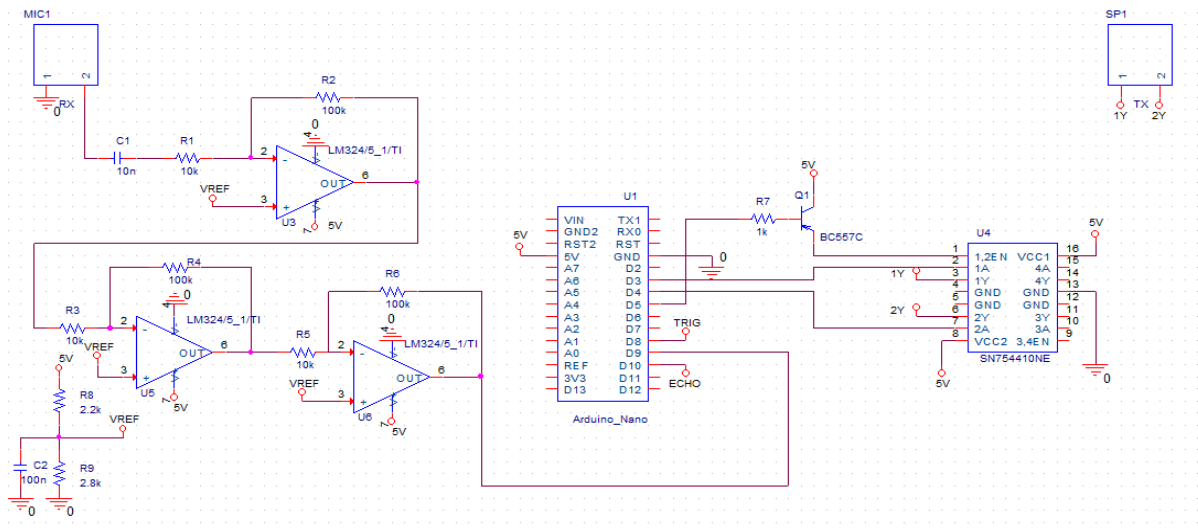




ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη, σχεδίαση και κατασκευή υπερηχητικού
αισθητήρα μέτρησης απόστασης



Του φοιτητή
Ζαχαρία Δημήτριου
Αρ. Μητρώου: 515033

Επιβλέπων
Γιακουμής Άγγελος
Επίκουρος Καθηγητής

Ημερομηνία 12/09/2025

Τίτλος Π.Ε.: Μελέτη, σχεδίαση και κατασκευή υπερηχητικού αισθητήρα για μέτρηση απόστασης

Κωδικός Π.Ε.: 24254

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: Ζαχαρίας Δημήτριος

Όνοματεπώνυμο εισηγητή: Γιακουμής Άγγελος

Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε.: 09/10/24

Ημερομηνία περάτωσης Π.Ε. 12/09/25

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

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

Πρόλογος

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των σπουδών μου στο πρώην Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών Τ.Ε. του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος (πρώην Α.Τ.Ε.Ι.Θ.) και αφορά τη μελέτη, σχεδίαση και υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου συστήματος μέτρησης απόστασης μέσω υπερηχητικών κυμάτων.

Η επιλογή του συγκεκριμένου θέματος βασίστηκε στο αυξανόμενο ενδιαφέρον που παρουσιάζει η τεχνολογία των υπερήχων στις σύγχρονες εφαρμογές ρομποτικής, αυτοματισμού και «έξυπνων» συστημάτων, καθώς και στη δυνατότητά μου να συνδυάσω και να αναπτύξω τις γνώσεις που έχω αποκτήσει στον τομέα των μικροελεγκτών και των αναλογικών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Μέσα από τη διαδικασία αυτή, επιδιώκεται η δημιουργία μιας ολοκληρωμένης διάταξης που θα αξιοποιεί τόσο τις θεωρητικές βάσεις της ακουστικής όσο και τις πρακτικές αρχές του σχεδιασμού και της υλοποίησης ηλεκτρονικών συστημάτων.

Η εργασία στοχεύει στην κατανόηση και πρακτική εφαρμογή των αρχών λειτουργίας των υπερηχητικών αισθητήρων, μέσα από την ανάπτυξη ενός πρωτότυπου χαμηλού κόστους συστήματος που μπορεί να αποτελέσει βάση για περαιτέρω βελτιώσεις και μελλοντικές εφαρμογές.

Περίληψη

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία μελετάται, σχεδιάζεται και υλοποιείται ένα ολοκληρωμένο σύστημα μέτρησης απόστασης με υπερηχητικά κύματα, το οποίο αναπαράγει τη λειτουργική αρχή εμπορικών αισθητήρων τύπου HC-SR04. Η μεθοδολογία βασίζεται στη μέτρηση του χρόνου πτήσης (Time-of-Flight) υπερηχητικού παλμού στα 40 kHz και στον υπολογισμό της απόστασης με αναφορά στην ταχύτητα διάδοσης του ήχου. Το σύστημα αποτελείται από κύκλωμα εκπομπής με οδηγό H-bridge (SN754410NE) για την παραγωγή διπολικού σήματος ~ 10 V_{p-p}, ζεύγος μετατροπέων TR40-16 (πομπός/δέκτης) και τριβάθμιο κύκλωμα λήψης με τελεστικούς ενισχυτές LM324 σε αναστρέφουσα συνδεσμολογία και κατάλληλη DC πόλωση για λειτουργία με απλή τροφοδοσία. Ο έλεγχος, ο χρονισμός και η επεξεργασία του σήματος (Trig/Echo) υλοποιούνται σε Arduino Nano (ATmega328P) με παραγωγή συμπληρωματικών παλμών burst 8 κύκλων στα 40 kHz. Πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις σε πρωτότυπο breadboard, οι οποίες επιβεβαιώνουν την ορθή διαμόρφωση του παλμού Echo και την ακριβή απόδοση της απόστασης σε μικρές και μεσαίες αποστάσεις.

Study, Design, and Implementation of an Ultrasonic Distance Measurement Sensor

Dimitrios Zacharias

Abstract

This thesis presents the study, design, and implementation of a complete ultrasonic distance measurement system, replicating the operating principle of commercial HC-SR04 sensors. The methodology relies on measuring the time-of-flight (ToF) of a 40 kHz ultrasonic pulse and calculating distance with reference to the speed of sound. The system consists of a transmission circuit employing an H-bridge driver (SN754410NE) to generate a bipolar signal of approximately 10 V_{p-p}, a pair of TR40-16 transducers (transmitter/receiver), and a three-stage reception circuit with LM324 operational amplifiers in inverting configuration and appropriate DC biasing for single-supply operation. Control, timing, and signal processing (Trig/Echo) are implemented on an Arduino Nano (ATmega328P), which generates complementary 8-cycle burst pulses at 40 kHz. Experimental measurements conducted on a breadboard prototype confirm the correct formation of the Echo pulse and the accurate distance estimation for short and medium ranges.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Γιακουμή Άγγελο, για την καθοδήγηση, τη βοήθεια και τις χρήσιμες συμβουλές του σε όλη τη διάρκεια της πτυχιακής μου εργασίας.

Ευχαριστώ επίσης την οικογένειά μου για τη συνεχή υποστήριξη και κατανόησή τους, καθώς και τους φίλους και συμφοιτητές μου για την ενθάρρυνση και τη συμπαράστασή τους.

