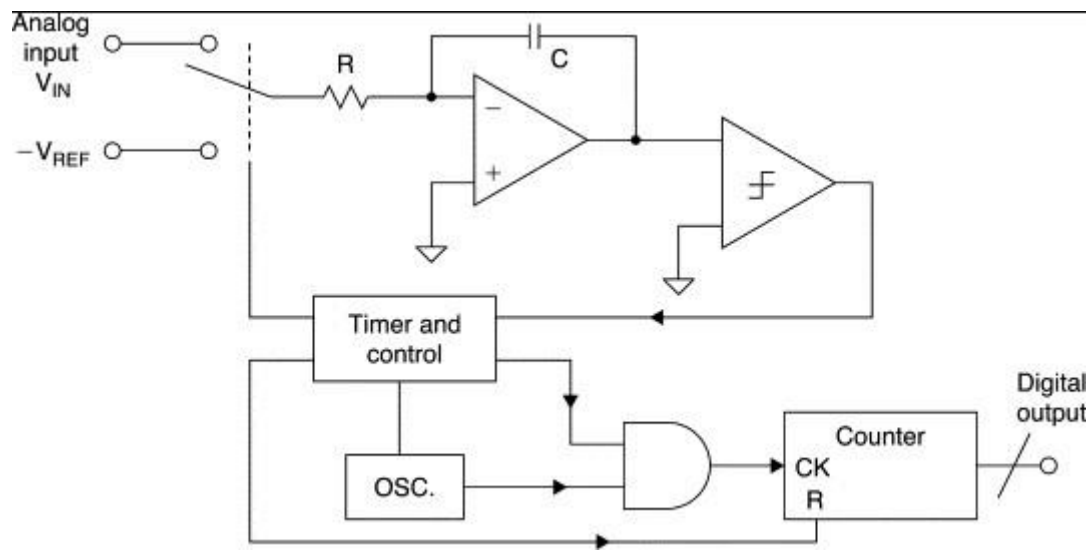
Το μειονέκτημα χρήσης του ADC Δέλτα-Σίγμα είναι ο χαμηλός ρυθμός δείγματος (περίπου 200kS/s)

Οι εφαρμογές που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο ADC Δέλτα-Σίγμα περιλαμβάνουν λήψη δεδομένων, κυρίως θορύβων και κραδασμών, βιομηχανικές εφαρμογές εξισορρόπησης, στρεπτικές και περιστροφικές δονήσεις, βιομηχανικές μετρήσεις ακριβείας, και εφαρμογές για ήχο ή φωνή.

2.8.3.3 Dual Slope

Οι ADC dual slope είναι ακριβείς αλλά όχι πολύ γρήγοροι. Ο βασικός τρόπος με τον οποίο μετατρέπουν τις αναλογικές τιμές σε ψηφιακές είναι με τη χρήση ενός ολοκληρωτή. Η τάση εισάγεται στο σύστημα και αφήνεται να "τρέξει" για ένα χρονικό διάστημα. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται μια γνωστή τάση αντίθετης πολικότητας και αφήνεται να επιστρέψει στο μηδέν. Όταν φτάσει στο μηδέν, το σύστημα υπολογίζει ποια ήταν η τάση εισόδου συγκρίνοντας τον χρόνο

εκτέλεσης με τον χρόνο εξάντλησης και γνωρίζοντας ποια ήταν η αναφορά. Οι χρόνοι εκτέλεσης και επιστροφής είναι οι δύο κλίσεις για τις οποίες ονομάστηκε slope αυτή η τεχνική.



Εικόνα 2.20 Κύκλωμα Dual Slope ADC.

Αυτή η επαναληπτική διαδικασία είναι αξιόπιστη, αλλά απαιτεί χρόνο.

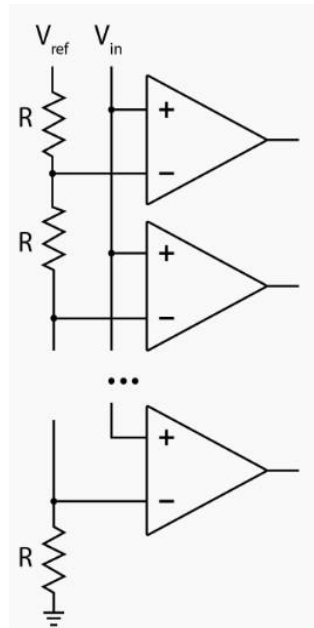
Το πλεονέκτημα των ADC dual slope είναι ότι οι μετρήσεις τους είναι πάρα πολύ ακριβείς.

Το μειονέκτημα των ADC dual slope είναι ο μεγάλος χρόνος που χρειάζονται για την μετατροπή.

Οι ADC dual slope δεν έχουν ευρύ φάσμα εφαρμογών. Οι εφαρμογές που συναντώνται συνήθως είναι πολύμετρα χειρός και πάγκου.

2.8.3.4 Flash

Οι Flash ADC είναι γρήγοροι και λειτουργούν χωρίς ιδιαίτερη καθυστέρηση, γι' αυτό αποτελούν μία καλή επιλογή όταν χρειάζονται τα υψηλότερα δυνατά ποσοστά δειγμάτων. Μετατρέπουν το αναλογικό σε ψηφιακό σήμα συγκρίνοντάς το με γνωστές τιμές αναφοράς. Όσο πιο πολλές γνωστές τιμές αναφοράς χρησιμοποιούνται στη διαδικασία μετατροπής, τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια μπορεί να επιτευχθεί. Για παράδειγμα, εάν θέλουμε ανάλυση 10-bit, θα πρέπει να συγκρίνουμε το εισερχόμενο αναλογικό σήμα με 1024 γνωστές τιμές. Η ανάλυση 8-bit απαιτεί 256 γνωστές τιμές. Γενικά, συνήθως χρησιμοποιείται η ανάλυση 8-bit στους Flash ADC.



Εικόνα 2.21 Κύκλωμα Flash ADC.

Τα πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου τύπου ADC είναι ότι είναι ο ταχύτερος τύπος καθώς κάνει άμεση μετατροπή χωρίς καθυστέρηση.

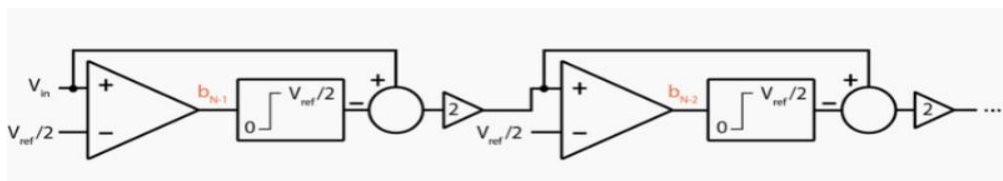
Τα μειονεκτήματα του Flash ADC είναι ότι το κύκλωμα είναι αρκετά μεγάλο με συνέπεια να καταναλώνει περισσότερη ενέργεια σε κάθε bit και η ανάλυση ουσιαστικά περιορίζεται στα 8 bit.

Οι εφαρμογές για τον Flash ADC περιλαμβάνουν τους ταχύτερους ψηφιακούς παλμογράφους, μετρήσεις μικροκυμάτων, οπτικές ίνες, ανίχνευση RADAR και ευρυζωνικό ραδιόφωνο.

2.8.3.5 Pipelined

Για εφαρμογές που απαιτούν υψηλότερη ποσοστά δειγματοληψίας από ό, τι μπορούν να παρέχουν οι ADC SAR και οι Δέλτα-Σίγμα, αλλά τα οποία δεν απαιτούν την εξαιρετικά υψηλή ταχύτητα των Flash ADC, υπάρχει ο Pipelined ADC.

Όπως συζητήθηκε στην προηγούμενη ενότητα, σε ένα Flash ADC, απαιτείται πολλή ενέργεια - ειδικά όταν χρησιμοποιούνται όλο και περισσότεροι συγκριτές για την επίτευξη υψηλότερης ανάλυσης bit. Ωστόσο, στον Pipelined ADC, το αναλογικό σήμα δεν περνάει από όλους τους συγκριτές ταυτόχρονα, διαχέοντας την ενέργεια που απαιτείται για τη μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό. Ως εκ τούτου, οι συγκριτές στο κύκλωμα "διοχετεύονται" κατά κάποιο τρόπο σε μια σειριακή διαδικασία 2-3 κύκλων. Αυτό έχει το πλεονέκτημα ότι επιτρέπει την επίτευξη υψηλότερων αναλύσεων χωρίς την κατανάλωση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας, αλλά υπάρχει καθυστέρηση τυπικά 3 κύκλων. Αυτό μπορεί να μετριάσει κάπως, αλλά ποτέ δεν μπορεί να εξαλειφθεί πλήρως.



Εικόνα 2.22 Κύκλωμα Flash ADC.

Κεφάλαιο 2

Αυτοί οι ADC είναι δημοφιλείς για εφαρμογές από 2-3 MS/s έως 100 MS/s (είναι δυνατόν να φτάσουν και έως 1 GS/s). Η ανάλυση των Pipelined ADCs μπορεί φτάσει και 16-bit, αλλά συνήθως είναι 8-bit. Και πάλι, υπάρχει πάντα μια αντιστάθμιση μεταξύ της ταχύτητας και της ανάλυσης.

Τα πλεονεκτήματα του Pipelined ADC είναι ότι είναι σχεδόν τόσο γρήγορος όσο και ο Flash ADC με μικρότερη κατανάλωση ενέργειας.

Τα μειονεκτήματα του Pipelined ADC είναι η καθυστέρηση που συμβαίνει λόγω της σειριακής διαδικασίας της μετατροπής και ο μέγιστος ρυθμός δείγματος περιορίζεται από την ανάλυση bit.

Οι εφαρμογές για Pipelined ADC περιλαμβάνουν ψηφιακούς παλμογράφους, RADAR, ραδιόφωνα λογισμικού, αναλυτές φάσματος, βίντεο HD, υπερηχητική απεικόνιση, ψηφιακούς δέκτες, καλωδιακά μόντεμ και Ethernet. [14]

3. Εξαρτήματα κατασκευής

3.1 Αισθητήρας ADXL335

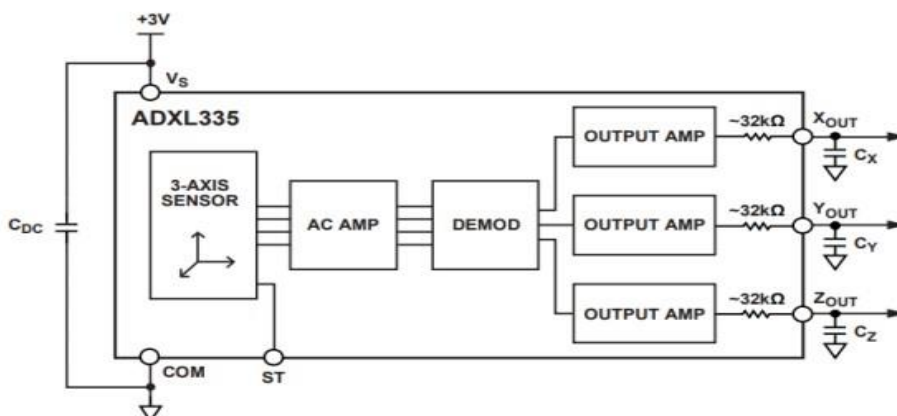
Το επιταχυνσιόμετρο, όπως προείπαμε στο παραπάνω κεφάλαιο είναι ένα ηλεκτρομηχανικό εξάρτημα το οποίο όταν συνδεθεί με ένα κατάλληλο κύκλωμα μπορεί να ανιχνεύσει στατικές και δυναμικές δυνάμεις επιτάχυνσης. Το επιταχυνσιόμετρο μετρά την επιτάχυνση σε μονάδες G.



Εικόνα 3.1 Εικόνα 13 Επιταχυνσιόμετρο ADXL335.

Για την κατασκευή μας επιλέχθηκε το επιταχυνσιόμετρο ADXL335 της εταιρίας Analog Devices το οποίο φαίνεται στην παραπάνω εικόνα. Είναι ένα μικρό, χαμηλής ισχύος επιταχυνσιόμετρο 3 αξόνων. Το ADXL335 έχει εύρος πλήρους κλίμακας από $-3G$ έως και $+3G$. Μπορεί να μετρήσει τόσο τη στατική επιτάχυνση για την ανίχνευση κλίσης όσο και την δυναμική επιτάχυνση που προέρχεται από δονήσεις, κινήσεις ή σοκ.

Το επιταχυνσιόμετρο ADXL335, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα που παρουσιάζει το κύκλωμα του, έχει έναν αισθητήρα πυριτίου και ένα κύκλωμα ρύθμισης του αναλογικού σήματος, για την υλοποίηση ενός επιταχυνσιόμετρου αρχιτεκτονικής ανοικτού βρόχου. Το σήμα στις εξόδους είναι αναλογικό σήμα τάσης το οποίο είναι ανάλογο της επιτάχυνσης. Η επιλογή του εύρους ζώνης του επιταχυνσιόμετρου γίνεται με την χρήση των πυκνωτών C_X , C_Y και C_Z στους ακροδέκτες X_{out} , Y_{out} και Z_{out} . [8]



Εικόνα 3.2 Εσωτερικό επιταχυνσιόμετρου ADXL335 [24]

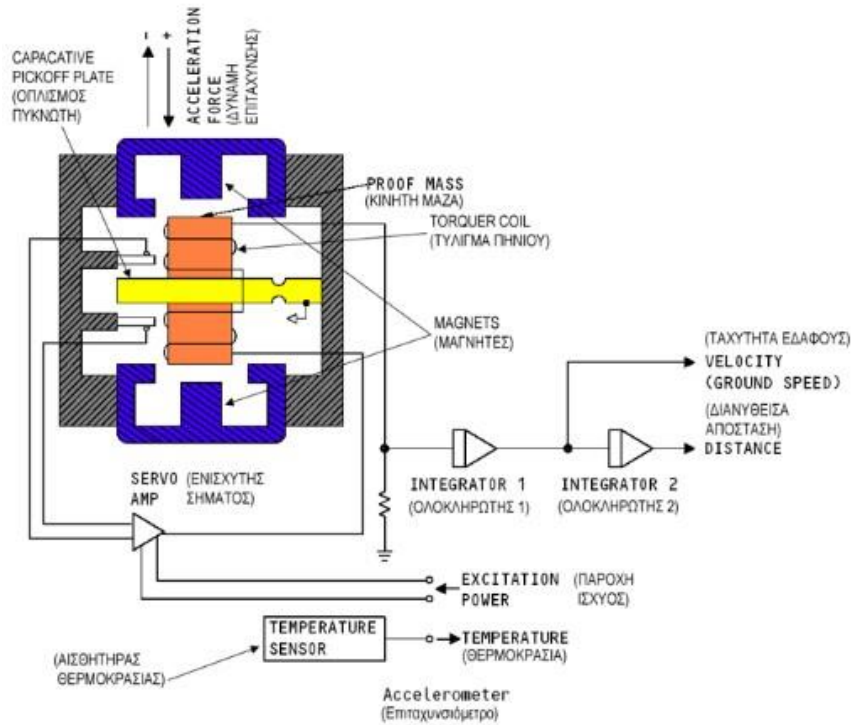
Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα χαρακτηριστικά και οι προδιαγραφές του αισθητηρίου που επιλέχθηκε για την κατασκευή μας.