Με εκτίμηση,
Ζαχαρίας Δημήτριος

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	iii
Περίληψη	iv
Abstract.....	v
Ευχαριστίες	vi
Περιεχόμενα	vii
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή	9
Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό Υπόβαθρο	10
2.1 Αρχές λειτουργίας υπερηχητικών αισθητήρων	10
2.2 Μικροελεγκτές	11
2.2.1 Εισαγωγή στους Μικροελεγκτές.....	11
2.2.2 Αναπτυξιακές πλατφόρμες μικροελεγκτών (Development boards)	14
2.3 Ηλεκτρονικά κυκλώματα για μέτρηση απόστασης μέσω υπερήχων.....	15
2.3.1 Κυκλώματα εκπομπής υπερηχητικού σήματος.....	15
2.3.2 Κυκλώματα λήψης υπερηχητικού σήματος.....	20
Κεφάλαιο 3ο: Μελέτη – Σχεδίαση Συστήματος.....	27
3.1 Εισαγωγή	27
3.2 Μελέτη λειτουργίας HC – SR04	27
3.3 Απαραίτητα υλικά για τη σχεδίαση και κατασκευή του κυκλώματος.....	29
3.3.1 Αναπτυξιακή πλατφόρμα Arduino	29
3.3.2 Ολοκληρωμένο κύκλωμα H-Bridge – SN754410NE.....	31
3.3.3 Τελεστικός Ενισχυτής LM324	32
3.3.4 Υπερηχητικοί μετατροπείς TR40-16.....	33
3.4 Σχεδιασμός κυκλώματος.....	35
Κεφάλαιο 4ο: Υλοποίηση - Κατασκευή	37
Κεφάλαιο 5ο: Δοκιμές – Μετρήσεις.....	39
5.1 Εισαγωγή	39
5.2 Δοκιμές πομπού H – bridge	39
5.3 Συνολική Λειτουργία Αισθητήρα.....	41
5.4 Μετρήσεις Απόστασης	44
Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα ή/και προτάσεις βελτίωσης	46
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	47
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΚΩΔΙΚΑΣ	48

A.1 Κώδικας Arduino για βασική μέτρηση απόστασης (ενδείκνυται και για χρήση με HC-SR04) .	48
A.2 Κώδικας Arduino υπερηχητικού αισθητήρα για μέτρηση απόστασης	49

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

Η ακριβής μέτρηση αποστάσεων είναι αναγκαία σε μεγάλο πλήθος εφαρμογών, από την ανίχνευση εμποδίων έως και την υλοποίηση προηγμένων συστημάτων αυτοματισμού και ρομποτικής. Η χρήση υπερηχητικών αισθητήρων έχει καθιερωθεί ως μια αξιόπιστη και οικονομικά προσιτή λύση αφού συνδυάζει απλότητα υλοποίησης με ικανοποιητική ακρίβεια μέτρησης. Οι αισθητήρες αυτοί εκπέμπουν και λαμβάνουν σήματα υπερήχων και στη συνέχεια υπολογίζουν τον **χρόνο διάδοσής τους (Time of Flight)**, έτσι ώστε να προσδιοριστεί η απόσταση ενός αντικειμένου από τον πομπό.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως σκοπό τη μελέτη, σχεδίαση και κατασκευή ενός συστήματος μέτρησης απόστασης μέσω υπερήχων από την αρχή. Το σύστημα αυτό θα μπορεί να εκπέμπει μια σειρά υπερηχητικών παλμών, να ανιχνεύει το ανακλώμενο σήμα και τέλος να επεξεργάζεται το σήμα αυτό ώστε να προσδιορίζεται με ακρίβεια η απόσταση του αντικειμένου.

Στόχος της εργασίας αυτής είναι η ανάπτυξη μιας χαμηλού κόστους διάταξης, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα εφαρμογών όπως:

- ρομποτικά συστήματα πλοήγησης
- ανίχνευση και αποφυγή εμποδίων
- βιομηχανικούς αυτοματισμούς
- μέτρηση στάθμης υγρών σε δεξαμενές
- εφαρμογές «έξυπνων» συσκευών και συστημάτων IoT

Η γενική ιδέα της μελέτης βασίζεται στην υλοποίηση ενός συστήματος που συνδυάζει ηλεκτρονικά κυκλώματα εκπομπής και λήψης υπερηχητικών σημάτων και ενός μικροελεγκτή που θα είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο και την επεξεργασία των σημάτων αυτών.

Συνολικά η εργασία στοχεύει να παρουσιάσει όλα τα στάδια ανάπτυξης ενός τέτοιου συστήματος, από τη θεωρητική της μελέτη, τη σχεδίαση μέχρι και τη κατασκευή της.

Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό Υπόβαθρο

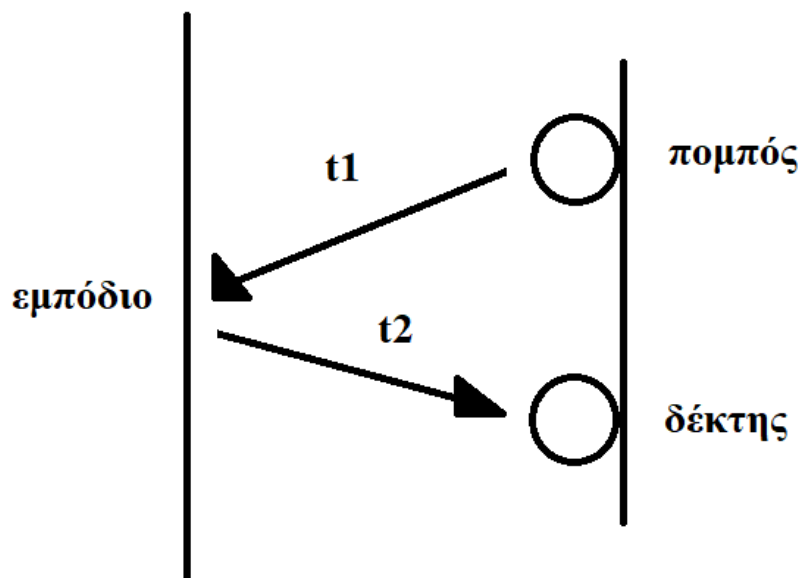
2.1 Αρχές λειτουργίας υπερηχητικών αισθητήρων

Οι αισθητήρες υπερήχων είναι διατάξεις μέτρησης απόστασης που χρησιμοποιούν ηχητικά κύματα συχνότητας υψηλότερης του ακουστικού φάσματος του ανθρώπου (πάνω από 20kHz) μέσω των οποίων είναι σε θέση να προσδιορίσουν την απόσταση ενός αντικειμένου.

Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη **μέτρηση του χρόνου** που απαιτείται ώστε ένα εκπεμπόμενο υπερηχητικό κύμα να διανύσει την απόσταση από τον πομπό προς ένα αντικείμενο, να **ανακλαστεί** από το ίδιο το αντικείμενο και να επιστρέψει πίσω στο δέκτη. Η μέθοδος αυτή είναι ευρέως γνωστή ως **Time of Flight (ToF)**. Ο μικροελεγκτής ή το συνοδευτικό ηλεκτρονικό κύκλωμα μετρά τον **χρόνο t** μεταξύ εκπομπής και λήψης του σήματος και γνωρίζοντας την ταχύτητα διάδοσης του ήχου στον αέρα υπολογίζει την απόσταση με τη σχέση:

$$d = \frac{ct}{2} \quad (2.1)$$

όπου **d** είναι η **απόσταση** του αντικειμένου από τον αισθητήρα, **c** η **ταχύτητα** του ήχου στον αέρα (περίπου 343 m/s σε θερμοκρασία 20°C) και **t** ο **συνολικός χρόνος διαδρομής του κύματος**. Επίσης ο παράγοντας 1/2 εισάγεται επειδή ο μετρούμενος χρόνος περιλαμβάνει τόσο την προώθηση όσο και την επιστροφή του σήματος έπειτα από την ανάκλαση [3].



Εικόνα 2.1: Θεωρητική αναπαράσταση του φαινομένου της ανάκλασης

Στη διάδοση των υπερηχητικών κυμάτων ισχύουν όλα τα φαινόμενα της ακουστικής όπως: **ανάκλαση**, **διάθλαση** και **περίθλαση**. Στην Εικόνα 2.1 φαίνεται ένα θεωρητικό παράδειγμα **ανάκλασης** ενός σήματος και ο διαχωρισμός του συνολικού **χρόνου t**, σε **t1** και **t2** (χρόνος προώθησης και επιστροφής του σήματος).

Σημαντικό θα ήταν επίσης να αναφερθεί πως η ταχύτητα του ήχου δεν είναι πάντα σταθερή αλλά εξαρτάται από περιβαλλοντικές συνθήκες. Κυρίως από τη θερμοκρασία και σε μικρότερο βαθμό από την υγρασία και την ατμοσφαιρική πίεση [3]. Για παράδειγμα, η ταχύτητα του ήχου σε **θερμοκρασία θ** (σε °C) μπορεί να προσεγγιστεί από τη σχέση:

$$c = 331 + 0,6\theta \text{ (m/s)} \quad (2.2)$$

Συνεπώς, σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια, ενδείκνυται η αντιστάθμιση της ταχύτητας του ήχου με βάση τις τρέχουσες περιβαλλοντικές συνθήκες.

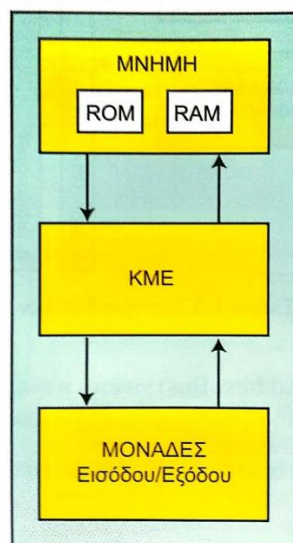
2.2 Μικροελεγκτές

Ένας **μικροελεγκτής (Microcontroller Unit – MCU)** μπορεί να αποτελέσει βασικό κομμάτι σε μια διάταξη σαν αυτή που εξετάζεται, διότι με τον κατάλληλο προγραμματισμό μπορεί να παράξει παλμούς χρήσιμους για τη τροφοδότηση των υπερηχητικών πομπών καθώς και να υπολογίσει με ακρίβεια τον **χρόνο πτήσης (Time of Flight)** του σήματος μέχρι αυτό να γίνει αντιληπτό από τον δέκτη.

2.2.1 Εισαγωγή στους Μικροελεγκτές

Η εισαγωγή αυτή μπορεί να ξεκινήσει ορίζοντας πως ένας **μικροελεγκτής** αποτελεί ουσιαστικά ένα υπολογιστικό σύστημα. Ως **υπολογιστικό σύστημα** ορίζεται το σύνολο του **υλικού (Hardware)** και του **λογισμικού (Software)**, τα οποία συνεργάζονται για την επεξεργασία δεδομένων και την παραγωγή αποτελεσμάτων. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στην εικόνα 2.2 το **υλικό κομμάτι** ενός υπολογιστικού συστήματος αποτελείται από τρία μέρη:

1. **Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας(KME)**
2. **Μνήμη**
3. **Κυκλώματα Ελέγχου Εισόδου/Εξόδου(Input/Output-I/O)**



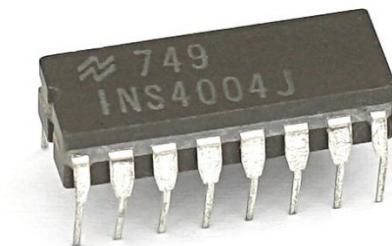
Εικόνα 2.2: Δομή ενός υπολογιστικού συστήματος [5].

Με τον όρο **επεξεργαστή (Central Processing Unit - CPU)** αναφερόμαστε συνήθως στη **Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας (ΚΜΕ)** που είναι το κυριότερο μέρος ενός υπολογιστικού συστήματος, η ΚΜΕ αποτελείται από τη **μονάδα ελέγχου (Control Unit – CU)**, την **αριθμητική και λογική μονάδα (Arithmetic and Logic Unit - ALU)** και από **καταχωρητές (Registers)**.

Η **μνήμη** μπορεί να χωριστεί σε **RAM (Random Access Memory)** και **ROM (Read Only Memory)**.

Ενώ τέλος οι **μονάδες εισόδου/εξόδου (I/O Controllers)** αποτελούν ηλεκτρονικά υποσυστήματα που επιτρέπουν την επικοινωνία ενός υπολογιστικού συστήματος με τις **συσκευές εισόδου/εξόδου (I/O Devices)**. Τέτοια υποσυστήματα μπορεί να είναι οι **χρονιστές/μετρητές (Timers/Counters)**, **μετατροπείς αναλογικών σημάτων σε ψηφιακό (ADC – Analog to Digital Converter)**, **μετατροπείς ψηφιακών σημάτων σε αναλογικό (DAC – Digital to Analog Converter)** καθώς και οι **δίαυλοι επικοινωνίας (UART, SPI, I²C, CAN κ.ά.)** για επικοινωνία με άλλες συσκευές ή υποσυστήματα.

Αν ένα σύστημα σαν αυτό που εξηγήθηκε παραπάνω χρησιμοποιεί για **ΚΜΕ** έναν **μικροεπεξεργαστή**, το σύστημα αυτό ονομάζεται **μικροϋπολογιστικό σύστημα**.



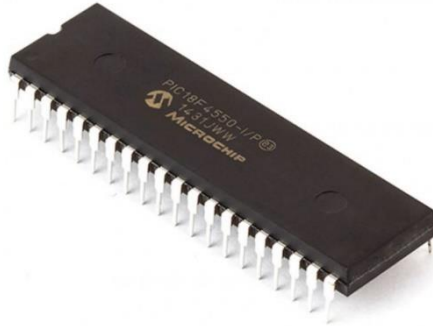
Εικόνα 2.3: Μικροεπεξεργαστής Intel 4004

Ένας **μικροεπεξεργαστής** πρόκειται ουσιαστικά για μια **ΚΜΕ** αποτελούμενη ακριβώς από ότι κάθε επεξεργαστής (CU, ALU, καταχωρητές) με την μόνη διαφορά όμως πως είναι εξ' ολοκλήρου υλοποιημένη σε ένα **ολοκληρωμένο κύκλωμα (Integrated Circuit – IC)**. Ένας τέτοιος μικροεπεξεργαστής απεικονίζεται στην Εικόνα 2.3 και πρόκειται για τον πρώτο ολοκληρωμένο μικροεπεξεργαστής που έχει ποτέ κατασκευαστεί, καθώς κυκλοφόρησε το **1971** από την εταιρία **Intel** με ονομασία **Intel 4004**.

Συχνά οι έννοιες του **μικροεπεξεργαστή** και του **μικροελεγκτή** συγχέονται, όμως ο μικροελεγκτής αποτελεί μια διακριτή κατηγορία καθώς ενσωματώνει σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα όχι μόνο τη **μονάδα επεξεργασίας** αλλά και **μνήμη** και **κυκλώματα ελέγχου εισόδου/εξόδου** [6].