Πίνακας 2 Χαρακτηριστικά του επιταχυνσιομέτρου ADXL335

Κατασκευαστής	Adafruit
Μοντέλο	ADXL 335
Διαστάσεις	4mm x 4mm x 1.45mm
Βάρος	1.27 g
Εύρος θερμοκρασίας	-40°C με +85°C
Τάση εξόδου	0 Volt έως -3G 3.3 Volt για 3G
Ευαισθησία	270 έως 330mV/g
Ρεύμα λειτουργίας	350μΑ (τυπικά)
Shock Resistance	10.000 G

3.1.1 Τρόπος λειτουργίας

Το επιταχυνσιόμετρο ADXL335 είναι ένα χωρητικό επιταχυνσιόμετρο που κάνει χρήση της διάταξης πυκνωτή και μάζας. Εάν παρατηρήσουμε το παρακάτω σχήμα βλέπουμε ότι υπάρχει μία μάζα αναρτημένη ανάμεσα στους πόλους δυο μαγνητών. Γύρω από την μεταλλική μάζα υπάρχει ένα τύλιγμα πηνίου. Το έλασμα ανάρτησης της μεταλλικής μάζας σε συνδυασμό με δυο αγώγιμες πλάκες άνω και κάτω, σχηματίζει δύο πυκνωτές. Η επιτάχυνση κατά τον διαμήκη άξονα της μάζας, μετακινεί την μάζα υπερνικώντας την αντίσταση του ελατηρίου της ανάρτησης, μετακινώντας τη από το σημείο ισορροπίας. Οι χωρητικότητες των δύο πυκνωτών, όταν η μάζα βρίσκεται στο σημείο ισορροπίας, είναι ίσες. Επομένως, όταν η μάζα κινηθεί προκαλεί αλλαγές στις χωρητικότητες των πυκνωτών. Ο ενισχυτής σήματος αντιλαμβάνεται την διαφοροποίηση αυτή σαν σφάλμα και στέλνει κατάλληλο ηλεκτρικό ρεύμα στο πηνίο που περιβάλλει την μάζα με σκοπό να την επαναφέρει στο σημείο ισορροπίας και να ακυρώσει το σήμα σφάλματος. Αυτή η τιμή του ρεύματος είναι η αναλογική έξοδος της συσκευής που αντιστοιχεί στην επιτάχυνση. Το αναλογικό αυτό σήμα ολοκληρώνεται σε συνάρτηση του χρόνου μια φορά για να μας δώσει την ταχύτητα, και μια δεύτερη φορά για να μας δώσει απόσταση. Ένας αισθητήρας θερμοκρασίας είναι εγκατεστημένος μαζί με το επιταχυνσιόμετρο με σκοπό την βελτίωση της ακρίβειας του επιταχυνσιομέτρου. Το σήμα από τον αισθητήρα θερμοκρασίας χρησιμοποιείται για την διόρθωση του σφάλματος θερμοκρασίας του επιταχυνσιομέτρου. [8]



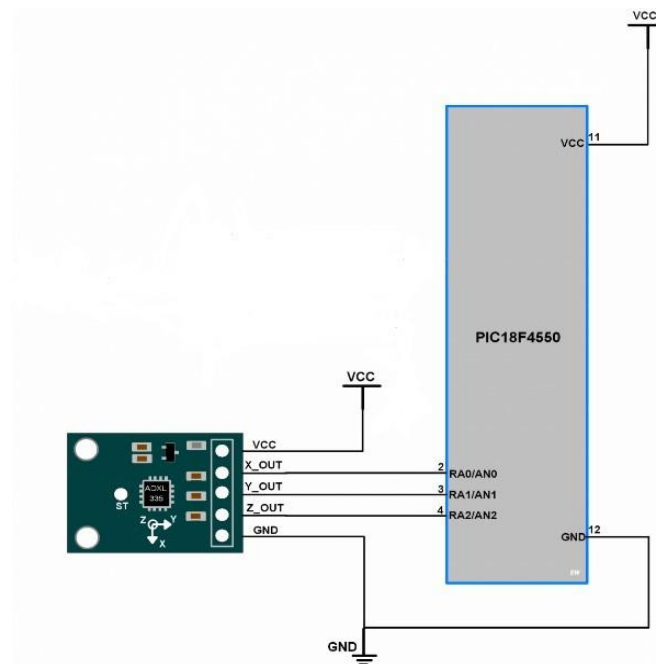
Εικόνα 3.3 Επιταχυνσιόμετρο με πυκνωτή [25]

3.1.2 Σύνδεση με τον μικροελεγκτή PIC18F4550

Το επιταχυνσιόμετρο αποτελείται από 5 ακίδες. Την ακίδα τροφοδοσίας την ακίδα γείωσης και τις ακίδες x,y,z. Στο παρακάτω πίνακα και στην παρακάτω εικόνα φαίνεται που συνδέεται η κάθε ακίδα στον μικροελεγκτή.

Πίνακας 3 Σύνδεση αισθητηρίου με μικροελεγκτή

ADXL 335	PIC18F4550
PIN 1 Vin	Vcc
PIN 2 X_OUT	PIN 2 RA0
PIN 3 Y_OUT	PIN3 RA1
PIN 4 Z_OUT	PIN4 RA2
PIN 5 GND	GROUND



Εικόνα 3.4 Σύνδεση αισθητηρίου με τον μικροελεγκτή.

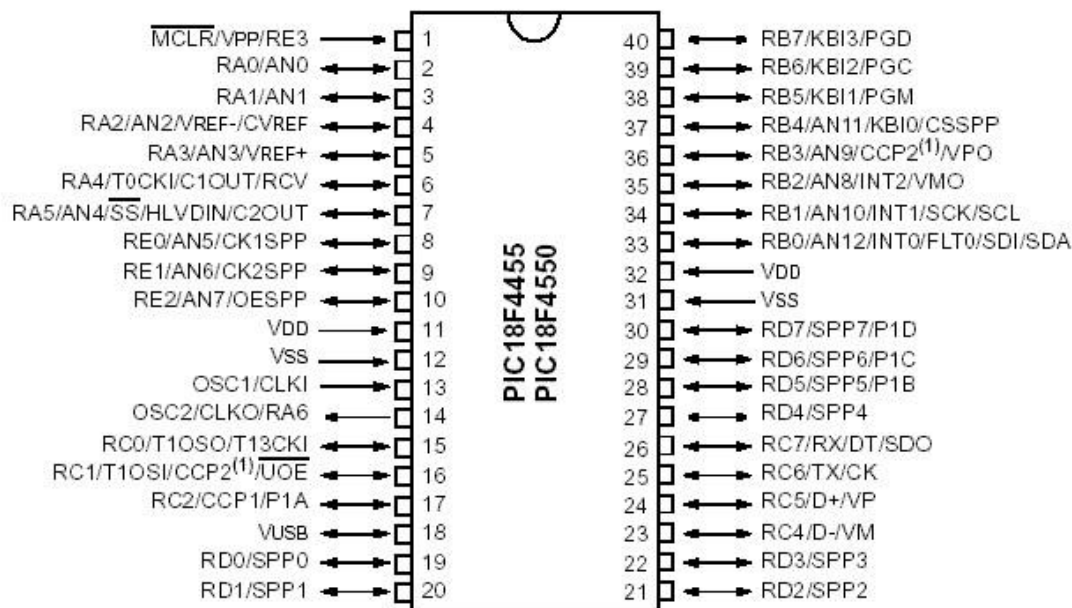
3.2 PIC18F4550

Σήμερα, υπάρχει μία μεγάλη ποικιλία μικροελεγκτών που διατίθενται στην αγορά. Για την υλοποίηση της κατασκευής μας επιλέχθηκε ο μικροελεγκτής PIC18F4550 που κατασκευάζεται από την εταιρία Microchip, καθώς είναι ο μικροελεγκτής που διδάσκεται στο εργαστήριο των μικροελεγκτών και ταιριάζει στις ανάγκες της κατασκευής μας. Τα χαρακτηριστικά του είναι τα παρακάτω:

- Έχει 40 ακροδέκτες που είναι Dual In Line (DIP) πράγμα που είναι πολύ χρήσιμο για την διασύνδεση με περιφερειακές συσκευές
- Η τάση τροφοδοσίας του κυμαίνεται από 2.5 έως 5 Volt, επομένως είναι κατάλληλος για εφαρμογές χαμηλής ισχύος
- Χρησιμοποιεί τεχνολογία Nano watt, η οποία μπορεί να μειώσει την ισχύ κατά τη διάρκεια της λειτουργίας
- Υποστηρίζει μεταφορά δεδομένων USB 2.0 τόσο χαμηλής ταχύτητας όσο και υψηλής ταχύτητας
- Διαθέτει ευέλικτη δομή ταλαντωτή - έχει ενσωματωμένο clock generator αλλά μπορεί επίσης να χρησιμοποιήσει εξωτερικό κρύσταλλο.
- Η συχνότητα λειτουργίας φτάνει έως 48MHZ
- Περιέχει 32KB μνήμης προγράμματος, 2KB χώρου δεδομένων και 256 byte EEPROM
- Διαθέτει πέντε θύρες I/O (A, B, C, D και E) διαφορετικών μεγεθών
- Διαθέτει τέσσερις ενσωματωμένους timers και 13 κανάλια 10 bit ADC
- Μπορεί να προγραμματιστεί χρησιμοποιώντας γλώσσα προγραμματισμού Assembly και C

3.2.1 Διάγραμμα ακίδων PIC18F4550

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το διάγραμμα των ακίδων του μικροελεγκτή.



Εικόνα 3.5 Διάγραμμα ακίδων μικροελεγκτή. [26]

3.2.2 Ταλαντωτής και ρολόι

Ο PIC18f4550 υποστηρίζει δώδεκα διαφορετικές λειτουργίες ταλαντωτών. Εδώ να σημειωθεί πως η σειρά 18F στοχεύει συγκεκριμένα σε μία μεγάλη κατηγορία ελέγχου I/O. Έτσι, οι διαφορετικές λειτουργίες ρολογιού χρησιμοποιούνται για την ευκολότερη διασύνδεση ορισμένων περιφερειακών.

Σε γενικές γραμμές, οι δώδεκα αυτές διαφορετικές λειτουργίες μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής.

- Χρήση εξωτερικού κρυστάλλου: Ο PIC18F4550 μπορεί να λειτουργήσει με εξωτερικό κρύσταλλο σε τέσσερις λειτουργίες. Εξωτερικό κρύσταλλο (XT), κρύσταλλο με ενεργοποιημένο το PLL (XTPLL), κρύσταλλο υψηλής ταχύτητας (HS) και κρύσταλλο υψηλής ταχύτητας με ενεργοποιημένο το PLL (HSPLL). Οι λειτουργίες XT και XTPLL χρησιμοποιούνται με κρυστάλλους συχνότητας κάτω των 4 MHz και οι λειτουργίες υψηλής ταχύτητας είναι για εφαρμογές με συχνότητα άνω των 4 MHz. Παρέχεται ένα PLL για τη μείωση της μετατόπισης στις συχνότητες και είναι ιδιαίτερα σημαντικό για εφαρμογές που χρησιμοποιούν το USB.
- Χρήση ρολογιού εξωτερικής πηγής: Ο PIC18F4550 υποστηρίζει τέσσερις λειτουργίες όταν είναι χρονισμένο με μία εξωτερική πηγή ρολογιού. Κατά τη διάρκεια αυτών των λειτουργιών, μία από τις ακίδες είναι αφιερωμένη σε έναν εξωτερικό κρύσταλλο (OSC2) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ακίδα θύρας εισόδου/εξόδου (της θύρας A) και ως αναφορά για εξωτερικές συσκευές. Οι λειτουργίες EC και ECPLL υποστηρίζουν την λειτουργία clock-out, διαιρώντας τη συχνότητα εισόδου δια του 4 για να δημιουργηθεί το σήμα clock out. Οι λειτουργίες ECIO και ECPIO κάνουν την ακίδα OSC2 να λειτουργεί ως ακίδα εισόδου/εξόδου. Αυτό είναι χρήσιμο σε ασύγχρονες περιφερειακές εφαρμογές, όπου δεν είναι απαραίτητο να υπάρχει ένα reference clock για τα περιφερειακά.
- Λειτουργίες μικτού ρολογιού: Ο PIC18F4550 υποστηρίζει τέσσερις μικτές λειτουργίες χρονισμού. Το INTXT και οι λειτουργίες INTHS χρησιμοποιούν τον εσωτερικό ταλαντωτή ως ρολόι του μικροελεγκτή και τα ρολόγια XT και HS, για το USB. Οι λειτουργίες INTIO και INTCKO χρησιμοποιούν επίσης τον εσωτερικό ταλαντωτή ως κεντρικό ρολόι, αλλά χρησιμοποιούν εξωτερικό

ρολίοι (EC) για τον ελεγκτή USB. Οι δύο λειτουργίες διαφέρουν μόνο στο γεγονός ότι το INTIO χρησιμοποιεί την ακίδα της θύρας RA6 ως ακίδα εισόδου/εξόδου.

3.2.3 Οργάνωση μνήμης

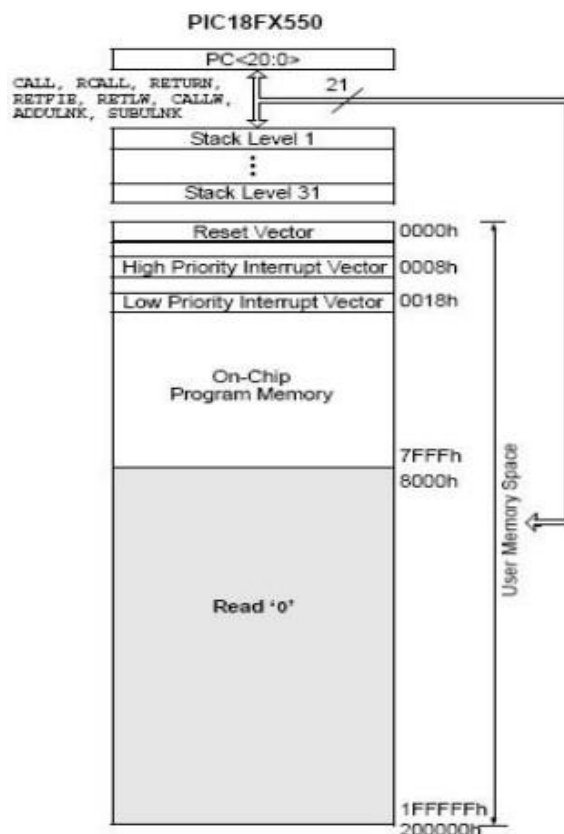
Υπάρχουν τρεις τύποι μνήμης σε συσκευές μικροελεγκτών της σειράς PIC18.

- Μνήμη προγράμματος
- Μνήμη δεδομένων
- Δεδομένα EEPROM

Ο PIC 18F4550 είναι ένα ολοκληρωμένο που ακολουθεί την αρχιτεκτονική Harvard. Επομένως υπάρχει η δυνατότητα ταυτόχρονης πρόσβασης στη μνήμη προγράμματος και στην μνήμη δεδομένων. Τα δεδομένα EEPROM, για πρακτικούς σκοπούς, μπορούν να θεωρηθούν ως περιφερειακή συσκευή, η πρόσβαση σε αυτά είναι δυνατή μέσω ενός συνόλου καταχωρητών ελέγχου.

3.2.3.1 Μνήμη Προγράμματος

Ο PIC18F4550 διαθέτει έναν μετρητή προγράμματος 21-bit ο οποίος είναι ικανός να επεξεργαστεί χώρο μνήμης προγράμματος 2MB. Διαθέτει 32KB μνήμης Flash και μπορεί να αποθηκεύσει έως και 16.384 οδηγίες single-word. Η παρακάτω εικόνα δείχνει την οργάνωση της μνήμης του προγράμματος.



Εικόνα 3.6 Οργάνωση μνήμης προγράμματος του PIC18F4550.

3.2.3.2 Οργάνωση μνήμης δεδομένων

Η μνήμη δεδομένων στον PIC18F4550 είναι μία στατική μνήμη RAM. Κάθε καταχωρητής στη μνήμη δεδομένων έχει 12 bit, επιτρέποντας έτσι έως και 4096 byte μνήμης δεδομένων. Ο χώρος μνήμης στη σειρά PIC18 χωρίζεται σε 16 μέρη που περιέχουν 256 bytes η κάθε μία. Η μνήμη δεδομένων περιέχει καταχωρητές ειδικού σκοπού (SFRs) και καταχωρητές γενικού σκοπού (GPRs). Οι SFR χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και την κατάσταση του ελεγκτή και των περιφερειακών λειτουργιών, ενώ οι GPR χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση δεδομένων στην εφαρμογή του χρήστη. Η οργάνωση της μνήμης δεδομένων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα

3.2.4 Δομή Interrupts

Ο PIC18F4550 έχει πολλαπλές πηγές διακοπής (interrupt) και μια λειτουργία προτεραιότητας διακοπής που επιτρέπει την κάθε πηγή διακοπής να εκχωρηθεί ως υψηλής προτεραιότητας ως χαμηλής προτεραιότητας. Η υψηλής προτεραιότητα βρίσκεται στη θέση 000008H και η χαμηλή προτεραιότητα είναι στη θέση 000018H.