Ένας μικροελεγκτής συνεπώς είναι ένα ενσωματωμένο υπολογιστικό σύστημα. Το γεγονός πως έχει όλα τα μέρη του ενσωματωμένα σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα έχει ως αποτέλεσμα οι δυνατότητες

του να είναι περιορισμένες σε σχέση με έναν μικροεπεξεργαστή. Ένας μικροεπεξεργαστής θεωρείται ως ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα **γενικού σκοπού**, σε αντίθεση με τον μικροελεγκτή που θεωρείται ολοκληρωμένο κύκλωμα **ειδικού σκοπού**. Τα κυκλώματα ειδικού σκοπού και ειδικότερα οι μικροελεγκτές είναι σχεδιασμένα για συγκεκριμένες εφαρμογές ελέγχου όπως σε συσκευές, αυτοκίνητα, IoT, βιομηχανία. Ένας μικροελεγκτής σαν αυτούς που εξετάζονται παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.4 και πρόκειται για τον **PIC18F4550** της **Microchip Technology**.



Εικόνα 2.4: Μικροελεγκτής PIC18F4550

Οι δυνατότητες ενός μικροελεγκτή μπορεί να είναι περιορισμένες σε σχέση με αυτές του μικροεπεξεργαστή, όμως σε πολλές εφαρμογές που δεν είναι αναγκαία η πολύ μεγάλη επεξεργαστική δύναμη ένας μικροελεγκτής είναι η καταλληλότερη επιλογή.

Ένας μικροελεγκτής αποτελεί μια πολύ φθηνή, εύκολη και γρήγορη λύση για εφαρμογές όπως συστήματα συναγερμών, οικιακών συσκευών, ηλεκτρικά συστήματα αυτοκινήτου, κλιματιστικά και πολλά άλλα. Ένας μικροεπεξεργαστής δεν αποτελεί την καταλληλότερη επιλογή για εφαρμογές όπως οι παραπάνω λόγω **κόστους, όγκου, υψηλής κατανάλωσης και έλλειψης φορητότητας**, καθώς ο μικροελεγκτής έχει την δυνατότητα να τροφοδοτείται από **μπαταρία** σε αντίθεση με ένα μικροεπεξεργαστή.

Η λειτουργία του μικροελεγκτή βασίζεται στην εκτέλεση ενός συγκεκριμένου **προγράμματος**, το οποίο καθορίζει τη συμπεριφορά του. Μέσω αυτού έχει τη δυνατότητα να **ελέγχει τις αναλογικές και ψηφιακές εισόδους** του, να επεξεργάζεται τα δεδομένα που λαμβάνει από αυτές και τέλος να **παράγει** τα αντίστοιχα αποτελέσματα στις εξόδους του. Το γεγονός αυτό κάνει τον μικροελεγκτή ιδανικό για χρήση σε συνδυασμό με αναλογικά ή ψηφιακά κυκλώματα.

2.2.2 Αναπτυξιακές πλατφόρμες μικροελεγκτών (Development boards)

Τα τελευταία χρόνια ο προγραμματισμός και η χρήση μικροελεγκτών έχει γίνει πολύ πιο εύκολη με την ύπαρξη των **αναπτυξιακών πλατφόρμων (Development boards)**. Οι αναπτυξιακές πλατφόρμες είναι **πλακέτες (Printed Circuit Boards - PCBs)** οι οποίες ενσωματώνουν τόσο τον μικροελεγκτή καθώς και τα απαραίτητα κυκλώματα υποστήριξης και περιφερειακά για να χρησιμοποιηθούν άμεσα από οποιοδήποτε χρήστη επιθυμεί να προγραμματίσει και να χρησιμοποιήσει τον μικροελεγκτή. Ο κύριος ρόλος τους είναι να προσφέρουν ένα εύχρηστο και έτοιμο προς χρήση περιβάλλον, χωρίς να απαιτείται η σχεδίαση και υλοποίηση όλης της υποστηρικτικής ηλεκτρονικής υποδομής από το μηδέν.

Ενδεικτικά αναφέρονται βασικά κυκλώματα υποστήριξης και περιφερειακά που υπάρχουν συνήθως σε μια αναπτυξιακή πλατφόρμα:

- **Κυκλώματα τροφοδοσίας:** Ρυθμιστές τάσης, κυκλώματα διαχείρισης πολλαπλών πηγών τροφοδοσίας.
- **Διεπαφή USB:** Υποστήριξη τροφοδοσίας μέσω USB και USB to Serial μετατροπέας για άμεση επικοινωνία και προγραμματισμό μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή.
- **Ακροδέκτες/header pins:** Ακροδέκτες για εύκολη πρόσβαση σε GPIO, τροφοδοσία και διαύλους επικοινωνίας.
- **Ενδεικτικά LEDs:** Power και User LED για βασικό έλεγχο λειτουργίας.
- **Κουμπί Reset:** Παρέχει την επιλογή για άμεση επανεκκίνηση του μικροελεγκτή.

Ενώ κάποιες πιο εξειδικευμένες αναπτυξιακές πλατφόρμες μπορεί να παρέχουν ακόμα και επιλογές **ασύρματης επικοινωνίας (Wi-Fi, Bluetooth), επέκτασης μνήμης (SD card slot)** κ.α.

Παρακάτω, στον Πίνακα 2.1 γίνεται σύγκριση μεταξύ γνωστών αναπτυξιακών πλατφόρμων και παρουσιάζονται μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά τους.

Development Board	Μικροελεγκτής	CPU	Μνήμη (RAM / Flash)	Επικοινωνίες	Τάση λειτουργίας
Arduino Uno R3	ATmega328P (8-bit AVR)	16 MHz	2 KB RAM / 32 KB Flash	UART, SPI, I ² C	5V
Arduino Mega 2560	ATmega2560 (8-bit AVR)	16 MHz	8 KB RAM / 256 KB Flash	4× UART, SPI, I ² C	5V
Arduino Nano	ATmega328P (8-bit AVR)	16 MHz	2 KB RAM / 32 KB Flash	UART, SPI, I ² C	5V
ESP32 DevKit	Tensilica Xtensa LX6 (32-bit dual-core)	έως 240 MHz	~520 KB RAM / 4 MB Flash	UART, SPI, I ² C, I ² S, CAN, Wi-Fi, Bluetooth	3.3V
STM32 Nucleo-F446RE	STM32F446RE (ARM Cortex-M4, 32-bit)	έως 180 MHz	128 KB RAM / 512 KB Flash	UART, SPI, I ² C, CAN, USB, Ethernet	3.3V
Raspberry Pi Pico	RP2040 (ARM Cortex-M0+, dual-core)	έως 133 MHz	264 KB RAM / 2 MB Flash	UART, SPI, I ² C, USB	3.3V

Πίνακας 2.1: Σύγκριση χαρακτηριστικών αναπτυξιακών πλατφορμών.

2.3 Ηλεκτρονικά κυκλώματα για μέτρηση απόστασης μέσω υπερήχων

Τα αναλογικά ηλεκτρονικά κυκλώματα σε μια διάταξη μέτρησης απόστασης με υπερήχους μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τα κυκλώματα που εξασφαλίζουν τη σωστή **εκπομπή** του υπερηχητικού σήματος, ενώ η δεύτερη αφορά τα κυκλώματα που **επεξεργάζονται** κατάλληλα το λαμβανόμενο σήμα, πριν αυτό οδηγηθεί στον μικροελεγκτή. Συνεπώς, τα κυκλώματα που θα αναλυθούν στη συνέχεια διακρίνονται σε κυκλώματα **εκπομπής** και **λήψης**.

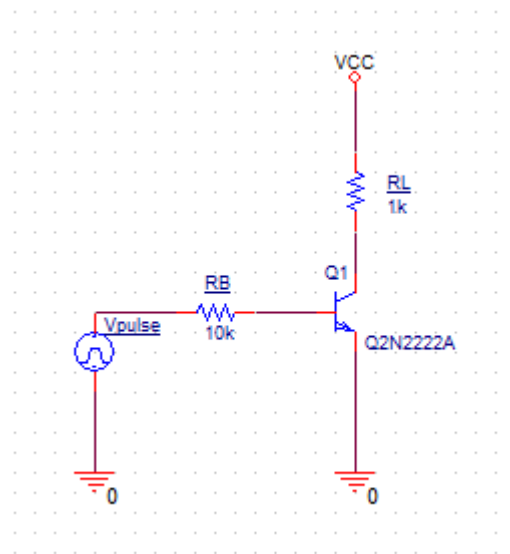
2.3.1 Κυκλώματα εκπομπής υπερηχητικού σήματος

Η εκπομπή υπερηχητικών σημάτων σε μια διάταξη μέτρησης απόστασης απαιτεί την τροφοδότηση του πομπού με σήματα επαρκούς πλάτους. Για την επίτευξη αυτού του στόχου μπορούν να χρησιμοποιηθούν διατάξεις με τρανζίστορ σε συνδυασμό (H-bridge). Στα επόμενα υποκεφάλαια παρουσιάζονται οι βασικές αρχές.

2.3.1.1 Το τρανζίστορ ως διακόπτης

Προκειμένου να γίνει κατανοητή η διαδικασία τροφοδότησης ενός **υπερηχητικού πομπού** μέσω ενός μικροελεγκτή είναι απαραίτητο να εξεταστεί αρχικά η λειτουργία του **τρανζίστορ (Bipolar Junction Transistor – BJT)** ως διακόπτη.

Ένα διακοπτικό κύκλωμα με τρανζίστορ αποτελεί μια σχετικά απλή διάταξη για να σχεδιαστεί, ενώ παράδειγμα του κυκλώματος αυτού παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.6 όπως σχεδιάστηκε στο **Pspice**. Στο κύκλωμα αυτό το φορτίο R_L συνδέεται με τον συλλέκτη του **NPN τρανζίστορ** και έχει ως αναφορά τη **τάση τροφοδοσίας** (συνδεσμολογία sink) [2]. Στη βάση του τρανζίστορ χρησιμοποιούνται παλμοί ελέγχου μέσω της πηγής **Vpulse** προκειμένου να ελέγχεται η κατάσταση του διακόπτη (Ανοιχτός/Κλειστός). Ενώ το κύκλωμα περιλαμβάνει και μια αντίσταση βάσης R_B η οποία καθορίζει το ρεύμα βάσης I_B του τρανζίστορ. Ο **εκπομπός** του BJT συνδέεται με τη γείωση.



Εικόνα 2.6: Διακοπτικό κύκλωμα με το τρανζίστορ 2N2222A στο Pspice.

Σε τέτοιου είδους διακοπτικά κυκλώματα με τρανζίστορ, μια συνήθης τακτική είναι να επιλέγεται αντίσταση βάσης **δέκα φορές μεγαλύτερη** από το φορτίο έτσι ώστε να εξασφαλισθεί πως όταν ο παλμός ελέγχου είναι HIGH, το τρανζίστορ θα βρίσκεται στην περιοχή **σκληρού κόρου** και δεν θα είναι εύκολη η μετακίνηση του σημείου λειτουργίας Q από αυτή, ακόμα και αν αλλάξουν κάποιοι εξωτερικοί παράμετροι όπως για παράδειγμα η θερμοκρασία περιβάλλοντος [1].

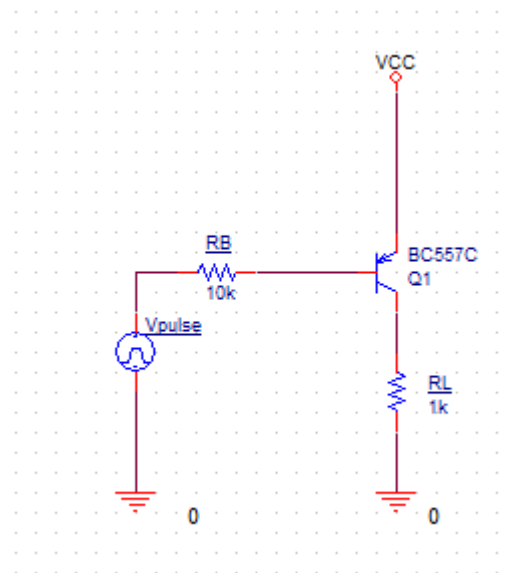
Στη διακοπτική λειτουργία του τρανζίστορ, το BJT θα πρέπει να εναλλάσσεται μεταξύ των περιοχών **αποκοπής (Cut off)** και **κόρου (Saturation)**, όπου όταν βρίσκεται στην αποκοπή ο διακόπτης θα είναι ανοιχτός, ενώ αντίθετα όταν βρίσκεται στη περιοχή του κόρου ο διακόπτης θα είναι κλειστός και άρα το BJT θα άγει. Για να βρεθεί το τρανζίστορ στη περιοχή του κόρου θα πρέπει να τηρείται η συνθήκη $V_{BE} \geq 0,7V$ ενώ όταν η συνθήκη αυτή δεν τηρείται το BJT θα βρίσκεται στην αποκοπή.

Για την ανάλυση του κυκλώματος αυτού, απαιτείται η εξέτασή του σε **δύο καταστάσεις**. Η πρώτη κατάσταση όταν ο παλμός ελέγχου **Vpulse** είναι **LOW** ενώ η δεύτερη όταν αυτός θα είναι **HIGH**. Για τη πλήρη κατανόηση, θεωρούμε ότι η τάση των παλμών ελέγχου V_{pulse} έχει τιμή $HIGH = 3,3 V$ και $LOW = 0 V$, ενώ η τάση τροφοδοσίας είναι $VCC = 3,3 V$. Στην περίπτωση που ο παλμός ελέγχου

βρίσκεται στη στάθμη LOW, η τάση στη βάση του τρανζίστορ είναι 0 V και συνεπώς δεν ικανοποιείται η συνθήκη $V_{BE} \geq 0,7 \text{ V}$. Το τρανζίστορ βρίσκεται στην περιοχή της αποκοπής και συμπεριφέρεται ως ανοικτός διακόπτης. Ως αποτέλεσμα, η διαφορά τάσης στο φορτίο είναι μηδενική και δεν διαρέεται απο ρεύμα.

Αντιθέτως όταν ο παλμός ελέγχου είναι HIGH, η συνθήκη $V_{BE} \geq 0,7\text{V}$ ικανοποιείται και το τρανζίστορ άγει (κλειστός διακόπτης). Η διαφορά τάσης ($V_{\text{pulse}} - V_{BE} = 2.6\text{V}$) εμφανίζεται στην αντίσταση R_B και καθορίζει το ρεύμα βάσης I_B . Στη περίπτωση αυτή το ρεύμα διαρέει μέσω του φορτίου και του κλειστού διακόπτη (που σχηματίζεται μεταξύ συλλέκτη και εκπομπού) και κατευθύνεται προς τη γείωση. Η πτώση τάσης στο φορτίο θα είναι $V_{CC} - V_{CE(\text{sat})}$ όπου $V_{CE(\text{sat})} \approx 0.3\text{V}$.

Με την ίδια σχεδιαστική λογική μπορεί να σχεδιαστεί ένα διακοπτικό κύκλωμα με **PNP τρανζίστορ**, όπως αυτό που παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.7.



Εικόνα 2.7: Διακοπτικό κύκλωμα με το PNP τρανζίστορ BC557C στο Pspice.