Υπάρχουν δέκα καταχωρητές που χρησιμοποιούνται για τον χειρισμό των διακοπών. Αυτοί είναι οι εξής:

- RCON
- INTCON, INTCON2, INTCON3
- PIR1, PIR2
- PIE1, PIE2
- IPR1, IPR2

Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο χρήσης αυτών των καταχωρητών μπορείτε να ανατρέξετε στα φύλλα δεδομένων.

Κάθε πηγή διακοπής έχει τρία bit για τον έλεγχο της λειτουργίας της. Οι λειτουργίες αυτών είναι:

- Flag bit για να ένδειξη ενός συμβάντος διακοπής.
- Enable bit που επιτρέπει την εκτέλεση προγράμματος να διακλαδιστεί στη διεύθυνση της διακοπής όταν έχει ρυθμιστεί το flag bit της σημαίας.
- Priority bit για επιλογή υψηλής ή χαμηλής προτεραιότητας.

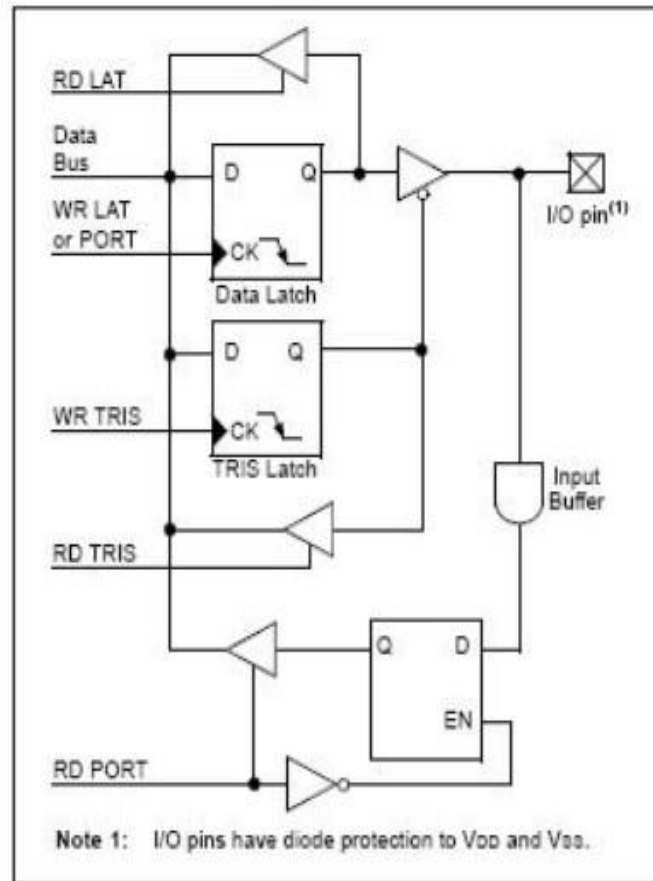
3.2.5 Θύρες εισόδου/εξόδου (I/O) γενικού σκοπού

Ο PIC18F4550 διαθέτει πέντε θύρες εισόδου/εξόδου. Μερικές ακίδες των θυρών εισόδου/εξόδου είναι με πολυπλεξία με εναλλακτική λειτουργία από τα περιφερειακά χαρακτηριστικά της συσκευής. Όταν είναι ενεργοποιημένη η συγκεκριμένη περιφερειακή συσκευή, η ακίδα δεν θα χρησιμοποιηθεί ως I/O γενικής χρήσης. Κάθε θύρα διαθέτει τρία μητρώα για τη λειτουργία της. Αυτά τα μητρώα είναι:

- Καταχωρητής TRISx (καταχωρητής κατεύθυνσης δεδομένων της θύρας x)
- Μητρώο PORTx (υποδεικνύει τα επίπεδα στις ακίδες της θύρας x)
- Μητρώο LATx (εξόδου της θύρας x)

Για πληροφορίες σχετικά με τις λειτουργίες αυτών των καταχωρητών, ανατρέξτε στο φύλλο δεδομένων.

Μαζί με τους καταχωρητές που αναφέρονται παραπάνω, υπάρχουν και άλλοι καταχωρητές που σχετίζονται με τη θύρα A για την διαμόρφωση τις ακίδας ως μία ακίδα που ανήκει σε ως ένα σε περιφερειακό ή γενικά σε μια ακίδα εισόδου/εξόδου. Η παρακάτω εικόνα δείχνει μια δομή θύρας εισόδου/εξόδου του μικροελεγκτή PIC18F4550.



Εικόνα 3.7 Λογικές πύλες I/O PIC 18F4550

3.2.6 Timers

Ο PIC18F4550 περιέχει τέσσερις μονάδες χρονοδιακόπτη τους timers 0, 1, 2 και 3. Παρακάτω παραθέτετε μία σύντομη περιγραφή του καθένα.

Timer0

Ο Timer0 ενσωματώνει τις ακόλουθες δυνατότητες:

- Λειτουργία με δυνατότητα επιλογής μέσω λογισμικού για χρήση ως χρονόμετρο(timer) ή μετρητή(counter) και στις δύο λειτουργίες 8 bit ή 16 bit.
- Αναγνώσιμους και εγγράψιμους καταχωρητές.
- Προγραμματιζόμενο prescaler 8bit.
- Επιλέξιμη πηγή ρολογιού (εσωτερική ή εξωτερική).
- Διακοπή κατά την υπερχειλίση.

Ο καταχωρητής TOCON ελέγχει όλες τις πτυχές της λειτουργίας της μονάδας, συμπεριλαμβανομένης της επιλογής του prescaler. Είναι και αναγνώσιμος και εγγράψιμος.

Timer1

Εκτός από τις δυνατότητες που παρέχει ο Timer0, ο Timer1 περιλαμβάνει:

- Επαναφορά μονάδας στην περίπτωση που ενεργοποιηθεί το CCP
- Flag κατάστασης ρολογιού συσκευής (T1RUN)

Ο Timer 1 Ενσωματώνει τον δικό του ταλαντωτή χαμηλής ισχύος για να παρέχει μια πρόσθετη επιλογή χρονισμού. Ο ταλαντωτής Timer1 μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ρολογιού χαμηλής ισχύος για τον μικροελεγκτή σε λειτουργία διαχείρισης ενέργειας. Ο Timer 1 ελέγχεται μέσω του καταχωρητή T1CON. Ο Timer1 μπορεί να λειτουργήσει σε μία από αυτές τις λειτουργίες:

- Χρονόμετρο (Timer).
- Σύγχρονος μετρητής.
- Ασύγχρονος Μετρητής.

Timer2

Ο χρονοδιακόπτης μονάδας Timer2 ενσωματώνει τις ακόλουθες δυνατότητες:

- Καταχωρητές χρονοδιακόπτη και περιόδου 8 bit (TMR2 και PR2 αντίστοιχα)
- Και οι δυο αυτοί καταχωρητές είναι αναγνώσιμοι και εγγράψιμοι.
- Προγραμματιζόμενος prescaler (1: 1, 1: 4 και 1:16)
- Προγραμματιζόμενο Postcaler (1: 1 έως 1:16)
- Διακοπή TMR2 σε PR2

Ο χρονοδιακόπτης ελέγχεται μέσω του καταχωρητή T2CON.

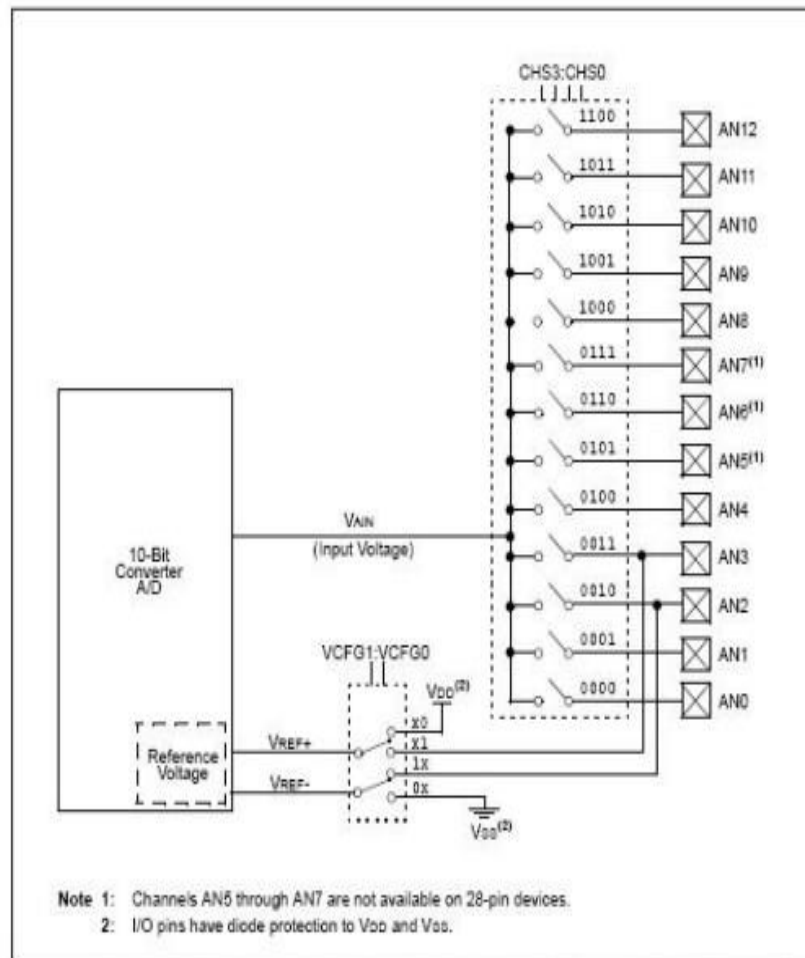
Ο Timer3 έχει παρόμοιο τρόπο λειτουργία με αυτόν του Timer1.

3.2.7 Analog to digital converter.

Ο μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (A/D) του PIC18F4550 έχει 13 πολλαπλές εισόδους. Αυτή η μονάδα επιτρέπει τη μετατροπή ενός αναλογικού σήματος εισόδου σε ένα αντίστοιχο κώδικα ψηφιακό 10-bit. Η ενότητα διαθέτει πέντε καταχωρητές:

- A/D Result High Register (ADRESH)
- A/D Result Low Register (ADRESL)
- Καταχωρητής ελέγχου A/D 0 (ADCON0)
- Καταχωρητής ελέγχου A/D 1 (ADCON1)
- Καταχωρητής ελέγχου A/D 2 (ADCON2)

Ο καταχωρητής ADCON0 ελέγχει τη λειτουργία της μονάδας A/D, ενώ ο καταχωρητής ADCON1 ρυθμίζει τις λειτουργίες των ακίδων της θύρας. Ο καταχωρητής ADCON2 ρυθμίζει τη πηγή ρολογιού A/D. Η παρακάτω εικόνα δείχνει το μπλοκ διάγραμμα του.



Εικόνα 3.8 A/D Converter του PIC18F4550

3.2.8 Universal Serial Bus-USB

Ο PIC18F4550 διαθέτει συμβατό USB Serial Interface Engine (SIE) που επιτρέπει γρήγορη την επικοινωνία μεταξύ οποιουδήποτε κεντρικού υπολογιστή και του μικροελεγκτή μέσω USB. Το SIE μπορεί να διασυνδεθεί απευθείας στο USB, χρησιμοποιώντας τον εσωτερικό πομποδέκτη, ή μπορεί να συνδεθεί μέσω εξωτερικού πομποδέκτη.

Ο εσωτερικός ρυθμιστής 3.3V είναι επίσης διαθέσιμος για την τροφοδοσία του εσωτερικού πομποδέκτη σε εφαρμογές 5V. Ορισμένες δυνατότητες υλικού έχουν συμπεριληφθεί για τη βελτίωση της απόδοσης. Η μνήμη διπλής θύρας στο χώρο μνήμης δεδομένων της συσκευής (USB RAM) παρέχεται την διαμοίραση άμεσης πρόσβασης μνήμης μεταξύ του πυρήνα του μικροελεγκτή και του SIE. Μία παράλληλη θύρα ροής παρέχεται για την υποστήριξη της μεταφοράς μεγάλου όγκου δεδομένων, σε εξωτερικές μνήμες μνήμης.

3.2.9 Master Synchronous Serial Port (MSSP)

Η μονάδα Master Synchronous Serial Port (MSSP) είναι μια σειριακή διεπαφή, χρήσιμη για την επικοινωνία με άλλες περιφερειακές συσκευές, όπως σειριακές EEPROM, προγράμματα οδήγησης οθόνης, μετατροπείς A/D.

Η μονάδα MSSP μπορεί να λειτουργήσει σε μία από τις δύο λειτουργίες:

- Serial Peripheral Interface (SPI)
- Inter-Integrated Circuit (I2C)

στις λειτουργίες ελέγχου

- Full Master mode
- Slave (με κλήση γενικής διεύθυνσης)

Λειτουργία SPI

Η λειτουργία SPI επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη δεδομένων 8 bit.. Για να επιτευχθεί η επικοινωνία, συνήθως γίνεται χρήση τριών ακίδων.

- Έξοδος σειριακών δεδομένων (SDO) - RC7/RX/DT/SDO
- Serial Data In (SDI) - RB0/AN12/INT0/FLT0/SDI/SDA
- Σειριακό ρολόι (SCK) - RB1/AN10/INT1/SCK/SCL

Επιπλέον, ένας τέταρτος ακροδέκτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κατάσταση λειτουργίας slave, το Slave Select (SS) -RA5/AN4/SS/HLVDIN/C2OUT.

Λειτουργία I2C

Η διεπαφή I2C υποστηρίζει τις ακόλουθες λειτουργίες

- Κύρια λειτουργία
- Λειτουργία Multi-Master
- Slave mode

Για τη μεταφορά δεδομένων χρησιμοποιούνται οι εξής δύο ακίδες:

- Σειριακό ρολόι (SCL) - RB1/AN10/INT1/SCK/SCL
- Σειριακά δεδομένα (SDA) - RB0/AN12/INT0/FLT0/SDI/SDA

Ο χρήστης πρέπει να διαμορφώσει αυτές τις ακίδες ορίζοντας τα συναφή bits TRISx (Όπου x δηλώνει το όνομα της θύρας). [27]

3.2.10 Σύνδεση PIC18F4550 με το κύκλωμα

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η σύνδεση του PIC18F4550 με το υπόλοιπο κύκλωμα.

Πίνακας 4 Σύνδεση ακίδων μικροελεγκτή.

Θύρα	Pin	Χρησιμότητα	Σύνδεση
MCLR	Pin 1	Master Clear	Pickit Pin 1
Ra0	Pin 2	Δίαυλος δεδομένων	ADXL pin2
Ra1	Pin 3	Δίαυλος δεδομένων	ADXL pin3
Ra2	Pin 4	Δίαυλος δεδομένων	ADXL pin4
Vdd	Pin 11	Vdd	Γείωση
Vss	Pin 12	Vss	+5V
Clk1	Pin 13	Clock	Oscillator
Clk2	Pin 14	Clock	Oscillator
Rc0	Pin 15	Δίαυλος δεδομένων	RS Select register LCD PIN 4

Rc1	Pin 16	Δίαυλος δεδομένων	Enable LCD PIN 6
Rd0	Pin 19	Δίαυλος δεδομένων	D4 LCD PIN 11
Rd1	Pin 20	Δίαυλος δεδομένων	D5 LCD PIN 12
Rd2	Pin 21	Δίαυλος δεδομένων	D6 LCD PIN 13
Rd3	Pin 22	Δίαυλος δεδομένων	D7 LCD PIN 14
Rb0	Pin 33	Δίαυλος δεδομένων	Button
Rb1	Pin 34	Δίαυλος δεδομένων	Button
Rb2	Pin 35	Δίαυλος δεδομένων	Button
Rb3	Pin 36	Δίαυλος δεδομένων	Button
CLK	Pin 39		Pickit PIN 5
DAT	Pin 40		Pickit PIN 4

3.3 LCD 16X2

Η οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD) χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορες εφαρμογές ηλεκτρονικών ειδών. Η κατασκευή μας περιλαμβάνει μία οθόνη τεχνολογίας υγρών κρυστάλλων (LCD) 16x2 η οποία έχει 2 γραμμές με 16 χαρακτήρες σε κάθε γραμμή με άσπρο φόντο και μαύρα γράμματα.



Εικόνα 3.9 LCD 16x2

Η οθόνη αυτή χρησιμοποιεί τον controller HD44780 και έχει 16 pins. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η λειτουργία καθενός από αυτά τα pins και η σύνδεση τους με τον μικροελεγκτή και το κύκλωμα της κατασκευής μας.

Πίνακας 5 Σύνδεση ακίδων LCD

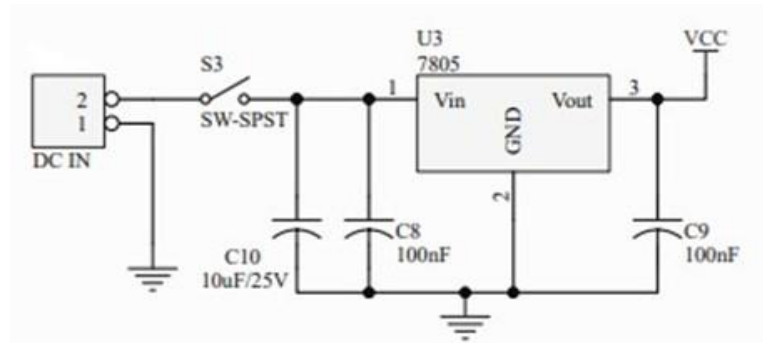
No	Pin	Λειτουργία	Σύνδεση
1	Vss	Γείωση	Γείωση
2	Vdd	Τροφοδοσία	Vdd 5V
3	Vee	Έλεγχος contrast	Ποτενσιόμετρο 1KΩ
4	Rs	Register Select	PIC18F4550 Pin 15 Rs
5	Rw	Read/Write	Γείωση
6	E	Enable	PIC18F4550 Pin 16 E
7-10	D0 – D3	Data pins	Γείωση
11-14	D4 – D7	Data pins	PIC18F4550 Pins 19 – 22
15	LED+	Τροφοδοσία	-
16	LED-	Γείωση	-

- Οι δύο πρώτες ακίδες της οθόνης χρησιμοποιούνται για γείωση και τροφοδοσία(+5 V) αντίστοιχα.
- Η ακίδα 3 – VEE χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της αντίθεσης της οθόνης. Η τάση καθορίζει την αντίθεση στην οθόνη, όσο χαμηλώνει η τάση, τόσο αυξάνεται η αντίθεση. Μπορούμε να συνδέσουμε ποτενσιόμετρο 4,7K για την ρύθμιση της αντίθεσης ή απλά να την συνδέσουμε στην γείωση για να έχουμε τη μέγιστη αντίθεση.
- Η ακίδα 4 RS όταν είναι 0 τα δεδομένα στις ακίδες D0 έως D7 λαμβάνονται ως εντολή, για παράδειγμα ο καθαρισμός της οθόνης, όταν είναι 1 τα δεδομένα εμφανίζονται στην οθόνη.
- Η ακίδα 5 RW όταν είναι 0 τα δεδομένα γράφονται στην οθόνη, όταν είναι 1 τα δεδομένα διαβάζονται από την οθόνη.
- Η ακίδα 6 E χρησιμοποιείται για να την λήψη δεδομένων από τις ακίδες D0 – D7.
- Οι ακίδες 7 έως 14 χρησιμοποιούνται για την αποστολή δεδομένων / εντολών στην οθόνη.
- Οι ακίδες 15 LED + και 16 LED – χρησιμοποιούνται για να ενεργοποιηθεί ο οπίσθιος φωτισμός (backlight).

Η LCD 16x2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε λειτουργία 4-bit ή 8-bit ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Στην δική μας περίπτωση η μεταφορά δεδομένων γίνεται με 4-bit. Για την επικοινωνία της οθόνης με τον μικροελεγκτή χρησιμοποιούμε την βιβλιοθήκη flex_lcd-proteus.h.

3.4 Τροφοδοσία κατασκευής

Η κατασκευή έχει την δυνατότητα να τροφοδοτηθεί από εξωτερική σύνδεση μέσω USB TYPE A είτε από μία μπαταρία 9 volt. Για την μετατροπή των 9 volt της μπαταρίας σε 5 volt που είναι η τάση τροφοδοσίας της κατασκευής μας, χρησιμοποιείται ο ρυθμιστής τάσης LM7805 που είναι συνδεδεμένος παράλληλα με 3 πυκνωτές. Παρακάτω φαίνεται το κύκλωμα του.



Εικόνα 3.10 Κύκλωμα τροφοδοσίας κατασκευής.

3.5 Λίστα ηλεκτρονικών εξαρτημάτων

Τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της κατασκευής παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα

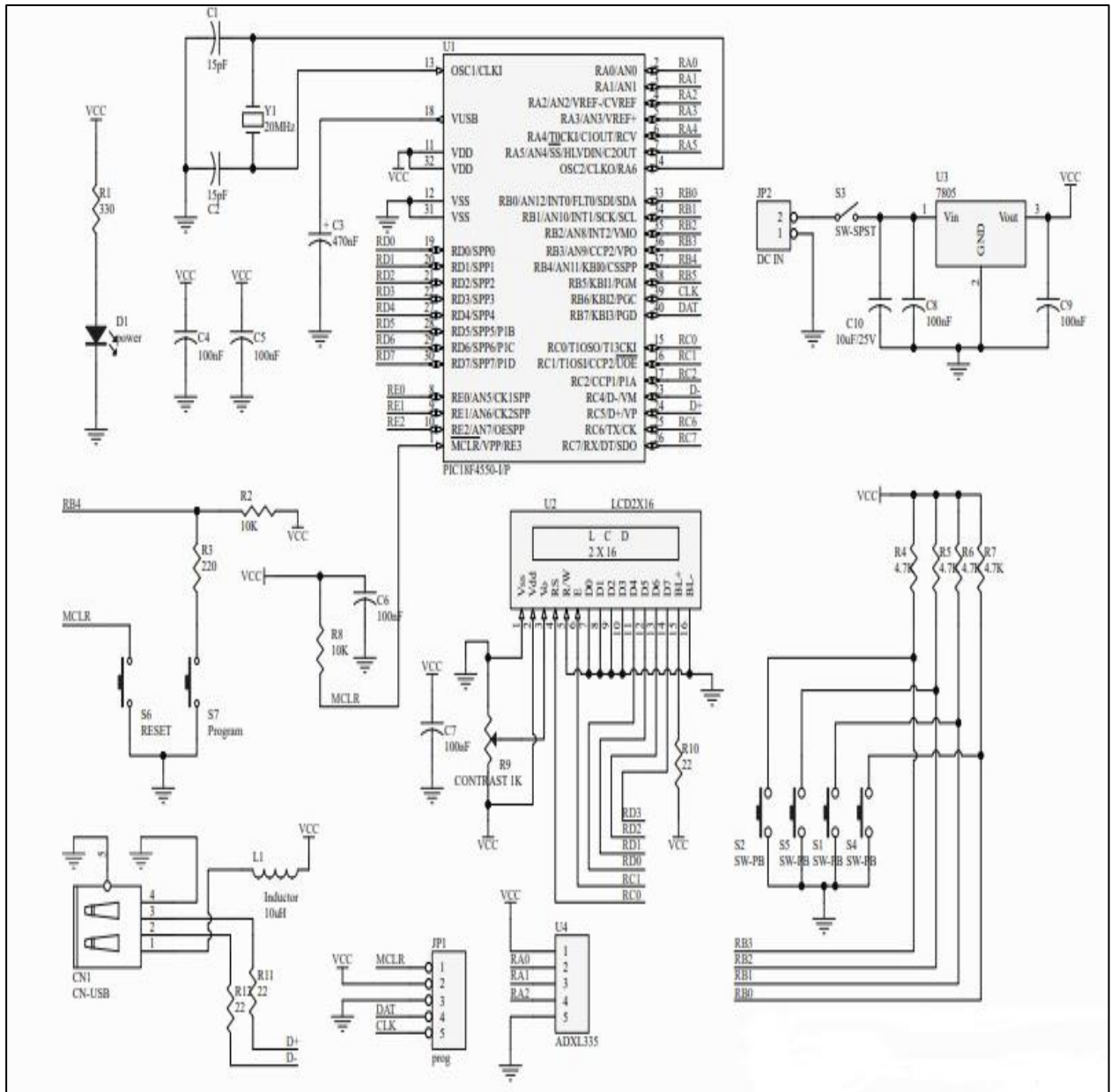
Πίνακας 6 Πίνακας ηλεκτρονικών εξαρτημάτων

Χαρακτηριστικό	Περιγραφή	Ετικέτα	Ποσότητα
15pF	Πυκνωτής	C1, C2	2
470nF	Πυκνωτής	C3	1
100nF	Πυκνωτής	C4, C5, C6, C7, C8, C9	6
10uF/25V	Πυκνωτής	C10	1
CN-USB	USB type B con	CN1	1
power	Header, 2-Pin	D1	1
prog	Header, 5-Pin	JP1	1
DC IN	Header, 2-Pin	JP2	1
1uH	Πηνίο	L1	1
330	Αντίσταση	R1	1
10K	Αντίσταση	R2, R8	2
220	Αντίσταση	R3	1
4.7K	Αντίσταση	R4, R5, R6, R7	4
CONTRAST 1K	Ποτενσιόμετρο	R9	1
22	Αντίσταση	R10, R11, R12	3
SW-PB	Header, 2-Pin	S1, S2, S4, S5	4
SW-SPST	Single-Pole, Single-Throw Switch	S3	1
RESET	Tag Switch	S6	1
Program	Tag Switch	S7	1
PIC18F4550-I/P	High Performance, Enhanced Flash, USB Microcontroller with nanoWatt Technology, 32K Flash, 40-Pin	U1	1

LCD2X16	LCD 2X16	U2	1
7805	Regulator	U3	1
ADXL335	Header, 5-Pin	U4	1
20MHz	Κρύσταλλος	Y1	1
0 Om	Αντίσταση	0	6

3.6 Σχηματικό κύκλωμα κατασκευής

Το κύκλωμα της κατασκευής φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



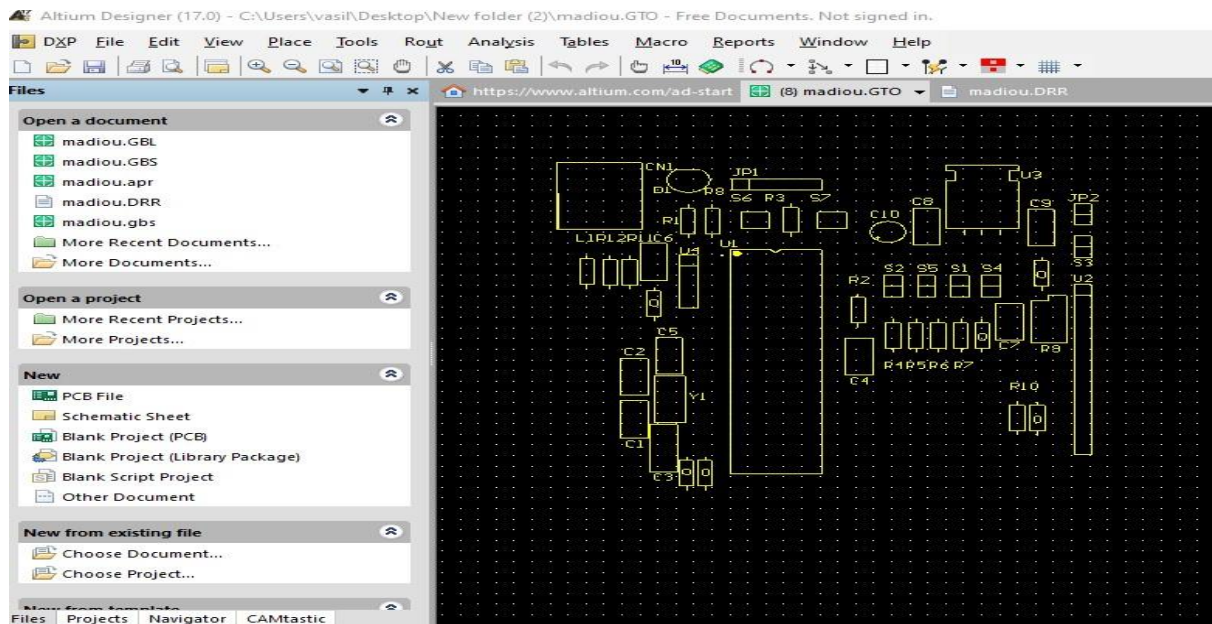
Εικόνα 3.11 Κύκλωμα κατασκευής

4. Υλοποίηση και λειτουργία κατασκευής

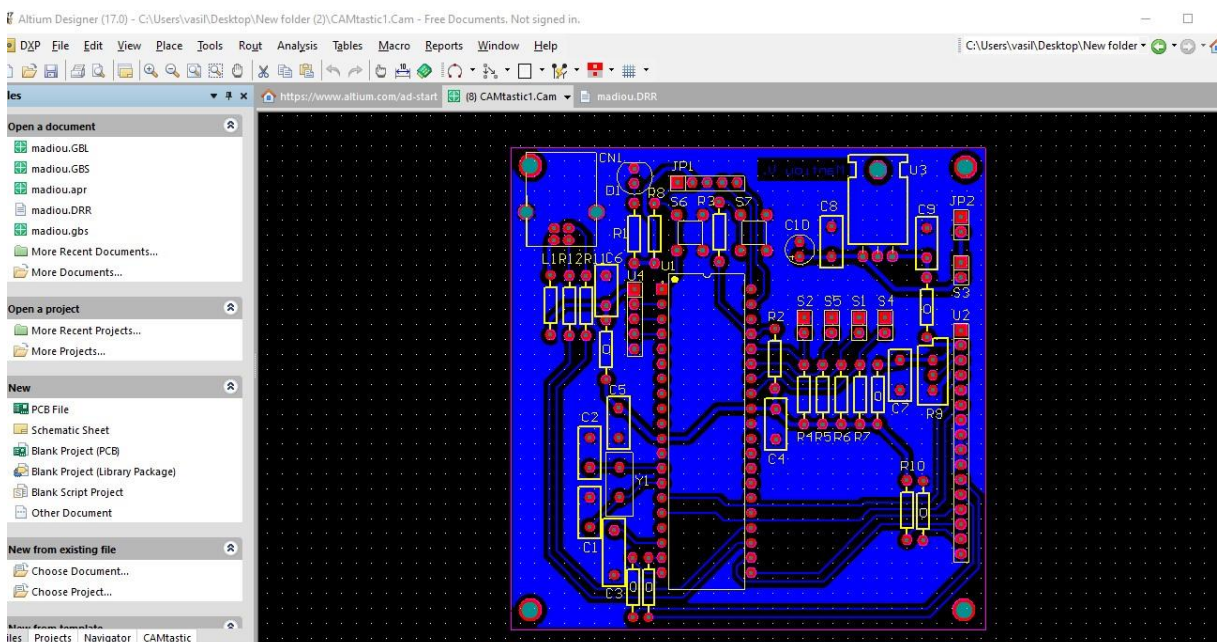
4.1 Σχεδίαση κυκλώματος

Έχοντας ολοκληρώσει το σχεδιασμό του κυκλώματος της κατασκευής μας, έπειτα πρέπει να το μετατρέψουμε σε ένα τυπωμένο κύκλωμα πλακέτας. Ο σχεδιασμό της πλακέτας PCB έχει γίνει με την χρήση του προγράμματος Altium.

Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται το τελικό αποτέλεσμα της σχεδίασης της πλακέτας.

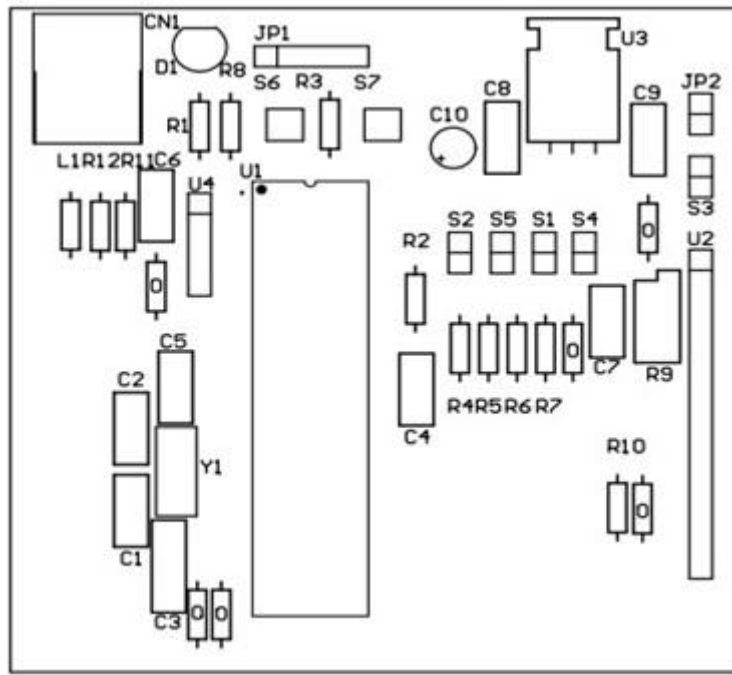


Εικόνα 4.1 Top overlay στο Altium

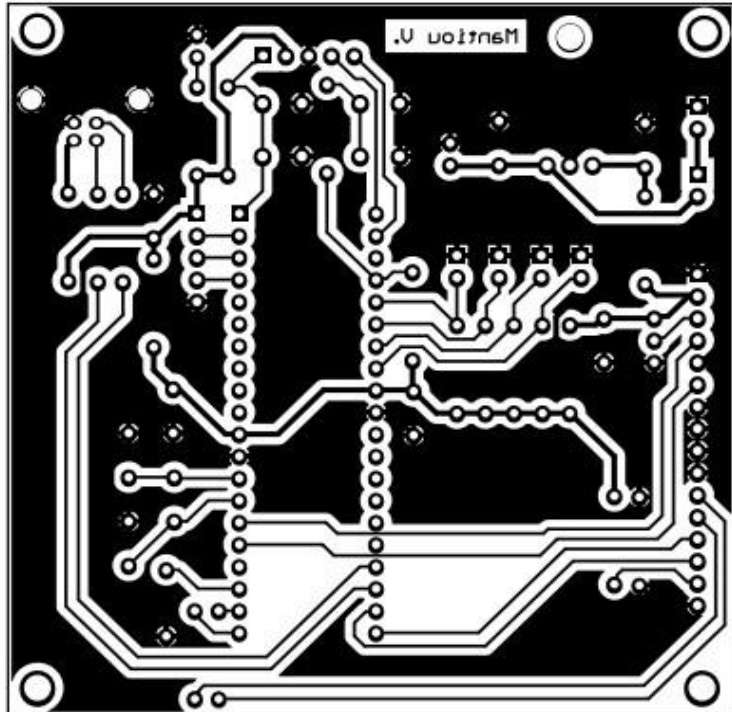


Εικόνα 4.2 Η τελική μορφή της PCB στο Altium μαζί με όλα τα layers

Μετά την σχεδίαση της πλακέτας στο Altium το τελικό προϊόν είναι οι παρακάτω εικόνες από το top overlay και το bottom της πλακέτας, οι οποίες εκτυπώνονται σε διαφάνεια για την κατασκευή της πλακέτας.



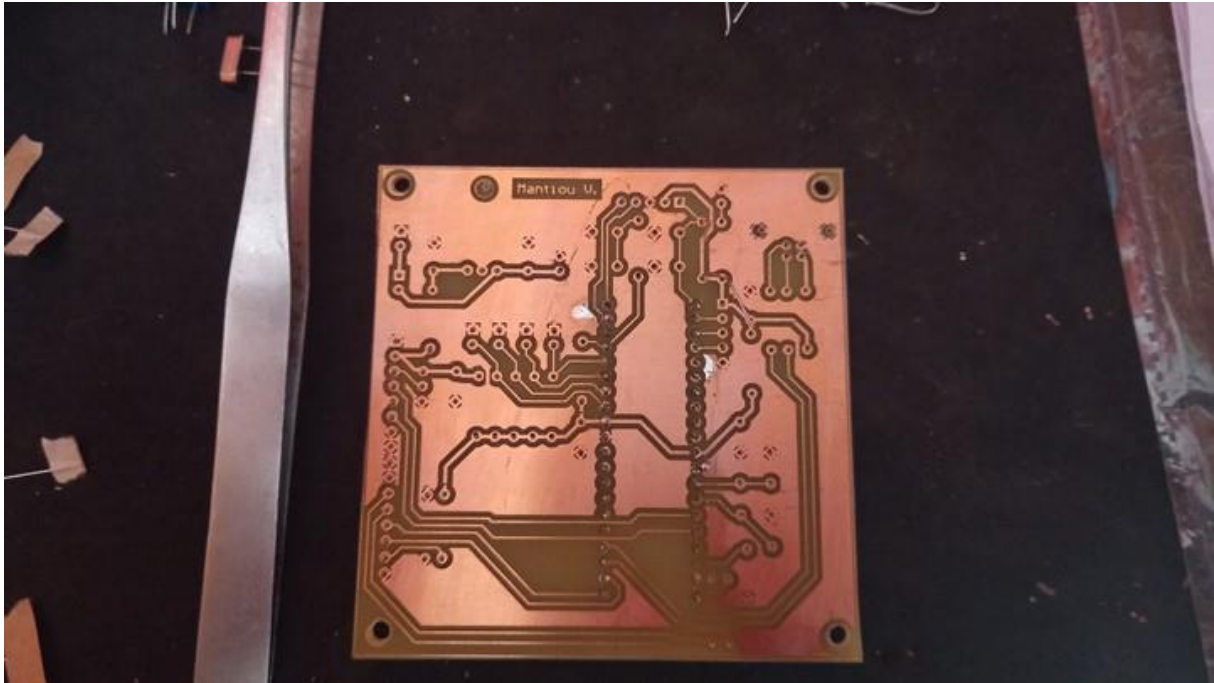
Εικόνα 4.3 Το top overlay για εκτύπωση.



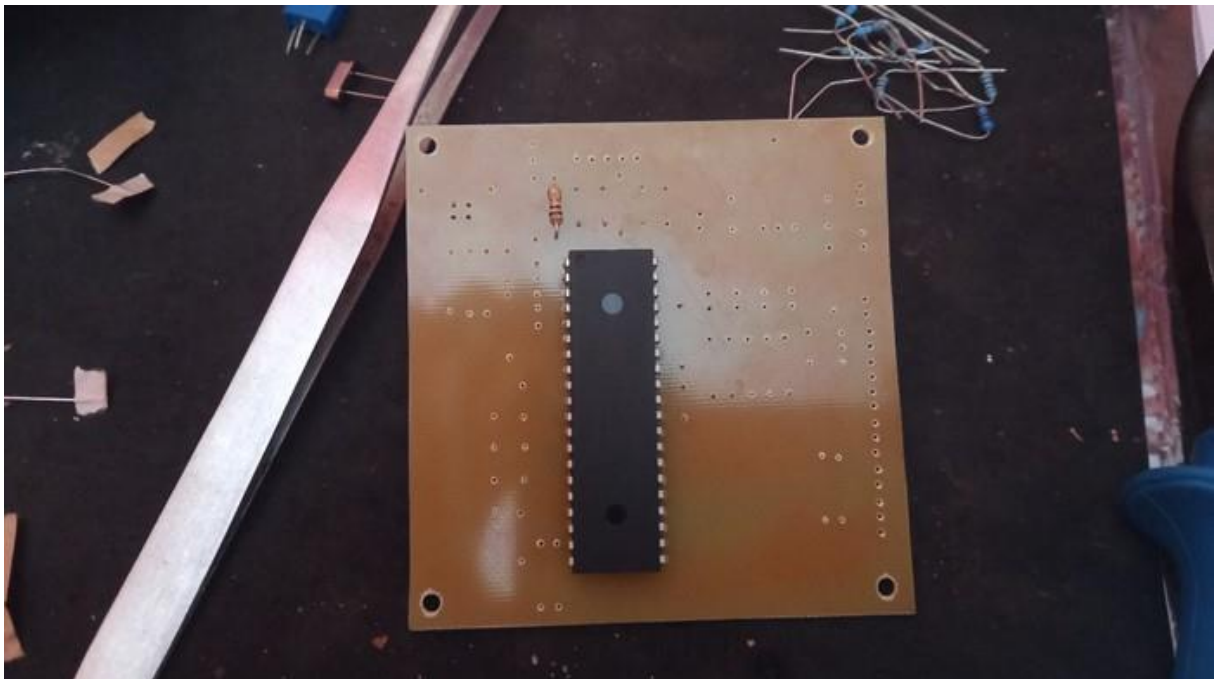
Εικόνα 4.4 Το bottom της PCB για την εκτύπωση.

4.2 Δημιουργία πλακέτας PCB

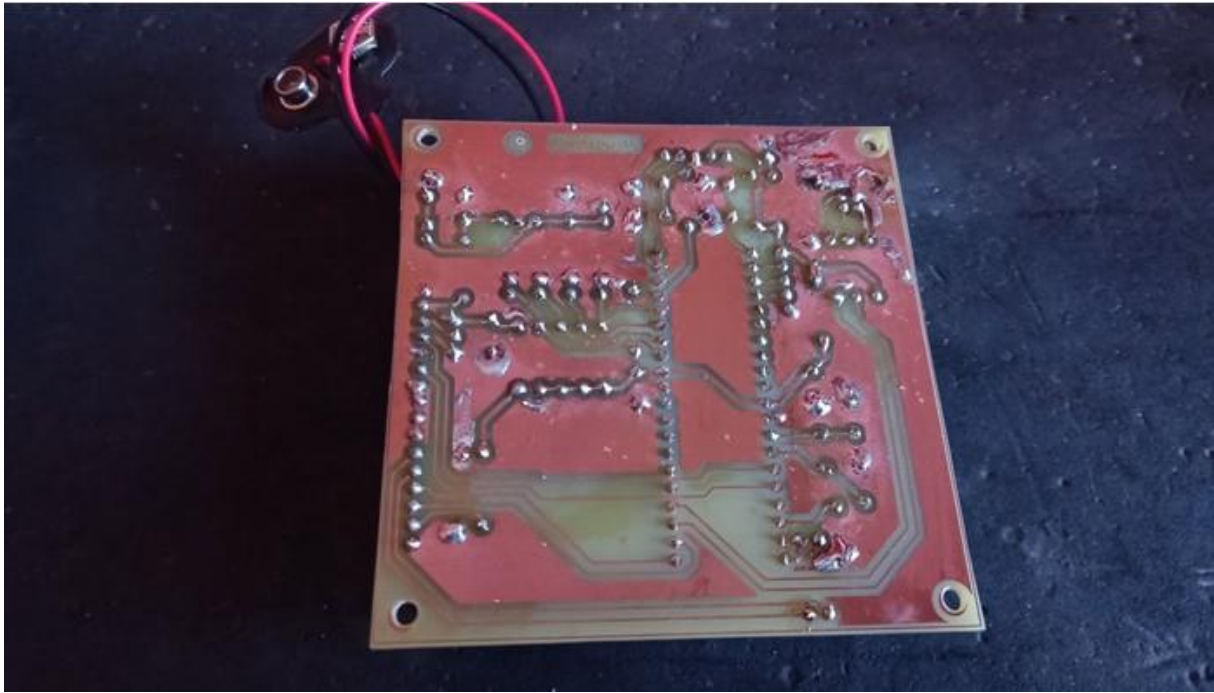
Η δημιουργία της PCB έγινε με την χρήση της φωτοχημικής μεθόδου σε εργαστήριο ηλεκτρονικών κατασκευών. Έπειτα έγιναν όλες οι κολλήσεις και παρακάτω παρουσιάζονται φωτογραφίες από την διαδικασία και το τελικό αποτέλεσμα.



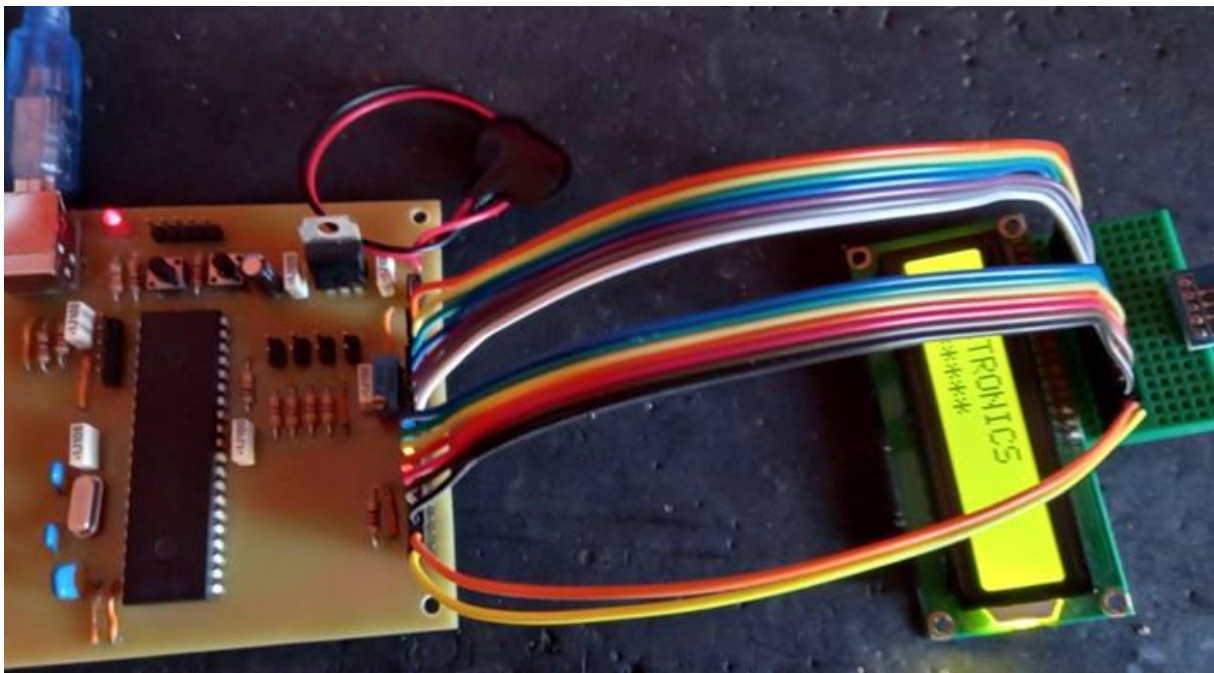
Εικόνα 4.5 Φωτογραφία PCB πριν τις κολλήσεις.



Εικόνα 4.6 Φωτογραφία PCB μετά την κόλληση του μικροελεγκτή



Εικόνα 4.7 Φωτογραφία κάτω όψης PCB μετά τις κολλήσεις.