Σε αντίθεση με το κύκλωμα που εξετάστηκε προηγουμένως, το φορτίο σε αυτή τη περίπτωση έχει ως **αναφορά τη γείωση** (συνδεσμολογία source) [2], ενώ ο **εκπομπός** είναι συνδεδεμένος με τη τάση τροφοδοσίας VCC. Ο ρόλος της αντίστασης βάσης R_B παραμένει ίδιος με του διακοπτικού κυκλώματος με τρανζίστορ NPN.

Για να άγει ένα τρανζίστορ PNP και επομένως να βρεθεί σε κατάσταση κόρου, θα πρέπει να ισχύει η συνθήκη **$V_{EB} \geq 0.7\text{V}$** .

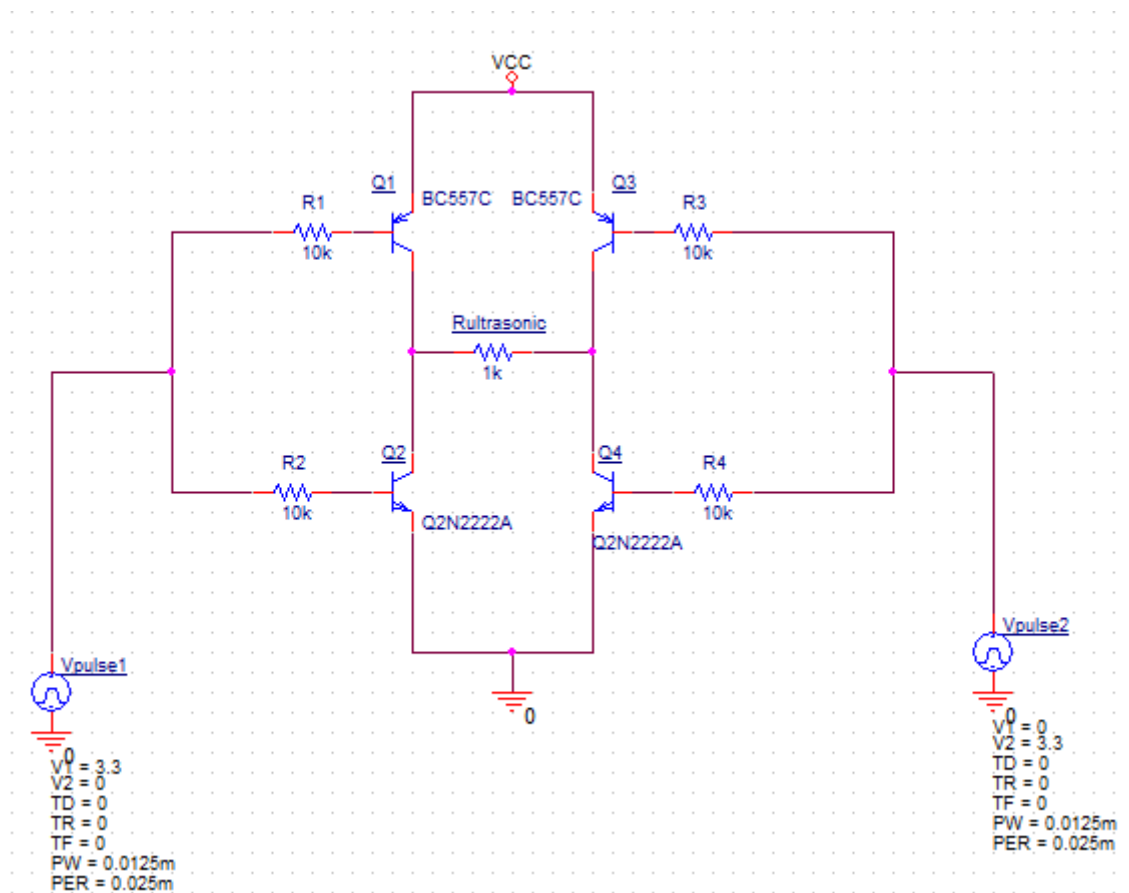
Αν εξεταστούν με τον ίδιο τρόπο οι δύο καταστάσεις του BJT σύμφωνα με τους παλμούς ελέγχου, προκύπτει πως:

Όταν ο παλμος ελέγχου V_{pulse} βρίσκεται σε στάθμη LOW, ισχύει πως $V_{\text{pulse}} < V_{CC} - V_{BE}$ (ικανοποιείται η συνθήκη $V_{EB} \geq 0.7\text{V}$), άρα το τρανζίστορ άγει και βρίσκεται στη περιοχή του κόρου. Αντιθέτως όταν ο παλμός ελέγχου βρίσκεται στη στάθμη HIGH, ισχύει $V_{\text{pulse}} > V_{CC} - V_{BE}$ και το τρανζίστορ βρίσκεται στην αποκοπή.

Συνεπώς προκύπτει ότι η λειτουργία ενός τρανζίστορ PNP παρουσιάζει αντίστροφη λογική σε σχέση με εκείνη ενός NPN.

2.3.1.2 Κύκλωμα H-bridge

Τα κυκλώματα **H-Bridge** αποτελούν συνδυασμό των διακοπτικών κυκλωμάτων με NPN και PNP τρανζίστορ που εξετάστηκαν στο υποκεφάλαιο 2.3.1.1. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε διατάξεις ελέγχου της φοράς περιστροφής ηλεκτρικών κινητήρων, αν και όπως θα παρουσιαστεί στο παρόν υποκεφάλαιο μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε άλλες εφαρμογές. Η ονομασία τους προέρχεται από το χαρακτηριστικό σχήμα του κυκλώματος το οποίο θυμίζει το γράμμα «H» όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.8.



Εικόνα 2.8: Προσομοίωση H-bridge στο Pspice

Ένα κύκλωμα H-bridge αποτελείται από τέσσερα BJT σε διακοπτική λειτουργία (2 NPN και 2 PNP) τα οποία είναι τοποθετημένα σε διάταξη ώστε να ανοίγουν και να κλείνουν διαγώνια σε ζεύγη, επιτρέποντας στο ρεύμα να κινείται και προς τις δύο κατευθύνσεις μέσω του φορτίου, ανάλογα με τα σήματα ελέγχου **Vpulse1** και **Vpulse2**. Το φορτίο **Rultrasonic** μπορεί να θεωρηθεί για τις ανάγκες της εργασίας αυτής πως είναι ένας **υπερηχητικός πομπός**, αλλά στη πραγματικότητα θα μπορούσε να είναι οποιοδήποτε στοιχείο όπως για παράδειγμα ένας ηλεκτροκινητήρας. Τα σήματα ελέγχου **Vpulse1** και **Vpulse2** είναι αναγκαίο να είναι **συμπληρωματικά** μεταξύ τους, έτσι ώστε να διασφαλισθεί η σωστή λειτουργία του κυκλώματος.

Η αρχή λειτουργίας ενός H-bridge βασίζεται στην εναλλαγή καταστάσεων των BJT σε ζευγάρια (Q1 – Q4) και (Q2 – Q3). Στη περίπτωση που τα BJT Q1 - Q4 άγουν (κλειστοί διακόπτες) και τα Q2 - Q3 είναι σε μη αγωγήμη κατάσταση (ανοιχτοί διακόπτες), το ρεύμα θα διαρεύσει από τη πηγή τροφοδοσίας VCC μέσω του Q1 στο φορτίο και έπειτα μέσω του Q4 θα καταλήξει στη γείωση. Στην αντίθετη περίπτωση το ρεύμα θα οδηγηθεί από τη πηγή τροφοδοσίας μέσω του Q3 στο φορτίο και μέσω του Q2 στη γείωση. Συνεπώς με το τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ο έλεγχος της κατεύθυνσης του ρεύματος που διαρέει το φορτίο.