Εικόνα 4.8 Φωτογραφία της κατασκευής μετά την ολοκλήρωση όλων των κολλήσεων

4.3 Προγραμματισμός μικροελεγκτή

Για την υλοποίηση των παραπάνω προγραμματίστηκε ένας PIC18F4550. Ο κώδικας γράφτηκε στο CCS C Compiler. Για την φόρτωση του προγράμματος στον μικροελεγκτή χρησιμοποιήθηκε το hardware PICKIT 3 το οποίο φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.9 PICKIT 3 [28]

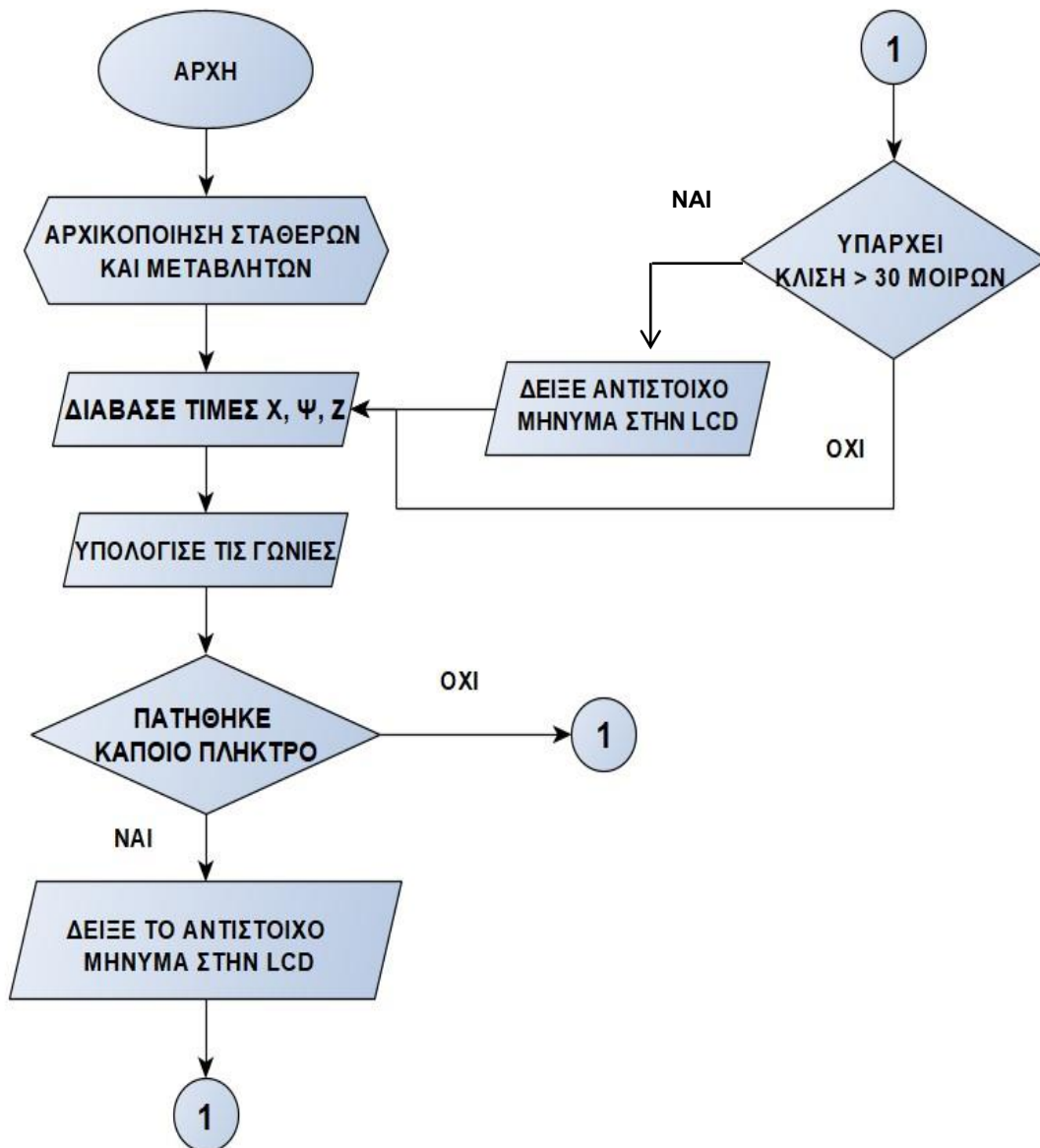
Ο κώδικας που γράφτηκε στον μικροελεγκτή φαίνεται στο Παράρτημα 1. Έτσι, επιτεύχθηκε η δημιουργία ενός επιταχυνσιόμετρου 3 αξόνων το οποίο διαβάζει τον αισθητήρα και υπολογίζει τις γωνίες. Η φόρτωση του κώδικα στον PIC έγινε με την βοήθεια του MPLAB X IPE, όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 4.10 Το περιβάλλον το MPLAB x IPE

4.4 Διάγραμμα ροής

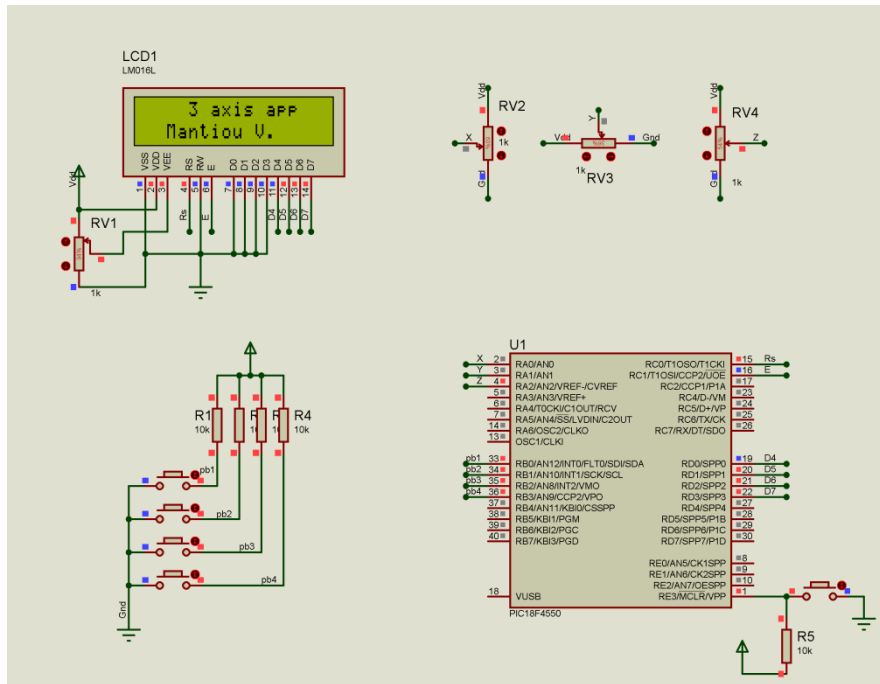
Η κατασκευή μετράει συνεχώς την επιτάχυνση μέσω του αισθητηρίου και υπολογίζει τις γωνίες περιστροφής, εάν οι γωνία tilt ξεπεράσει τις 30 μοίρες εμφανίζει σχετικό μήνυμα στην LCD. Εάν ο χρήστης πατήσει κάποιο πλήκτρο, στην οθόνη εμφανίζεται η ανάλογη μορφή μέτρησης του αισθητηρίου



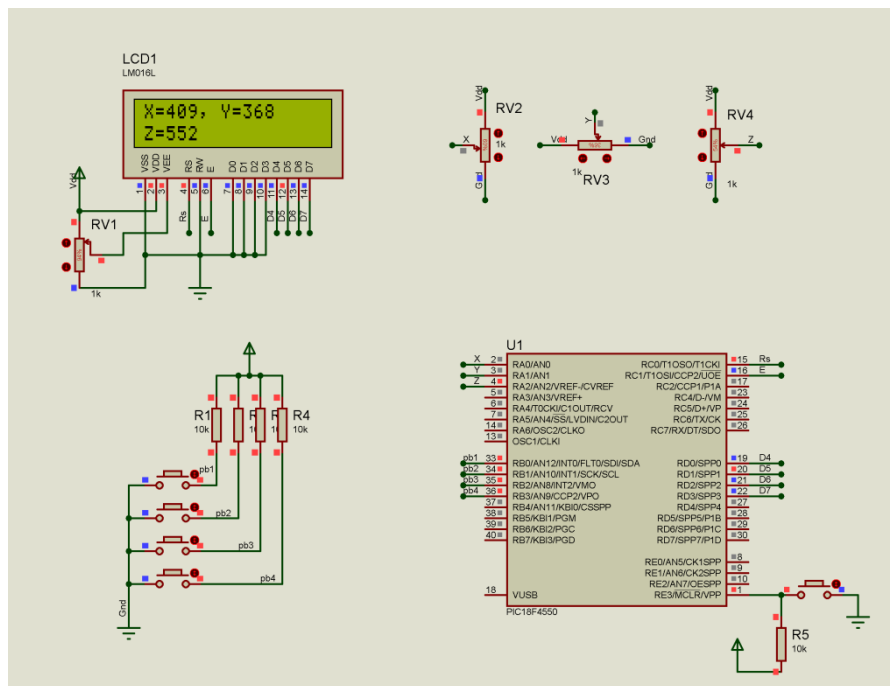
Εικόνα 4.11 Διάγραμμα ροής επιταχυνσιομέτρου τριών αξόνων

4.5 Προσομοίωση λειτουργίας κατασκευής

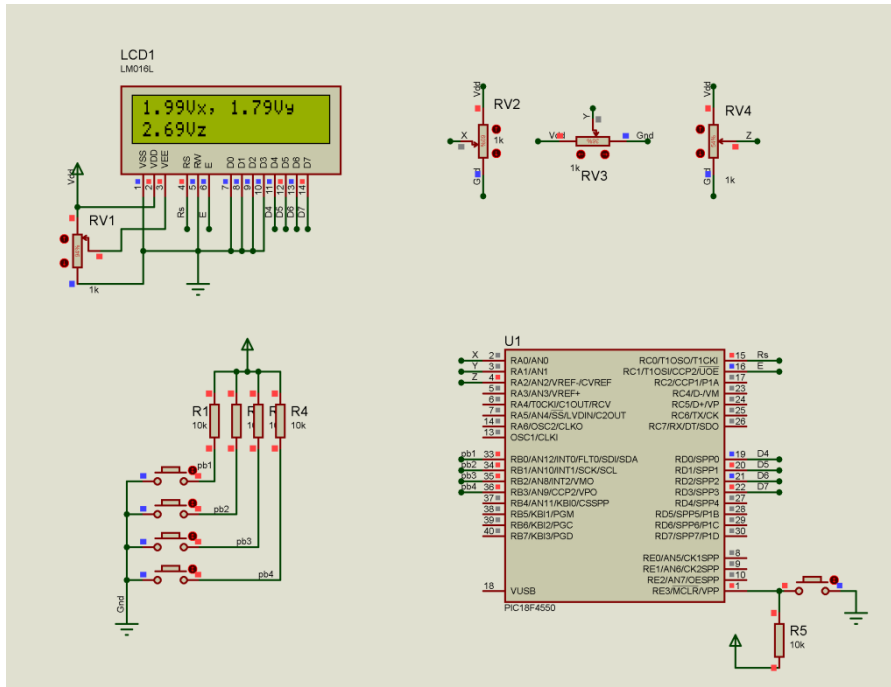
Η προσομοίωση της λειτουργίας του κώδικα της κατασκευής έγινε με το πρόγραμμα Proteus. Τα 3 ποτενσιόμετρα επάνω δεξιά αναπαριστούν τις αναλογικές τάσεις εξόδου του αισθητηρίου. Όλες οι γωνίες που δείχνει η LCD είναι σε μοίρες.



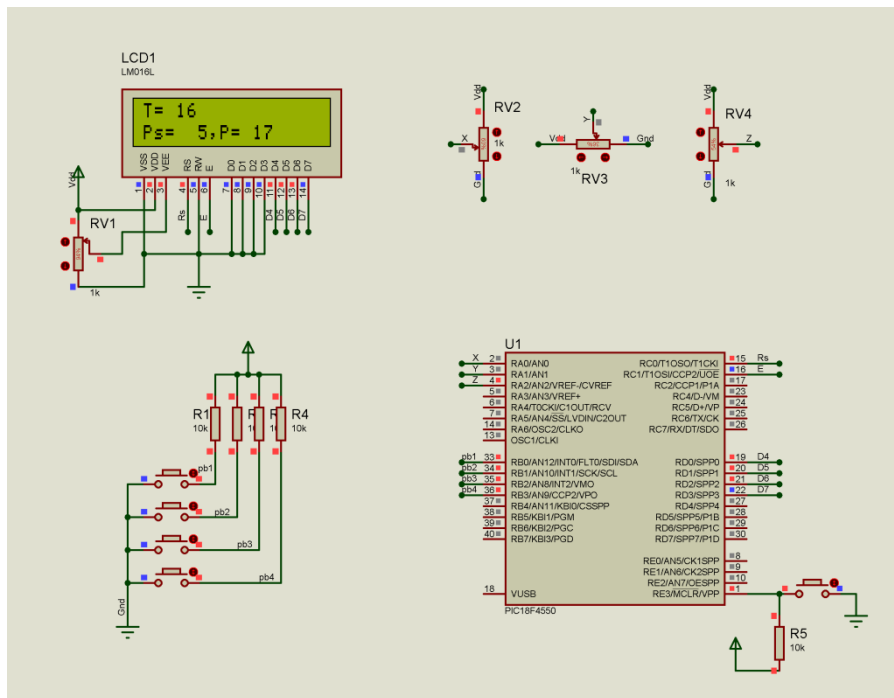
Εικόνα 4.12 Έναρξη εφαρμογής



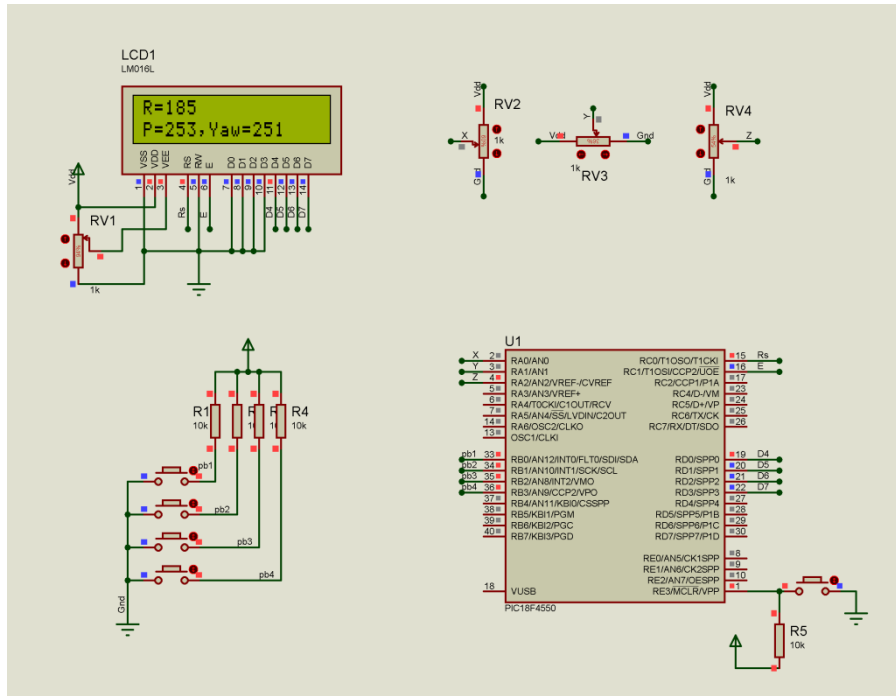
Εικόνα 4.13 Πάτημα 1ου κουμπιού. Εμφάνιση των συντεταγμένων x, y, z από τους ADCs.



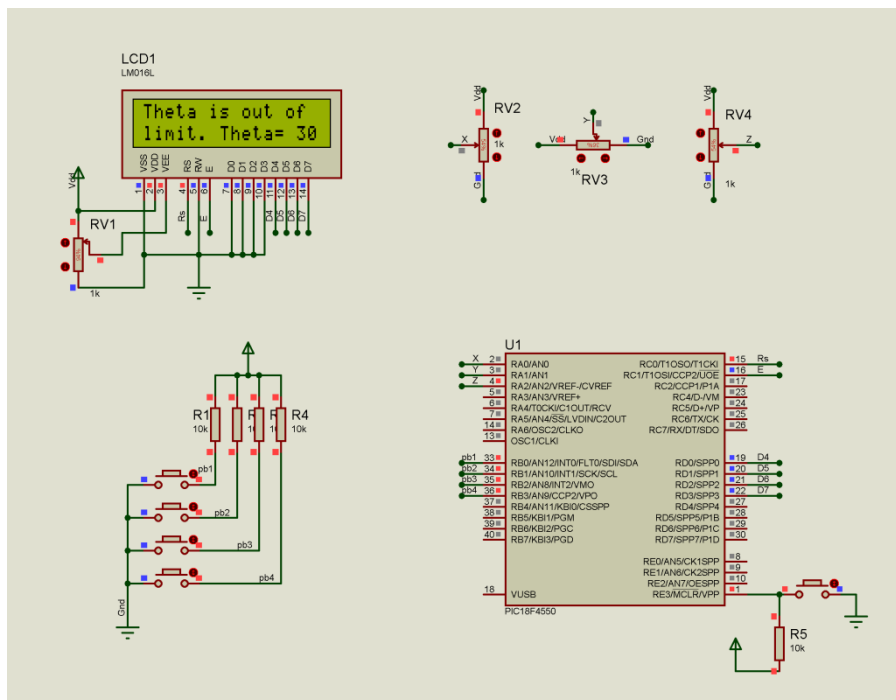
Εικόνα 4.14 Πάτημα 2ου κουμπιού. Εμφάνιση αναλογικών τάσεων του αισθητηρίου στους 3 άξονες.



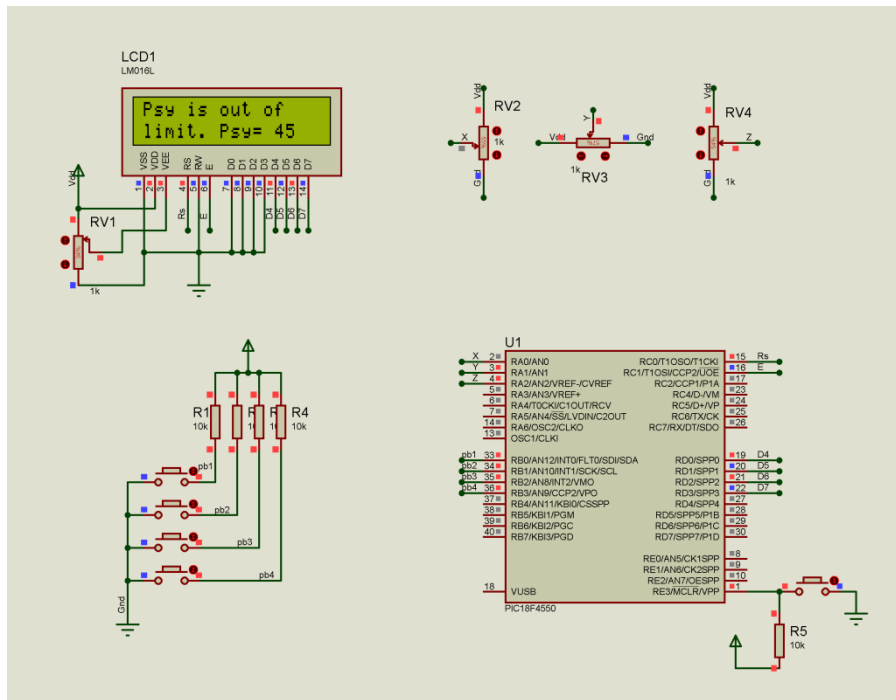
Εικόνα 4.15 Πάτημα 3ου κουμπιού. Εμφάνιση γωνιών Θ , Ψ , Φ .



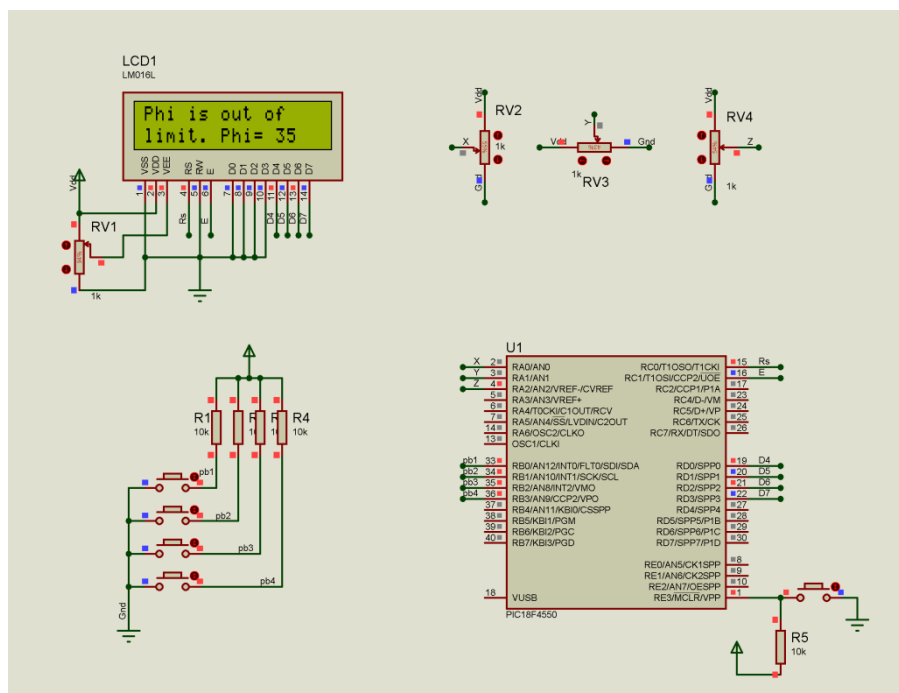
Εικόνα 4.16 Εμφάνιση γωνιών Roll, Pitch, Yaw



Εικόνα 4.17 Πλαγιάζοντας τον αισθητήρα στον άξονα χ.



Εικόνα 4.18 Πλαγιάζοντας τον αισθητήρα στον άξονα y.



Εικόνα 4.19 Πλαγιάζοντας τον αισθητήρα στον άξονα z.

4.6 Λειτουργία κατασκευής

Αφότου έχουμε σχεδιάσει το κύκλωμα το επόμενο βήμα ήταν να γράψουμε το πρόγραμμα για τον μικροελεγκτή και ύστερα να προσομοιώσουμε την κατασκευή στο πρόγραμμα Proteus για να βεβαιώσουμε ότι όλα λειτουργούν σωστά πριν προχωρήσουμε στο κατασκευαστικό κομμάτι. Έπειτα, προγραμματίσαμε τον μικροελεγκτή και κατασκευάσαμε την πλακέτα PCB. Στην συνέχεια κολλήθηκαν επάνω στην πλακέτα όλα εξαρτήματα. Το τελευταίο βήμα της διαδικασίας είναι να

Κεφάλαιο 4

βάλουμε και να στερεώσουμε την κατασκευή μέσα σε μία θήκη και να δούμε την λειτουργία της. Η τελική μορφή της κατασκευής καθώς και η λειτουργίας της φαίνονται στις παρακάτω εικόνες.

Αρχικά, με την έναρξη της λειτουργίας της κατασκευής πρέπει να πατήσουμε το κουμπί RESET για την αρχικοποίηση των παραμέτρων.



Εικόνα 4.20 Έναρξη λειτουργίας κατασκευής.

Πατώντας το κουμπί Euler, η κατασκευή εμφανίζει στην οθόνη τις γωνίες R = roll P = pitch Yaw = yaw.



Εικόνα 4.21 Εμφάνιση γωνιών Euler

Πατώντας το κουμπί Φ , Θ , Ψ στην οθόνη εμφανίζονται οι γωνίες $T = \Theta$, $P_s = \Psi$, $P = \Phi$.



Εικόνα 4.22 Εμφάνιση γωνιών Φ , Θ , Ψ

Πατώντας το κουμπί X, Y, Z εμφανίζονται οι τιμές για τις συντεταγμένες X, Y, Z.



Εικόνα 4.23 Εμφάνιση συντεταγμένων x, y, z

Κεφάλαιο 4

Πατώντας το κουμπί RAW στην οθόνη εμφανίζονται τα raw data που μας δίνει το αισθητήριο σε Volt.



Εικόνα 4.24 Εμφάνιση raw data.

Πλαγιάζοντας τον αισθητήρα στον άξονα χ στην οθόνη αναγράφεται το μήνυμα Theta is out of limit. Theta =.



Εικόνα 4.25 Πλαγιάζοντας τον αισθητήρα στον άξονα χ .

Πλαγιάζοντας τον αισθητήρα στον άξονα γ στην οθόνη αναγράφεται το μήνυμα Psy is out of limit. Psy =.



Εικόνα 4.26 Πλαγιάζοντας τον αισθητήρα στον άξονα y.

Πλαγιάζοντας τον αισθητήρα στον άξονα z στην οθόνη αναγράφεται το μήνυμα Phi is out of limit. Phi =.



Εικόνα 4.27 Πλαγιάζοντας τον αισθητήρα στον άξονα z.

Παρατηρώντας όλα τα παραπάνω και συγκρίνοντας την λειτουργία της κατασκευής με την προσομοίωση της λειτουργίας της, βλέπουμε ότι είναι απόλυτα ίδιες και μπορούμε να βγάλουμε το ασφαλές συμπέρασμα ότι όλα έχουν γίνει και λειτουργούν σωστά.

5. Συμπεράσματα

5.1 Πεδίο εφαρμογής

Το επιταχυνσιόμετρο τριών αξόνων μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην βιομηχανία για την αξιολόγηση και την παρακολούθηση περιστρεφόμενων μηχανολογικών εξοπλισμών όπως είναι οι στρόβιλοι τα ρουλεμάν, τα γρανάζια και οι μειωτήρες. Πιο συγκεκριμένα η μέθοδος αυτή ονομάζεται vibration analysis. Τοποθετώντας σε ένα μηχανολογικό εξοπλισμό το επιταχυνσιόμετρο που έχουμε κατασκευάσει μπορούμε να λάβουμε την ταυτότητα σήματος – συχνοτήτων και να την αναλύσουμε.

Για παράδειγμα, κατά την λειτουργία ενός στρόβιλου για πρώτη φορά αφότου αυτός κατασκευάστηκε, μπορούμε να πάρουμε μετρήσεις των δονήσεων που προκαλούνται από την περιστροφική του κίνηση και να τις καταγράψουμε. Έτσι έχουμε την αρχική ταυτότητα του σήματος του και της εύρυθμης λειτουργίας του. Έπειτα, ανά κάποια χρονικά διαστήματα μπορούμε να λάβουμε και πάλι μετρήσεις για να ανιχνεύσουμε κάποια τυχόν μεταβολή. Όταν παρατηρηθούν αυτές οι μεταβολές και μετρηθούν οι αποκλίσεις από τα αρχικά μας σήματα μπορούμε να καταλάβουμε εάν υπάρχει κάποιο σφάλμα και εάν ο εξοπλισμός χρειάζεται κάποια επισκευή είτε ακόμη και αντικατάσταση.

Επίσης, η κατασκευή μας έχει την δυνατότητα να μας ειδοποιεί με σχετικό μήνυμα όταν η κλίση υπερβεί τις 30 μοίρες. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές εντοπισμού κλίσης κυρίως σε φορτηγά. Όταν τα βαρέα φορτηγά μεταφέρουν εμπορεύματα, μπορεί να προκύψουν επικίνδυνες ανισοροπίες, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν στην ολίσθηση των εμπορευμάτων ή ακόμη και στην ανατροπή των οχημάτων. Για να αποφευχθεί αυτό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το επιταχυνσιόμετρο τριών αξόνων που δημιουργήσαμε και το οποίο καταγράφει την κλίση και μας ειδοποιεί όταν η κλίση είναι μεγαλύτερη από 30 μοίρες.

5.2 Βελτιώσεις κατασκευής

Από τα παραπάνω μπορούμε να διαπιστώσουμε την ορθή λειτουργία τόσο του υλικού μέρους της κατασκευής όσο και του λογισμικού της. Ωστόσο η κατασκευή επιδέχεται βελτιώσεις.

Στο κομμάτι των περιφερειακών που την απαρτίζουν, θα ήταν προτιμότερο να γινόταν χρήση μίας μεγαλύτερης οθόνης, για παράδειγμα μίας LCD 20x4 έτσι ώστε να μπορούν να προβληθούν καλύτερα οι πληροφορίες στην οθόνη. Επίσης, θα μπορούσε να έχει προστεθεί ένα micro SD card reader έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης των δεδομένων. Ακόμη θα μπορούσε να προστεθεί κάποιο κουδούνι το οποίο θα χτυπούσε για να ειδοποιήσει στην περίπτωση μεγάλης κλίσης, ή κάποιο LED που θα αναβόσβηνε.

Στο κομμάτι του λογισμικού, θα μπορούσε να γραφτεί πρόγραμμα καταγραφής των τιμών σε σύνδεση με τον υπολογιστή και τέλος θα μπορούσε να είχε υπολογιστεί και η τιμή G.

5.3 Επίλογος

Στην εργασία αυτή σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε μία κατασκευή ενός επιταχυνσιόμετρου τριών αξόνων. Η εργασία αυτή απαιτούσε γνώση αρκετών αντικειμένων αφού συνδυάζει την υλοποίηση κατασκευής με την ανάπτυξη λογισμικού. Τα αντικείμενα αυτά είναι η γνώση σχεδίασης και κατασκευής PCB και η γνώση ανάπτυξης λογισμικού για μικροελεγκτές καθώς και ο προγραμματισμός τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλία

- [3] Ασύρματη καταγραφή κίνησης χεριού Νικόλαος Γ. Κωνσταντακόπουλος. Πτυχιακή εργασία Τμήματος Μηχανικών Ηλεκτρονικών ΑΤΕΙ Πειραιά 2008.
- [5] Κατασκευή συστήματος ανίχνευσης συμπεριφοράς βαδίσματος με χρήση συσκευής κινητού τηλεφώνου Σαντορινιάος Χριστόδουλος. Διπλωματική εργασία Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Πολυτεχνικής Σχολής Πατρών 2020.
- [6] Handbook of modern sensors Jacob Fraden, San Diego CA Springer 2004
- [8] Επίβλεψη υγείας περιστρεφόμενων μερών με επιταχυνσιόμετρο Α. Ρούσσοις. Διπλωματική εργασία Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αθήνα 2021
- [9] Υλοποίηση αναπτύγματος μικροελεγκτή AVR και μελέτη εκπαιδευτικών παραδειγμάτων Νικολαΐδου Ευανθία Πτυχιακή Εργασία Τμήμα μηχανικών πληροφορικής ΤΕΙ κεντρικής Μακεδονίας Σέρρες 2016
- [11] Οργάνωση και σχεδίαση υπολογιστών Πογαρίδης Δημήτριος Θεσσαλονίκη 2020
- [12] Microcontrollers Fundamentals and Applications with PIC Fernando E. Valdez-Perez Ramon Ramon Pallas-Areny Florida 2009
- [21] Εισαγωγή στους μικροελεγκτές PIC Ιωάννης Καλομοίρος Σερρες 2015

Internet Site

- [1] ΒΙΚΙΠΑΙΔΕΙΑ επιτάχυνση.
Available: <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CF%80%CE%B9%CF%84%CE%AC%CF%87>
- [2] ΒΙΚΙΠΑΙΔΕΙΑ Επιτάχυνση της βαρύτητας
Available:
https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CF%80%CE%B9%CF%84%CE%AC%CF%87%CF%85%CE%BD%CF%83%CE%B7_%CF%84%CE%B7%CF%82_%CE%B2%CE%B1%CF%81%CF%8D%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1%CF%82
- [4] Wikipedia Accelerometer
Available
<https://en.wikipedia.org/wiki/Accelerometer>
- [10] elprocus Microcontrollers types and applications
<https://www.elprocus.com/microcontrollers-types-and-applications/>
- [13] Onmyphd Analog to digital converter
Available
<http://www.onmyphd.com/?p=analog.digital.converter>
- [14] Dewesoft Types of ADC convertes
Available

<https://dewesoft.com/daq/types-of-adc-converters>

[15] kinect joint rotation pitch yaw roll

Available

https://www.pngitem.com/middle/hRhbhm_kinect-joint-rotation-pitch-yaw-roll-unity-hd/

[16] A typical Accelerometer layout.