Βάσει των όσων αναλύθηκαν στο υποκεφάλαιο 2.3.1.1, μπορεί να πραγματοποιηθεί η εξής ανάλυση των καταστάσεων του H-bridge:

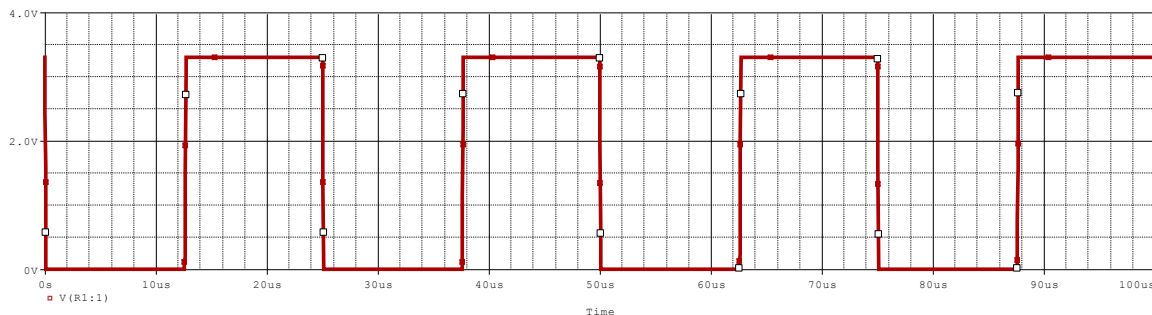
Σε περίπτωση που ισχύει πως $V_{pulse1} = HIGH$ και $V_{pulse2} = LOW$, το PNP τρανζίστορ Q1 θα είναι σε μη αγωγήμη κατάσταση αφού δεν ικανοποιείται η συνθήκη $V_{EB} \geq 0,7V$. Την ίδια στιγμή το NPN τρανζίστορ Q2 θα άγει διότι αντιθέτως ικανοποιείται η συνθήκη $V_{BE} \geq 0,7V$. Με την ίδια λογική φτάνουμε στο συμπέρασμα πως αφού $V_{pulse2} = LOW$, το BJT Q3 θα βρίσκεται σε αγωγήμη κατάσταση ενώ το Q4 σε μη αγωγήμη κατάσταση. Τέλος σε περίπτωση αντιστροφής των σημάτων ελέγχου, αντιστρέφονται αντιστοίχως και οι καταστάσεις των BJT. Η λειτουργία αυτή αποτυπώνεται συνοπτικά στον Πίνακα 2.2, όπου παρουσιάζονται οι καταστάσεις των BJT (ON – αγωγήμη κατάσταση/OFF – μη αγωγήμη κατάσταση) για τις αποδεκτές τιμές των σημάτων ελέγχου.

Vpulse1	Vpulse2	Q1	Q2	Q3	Q4
HIGH	LOW	OFF	ON	ON	OFF
LOW	HIGH	ON	OFF	OFF	ON

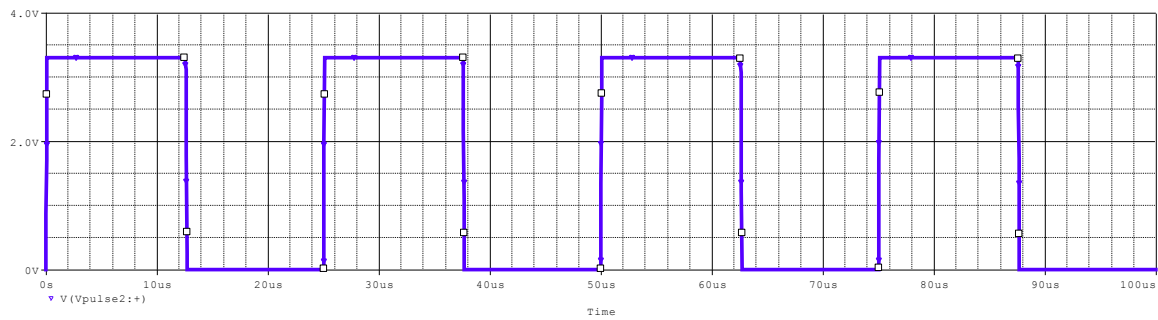
Πίνακας 2.2: Καταστάσεις BJT H-bridge

Συνεπώς αν ένα κύκλωμα H-bridge τροφοδοτηθεί με συμπληρωματικούς παλμούς σε συχνότητα μεγαλύτερη των 20kHz, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την οδήγηση πομπού υπερήχων. Στη πράξη η πλέον διαδεδομένη συχνότητα σε τέτοιες εφαρμογές είναι τα 40kHz. Στη συγκεκριμένη συχνότητα η φορά του ρεύματος αντιστρέφεται 40.000 φορές/δευτερόλεπτο, γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη χρήση BJT ικανών να ανταποκρίνονται σε ταχύτατες μεταβάσεις αγωγήμης και μη αγωγήμης κατάστασης.

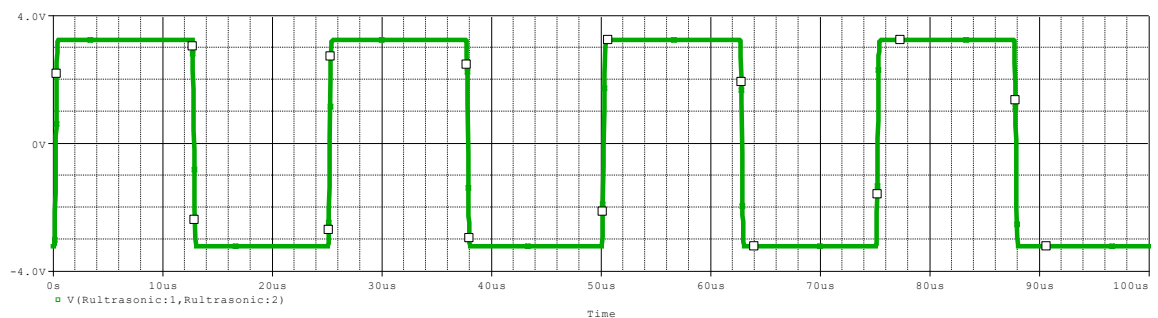
Στις Εικόνες 2.9 και 2.10 παρουσιάζονται οι χρονικές μορφές των παλμών των πηγών V_{pulse1} και V_{pulse2} για συχνότητα λειτουργίας $f = 40\text{ kHz}$, ενώ στην Εικόνα 2.11 απεικονίζεται η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του φορτίου έπειτα από προσομοίωση στο Pspice.



Εικόνα 2.9: Απεικόνιση της χρονικής μορφής του σήματος ελέγχου Vpulse1



Εικόνα 2.10: Απεικόνιση της χρονικής μορφής του σήματος ελέγχου Vpulse2



Εικόνα 2.11: Απεικόνιση της χρονικής μορφής της τάσης στα άκρα του φορτίου

Από την απεικόνιση των κυματομορφών στις Εικόνες 2.9, 2.10 και 2.11 παρατηρείται πως τροφοδοτώντας ένα κύκλωμα H-bridge με παλμούς **θετικών τάσεων** ($0\text{ V} - 3,3\text{V}$) το κύκλωμα είναι σε θέση να παράγει **διπολικό** σήμα με εύρος (V_{pp}) ίσο με $\pm V_{CC}$. Με τον τρόπο αυτό, μέσω δύο συμπληρωματικών παλμών τετραγωνικής μορφής, το H-bridge μετατρέπει την είσοδο σε **εναλλασσόμενο τετραγωνικό** σήμα στα άκρα του φορτίου, κατάλληλο για την **τροφοδότηση** ενός **πομπού υπερήχων**.