Available

https://www.researchgate.net/figure/A-typical-Accelerometer-layout_fig6_299511206

[17] How stuff works, Accelerometer

Available

<https://www.explainthatstuff.com/accelerometers.html>

[18] Researchgate Cross-sectional view of a piezoelectric accelerometer

Available

https://www.researchgate.net/figure/Schematic-cross-sectional-view-of-a-piezoelectric-accelerometer_fig22_283085046

[19] Researchgate A typical MEMS piezoresistive accelerometer

Available

https://www.researchgate.net/figure/A-typical-MEMS-piezoresistive-accelerometer-using-cantilever-design-adapted-from-19_fig28_338697474

[20] Analog Dialog Choosing the Most Suitable MEMS Accelerometer

Available

<https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/choosing-the-most-suitable-mems-accelerometer-for-your-application-part-1.html>

[22] Electronics Hub Basics of Microcontrollers

Available

<https://www.electronicshub.org/microcontrollers-basics-structure-applications/>

[23] elprocus Microcontrollers Types

Available

<https://www.elprocus.com/microcontrollers-types-and-applications/>

[25] Kostas Makris Επιταχυνσιόμετρο

Available

<https://www.k-makris.gr/accelerometer-gr/>

Paper

[7] Choosing the right type of accelerometer TE connectivity 2017

[27] PIC18F4550- A General Overview Bombay 2011

Data Sheet

[24] Analog Devices Accelerometer ADXL 335

[26] Microchip PIC18F2455/2550/4455/4550 Data Sheet

[28] MPLAB X - Using PICkit 3

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ - Κώδικας στον CCS C Compiler

⇒ Ακολουθεί ο βασικός κώδικας του PIC:

```
//https://www.electronicwings.com/pic/accelerometer-adxl335-interfacing-with-pic18f4550  
//https://www.electronicwings.com/sensors-modules/adxl335-accelerometer-module  
//https://simple-circuit.com/pic18f4550-adc-example-ccs-c/
```

```
#include <main-proteus.h>  
#include <flex_lcd-proteus.h> // το h αρχείο του προγράμματος οδήγησης της οθόνης θα  
    // πρέπει να είναι στον ίδιο φάκελο όπου θα αποθηκεύσουμε  
    //το πρόγραμμα μας  
    //θα πρέπει να γίνει έλεγχος και πιθανόν τροποποίηση  
    // στις δηλώσεις #define LCD_DB4 PIN_B4 κλπ που  
    // υπάρχουν στην flex_lcd.c. Με αυτές τις  
    // δηλώσεις καθορίζεται σε ποιους ακροδέκτες του  
    // μικροελεγκτή συνδέεται η οθόνη.  
  
#include <math.h>  
  
#byte PORTB=0xf81 // στην θέση 0xf81 είναι ο καταχωρητής δεδομένων  
    //της πόρτας B  
##byte PORTD=0xf83  
  
int emfanisi=2; //ποιο pb patithike  
int limit=8; //για να min tremopaizoun oi gonies  
int angle_limit=30; //gonia klisis paradeigmatow  
unsigned int16 Xadc, Yadc, Zadc, lastX, lastY, lastZ=0; //για να mhn tremopaizoun oi gonies  
float Vx, Vy, Vz, Xout, Yout, Zout, theta, psy, phi, roll, pitch, yaw;  
  
void read_XYZ(){  
    set_adc_channel(0); // Select channel 0 input  
    delay_ms(2);  
    Xadc=read_adc();  
    //  
    set_adc_channel(1); // Select channel 0 input  
    delay_ms(2);  
    Yadc=read_adc();  
    //  
    set_adc_channel(2); // Select channel 0 input  
    delay_ms(2);  
    Zadc=read_adc();  
    //  
}  
  
void calculations(){  
    if(lastX>Xadc+limit||lastX<Xadc-limit || lastY>Yadc+limit||lastY<Yadc-limit ||  
lastZ>Zadc+limit||lastZ<Zadc-limit){  
        lastX=Xadc;  
        lastY=Yadc;  
        lastZ=Zadc;  
        Vx = ((float)Xadc*5/1024);  
        Vy = ((float)Yadc*5/1024);  
        Vz = ((float)Zadc*5/1024);  
    }
```

```

Xout = (((float)(Xadc*5)/1.024)-1700.0)/330.0;
Yout = (((float)(Yadc*5)/1.024)-1700.0)/330.0;
Zout = (((float)(Zadc*5)/1.024)-1700.0)/330.0;

/* Calculate angles */
theta = atan(Xout/(sqrt((pow (Yout,2.0))+pow (Zout,2.0))))*57.29577951;
psy = atan(Yout/(sqrt((pow (Xout,2.0))+pow (Zout,2.0))))*57.29577951;
phi = atan((sqrt((pow (Yout,2.0))+pow (Xout,2.0)))/Zout)*57.29577951;

roll = (atan2(Yout,Zout))*57.29577951+180;
pitch = (atan2(Zout,Xout))*57.29577951+180;
yaw = (atan2(Xout,Yout))*57.29577951+180;
}
}

void check_push_button(){
  if(input(PIN_B0) == 0) {
    delay_ms(50);          // Καθυστέρηση 50 ms για αποφυγή φαινόμενου αναπηδήσεων
    while(input(PIN_B0) == 0) {;}          //Αναμονή έως ότου αφηθεί το
    μπουτόν
    emfanisi=0;
    delay_ms(50);
  }
  else if(input(PIN_B1) == 0) {
    delay_ms(50);          // Καθυστέρηση 50 ms για αποφυγή φαινόμενου αναπηδήσεων
    while(input(PIN_B1) == 0) {;}          //Αναμονή έως ότου αφηθεί το
    μπουτόν
    emfanisi=1;
    delay_ms(50);
  }
  else if(input(PIN_B2) == 0) {
    delay_ms(50);          // Καθυστέρηση 50 ms για αποφυγή φαινόμενου αναπηδήσεων
    while(input(PIN_B2) == 0) {;}          //Αναμονή έως ότου αφηθεί το
    μπουτόν
    emfanisi=2;
    delay_ms(50);
  }
  else if(input(PIN_B3) == 0) {
    delay_ms(50);          // Καθυστέρηση 50 ms για αποφυγή φαινόμενου αναπηδήσεων
    while(input(PIN_B3) == 0) {;}          //Αναμονή έως ότου αφηθεί το
    μπουτόν
    emfanisi=3;
    delay_ms(50);
  }
}

void print_to_lcd(){
  if (emfanisi==0){
    printf(lcd_putc,"X=%3Lu",Xadc);
    printf(lcd_putc," Y=%3Lu",Yadc);
    printf(lcd_putc,"\nZ=%3Lu",Zadc);
  }
  else if(emfanisi==1){
    printf(lcd_putc,"%0.2fVx",Vx);
  }
}

```

```

    printf(lcd_putc, ", %.2fVy", Vy);
    printf(lcd_putc, "\n%.2fVz", Vz);
}
else if(emfanisi==2){ // theta, psy, phi
    printf(lcd_putc, "T=%.30f", theta);
    printf(lcd_putc, "\nP=%.30f", psy);
    printf(lcd_putc, "P=%.30f", phi);
}
else if(emfanisi==3){ //roll, pitch, yaw
    printf(lcd_putc, "R=%.30f", roll);
    printf(lcd_putc, "\nP=%.30f", pitch);
    printf(lcd_putc, "Yaw=%.30f", yaw);
}
}

void main() {
    set_tris_b(0xFF);
    lcd_init();          // αρχικοποίηση της οθόνης
    lcd_putc("\f");     // καθαρισμός της οθόνης
    lcd_gotoxy(1,1);    // η οθόνη θα εμφανίσει στην 3η θέση της 1ης γραμμής
    lcd_putc(" 3 axis app"); // εμφανίζεται το μήνυμα στην θέση που
                          // ορίστηκε από την προηγούμενη εντολή
    lcd_gotoxy(1,2);    // η οθόνη θα εμφανίσει στην 4η θέση της 2ης γραμμής
    lcd_putc(" Mantiou V."); // εμφανίζονται οι αστερίσκοι στην θέση που καθορίστηκε
                          // από την προηγούμενη εντολή
    delay_ms(15000);
    setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_8); // Set ADC conversion time to 8Tosc
    setup_adc_ports(AN0_TO_AN2);

    while(TRUE) {
        delay_ms(1000);
        lcd_putc("\f"); // καθαρισμός της οθόνης
        lcd_gotoxy(1,1);

        read_XYZ();

        calculations();

        if(theta>angle_limit||theta<(angle_limit*(-1))){
            printf(lcd_putc, "Theta is out of\nlimit. Theta=%.30f", theta);
        }
        else if(psy>angle_limit||psy<(angle_limit*(-1))){
            printf(lcd_putc, "Psy is out of\nlimit. Psy=%.30f", psy);
        }
        else if(phi>angle_limit||phi<(angle_limit*(-1))){
            printf(lcd_putc, "Phi is out of\nlimit. Phi=%.30f", phi);
        }
        else{
            check_push_button();
            print_to_lcd();
        }
    } // τέλος του προγράμματος, εκτελείται συνεχώς ένας βρόχος
} // κλείνει η αγκύλη του main

```

⇒ Ακολουθεί ο κώδικας του **main-proteus.h**:

```
#include <18F4550.h>
#DEVICE HIGH_INTS=TRUE
#device icd=2
#device adc=10

#FUSES NOWDT //No Watch Dog Timer
#FUSES WDT32768 //Watch Dog Timer uses 1:128 Postscale
#FUSES HSPLL //High Speed Crystal/Resonator with PLL enabled
#FUSES NOPROTECT //Code not protected from reading
#FUSES BROWNOUT //No brownout reset
//#FUSES BORV20 //Brownout reset at 2.0V
#FUSES NOPUT //No Power Up Timer
#FUSES NOCPD //No EE protection
#FUSES STVREN //Stack full/underflow will cause reset
#FUSES NODEBUG //No Debug mode for ICD
#FUSES NOLVP //No low voltage prgming, B3(PIC16) or B5(PIC18) used for I/O
#FUSES NOWRT //Program memory not write protected
#FUSES NOWRTD //Data EEPROM not write protected
#FUSES NOIESO //Internal External Switch Over mode enabled
#FUSES NOFCMEN //Fail-safe clock monitor enabled
#FUSES NOPBADEN //PORTB pins are configured as analog input channels on RESET
#FUSES NOWRTC //configuration not registers write protected
#FUSES NOWRTB //Boot block not write protected
#FUSES NOEBTR //Memory not protected from table reads
#FUSES NOEBTRB //Boot block not protected from table reads
#FUSES NOCPB //No Boot Block code protection
#FUSES MCLR //Master Clear pin enabled
#FUSES NOLPT1OSC //Timer1 configured for low-power operation
#FUSES NOXINST //Extended set extension and Indexed Addressing mode disabled
(Legacy mode)
#FUSES PLL5 //Divide By 12(48MHz oscillator input)
#FUSES CPUDIV1 //System Clock by 2
#FUSES USBDIV //USB clock source comes from PLL divide by 2
#FUSES VREGEN //USB voltage regulator enabled
//#FUSES ICPRT //ICPRT enabled
#FUSES WRTB
#FUSES NOICPRT
#FUSES NOLPT1OSC
#FUSES CCP2B3
#FUSES NOCPB
#FUSES NOCPD
#FUSES NOWRTC
#FUSES NOWRTD
#FUSES NOEBTR
#FUSES NOEBTRB

/* system clock is 48 MHz */
#use delay(clock=2000000,RESTART_WDT)
/* --- BEGIN: changes required for bootloader ----- */
```

```

/* ----- */
/* map reset vector and interrupt vector */
/* 0x000-0x7FF is used by the bootloader. The bootloader maps the original */
/* reset vecotr (0x000) to 0x800 and the reset vector (0x008) to 0x800. */
/* ----- */
#build (reset=0x000, interrupt=0x008)

/* ----- */
/* reserve boot block area */
/* This memory range is used by the bootloader, so the application must not */
/* use this area. */
/* ----- */
//#org 0 , 0x000 { }

/* --- END: changes required for bootloader ----- */

```

⇒ Ακολουθεί ο κώδικας του `flex_lcd-proteus.h`:

```

//-----
#define LCD_DB4 PIN_D0
#define LCD_DB5 PIN_D1
#define LCD_DB6 PIN_D2
#define LCD_DB7 PIN_D3

#define LCD_E PIN_C1
#define LCD_RS PIN_C0
//#define LCD_RW PIN_B1
#define lcd_type 2 // 0=5x7, 1=5x10, 2=2 lines
#define lcd_line_two 0x40 // LCD RAM address for the 2nd line
int8 const LCD_INIT_STRING[4] =
{
0x20 | (lcd_type << 2), // Func set: 4-bit, 2 lines, 5x8 dots
0xc, // Display on
1, // Clear display
6 // Increment cursor
};
//=====
void lcd_send_nibble(int8 nibble);
void lcd_send_byte(int8 address, int8 n);
void lcd_init(void);
void lcd_gotoxy(int8 x, int8 y);
void lcd_putc(char c);
//=====
//-----
void lcd_send_nibble(int8 nibble)
{
// Note: !! converts an integer expression
// to a boolean (1 or 0).
output_bit(LCD_DB4, !(nibble & 1));
output_bit(LCD_DB5, !(nibble & 2));
output_bit(LCD_DB6, !(nibble & 4));
output_bit(LCD_DB7, !(nibble & 8));
}

```

```

delay_cycles(20);
output_high(LCD_E);
delay_us(50);
output_low(LCD_E);
}

//-----
// This sub-routine is only called by lcd_read_byte().
// It's not a stand-alone routine. For example, the
// R/W signal is set high by lcd_read_byte() before
// this routine is called.

//-----
// Send a byte to the LCD.
void lcd_send_byte(int8 address, int8 n)
{
output_low(LCD_RS);

if(address)
    output_high(LCD_RS);
else
    output_low(LCD_RS);

delay_cycles(10);

output_low(LCD_E);

lcd_send_nibble(n >> 4);
lcd_send_nibble(n & 0xf);
}

//-----
void lcd_init(void)
{
int8 i;

output_low(LCD_RS);

output_low(LCD_E);
//output_low(LCD_RW);
delay_ms(10);

for(i=0 ;i < 3; i++)
{
    lcd_send_nibble(0x03);
    delay_ms(2);
}

lcd_send_nibble(0x02);

for(i=0; i < sizeof(LCD_INIT_STRING); i++)
{
    lcd_send_byte(0, LCD_INIT_STRING[i]);
}

```

```

// If the R/W signal is not used, then
// the busy bit can't be polled. One of
// the init commands takes longer than
// the hard-coded delay of 60 us, so in
// that case, lets just do a 5 ms delay
// after all four of them.

delay_ms(1);
}

}

//-----

void lcd_gotoxy(int8 x, int8 y)
{
int8 address;

if(y != 1)
    address = lcd_line_two;
else
    address=0;

address += x-1;
lcd_send_byte(0, 0x80 | address);
}

//-----
void lcd_putc(char c)
{
switch(c)
{
case '\f':
    lcd_send_byte(0,1);
    delay_ms(1);
    break;

case '\n':
    lcd_gotoxy(1,2);
    break;

case '\b':
    lcd_send_byte(0,0x10);
    break;

default:
    lcd_send_byte(1,c);
    break;
}
}

//-----

```