2.3.2 Κυκλώματα λήψης υπερηχητικού σήματος

Στα επόμενα υποκεφάλαια παρουσιάζονται και αναλύονται τα κυκλώματα λήψης, με έμφαση στις βαθμίδες **ενίσχυσης** που απαιτούνται ώστε το πολύ μικρό λαμβανόμενο σήμα να καταστεί κατάλληλο για επεξεργασία από μικροελεγκτή.

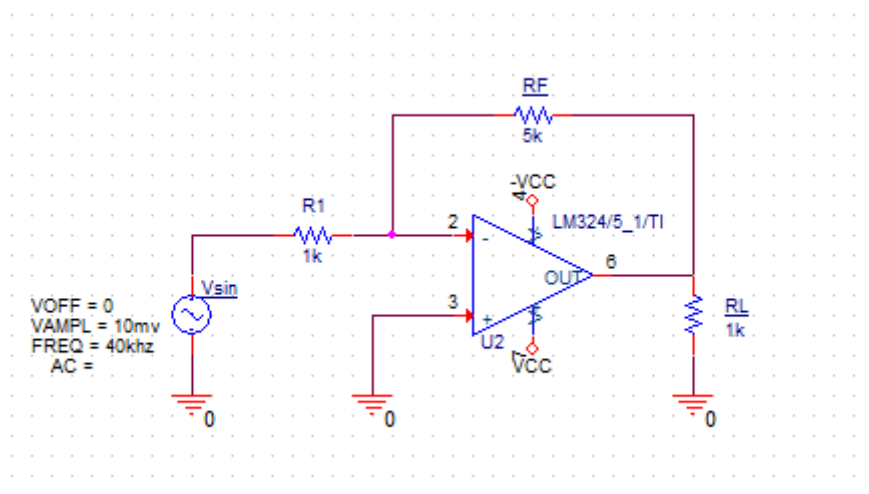
2.3.2.1 Κυκλώματα ενίσχυσης με τελεστικούς ενισχυτές

Σε μία διάταξη μέτρησης απόστασης με υπερήχους, το εκπεμπόμενο υπερηχητικό σήμα συναντά μεγάλες απώλειες σε **πλάτος** από την εκπομπή μέχρι τη λήψη του. Ως αποτέλεσμα ένα εκπεμπόμενο υπερηχητικό σήμα της τάξης μερικών δεκάδων Volt από κορυφή σε κορυφή (V_{pp}) στα άκρα του πομπού, μπορεί να μεταφραστεί σε ένα σήμα της τάξης των μV έως και ελάχιστων mV στον δέκτη. Το

γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια το λαμβανόμενο σήμα να έχει πολύ μικρό πλάτος ώστε να είναι κατάλληλο για επεξεργασία από τον μικροελεγκτή. Επομένως κρίνεται απαραίτητη η κατασκευή ενισχυτικών βαθμίδων για την ενίσχυση του σήματος σε λειτουργικά για τον μικροελεγκτή επίπεδα.

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα αναλυθούν τα κυκλώματα ενίσχυσης με τελεστικούς ενισχυτές (Τ.Ε.) σε **αναστρέφουσα** καθώς και **μη-αναστρέφουσα** συνδεσμολογία. Τα κυκλώματα αυτά χαρακτηρίζονται από μια αντίσταση ανάδρασης συνδεδεμένη μεταξύ της εξόδου και της αναστρέφουσας εισόδου (-) του Τ.Ε. γεγονός που κατατάσσει αυτές τις δύο συνδεσμολογίες στα κυκλώματα **αρνητικής ανάδρασης**. Μέσω της αρνητικής ανάδρασης ορίζεται το **κέρδος κλειστού βρόχου (ACL)**, γεγονός που καθιστά το κύκλωμα ελεγχόμενο και προβλέψιμο καθώς το κέρδος του μπορεί να προσδιοριστεί αποκλειστικά από τις εξωτερικά συνδεδεμένες αντιστάσεις. Ένας ακόμη λόγος που τα κυκλώματα αυτά χρησιμοποιούνται ευρέως για ενίσχυση σημάτων είναι πως λειτουργούν ως **γραμμικοί ενισχυτές**, δηλαδή ενισχύουν το σήμα χωρίς να αλλοιώνουν τη μορφή του, εφόσον δεν υπερβούν τα όρια λειτουργίας του Τ.Ε. [11].

2.3.2.1.1 Αναστρέφουσα συνδεσμολογία Τ.Ε.



Εικόνα 2.12: Κύκλωμα ενίσχυσης Τ.Ε. σε αναστρέφουσα συνδεσμολογία

Στην Εικόνα 2.12 παρουσιάζεται ένα κύκλωμα ενίσχυσης με Τ.Ε. σε αναστρέφουσα συνδεσμολογία, ή απλούστερα ένας **αναστρέφων ενισχυτής**. Το όνομα του προκύπτει από την σύνδεση της γεννήτριας ημιτονικού σήματος V_{sin} στην **αναστρέφουσα είσοδο (-)** του ενισχυτή. Η σύνδεση της γεννήτριας αυτής και επομένως του σήματος εισόδου με την αναστρέφουσα είσοδο του Τ.Ε. γίνεται μέσω της αντίστασης R_1 , ενώ η αντίσταση R_F αποτελεί την αντίσταση ανάδρασης. Η μη – αναστρέφουσα είσοδος είναι γειωμένη, ενώ τέλος η αντίσταση R_L αποτελεί το φορτίο.

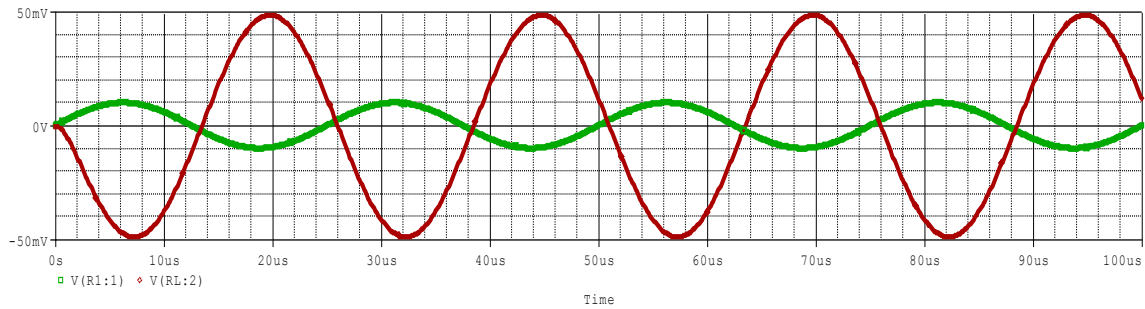
Μέσω της αντίστασης ανάδρασης μπορεί να προσδιοριστεί το κέρδος της διάταξης αυτής, καθιστώντας το έτσι ανεξάρτητο του κέρδους ανοιχτού βρόχου (AOL) του Τ.Ε., που σε ιδανικές συνθήκες θεωρείται **άπειρο**. Επομένως ο προσδιορισμός του κέρδους μέσω της αντίστασης ανάδρασης κρίνεται απαραίτητος τόσο για να εξυπηρετήσει τις ανάγκες κάθε εφαρμογής, όσο για να εξασφαλισθεί η γραμμική λειτουργία του ενισχυτή.

Η λειτουργία ενός αναστρέφων ενισχυτή μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση:

$$A(CL) = -\frac{RF}{R1} \quad (2.3)$$

Όπου οι αντιστάσεις RF και $R1$ καθορίζουν εξ' ολοκλήρου το κέρδος της διάταξης, ενώ το μείον (-) αντιπροσωπεύει την αντιστροφή της φάσης μεταξύ του σήματος εισόδου και εξόδου.

Επομένως στο κύκλωμα της Εικόνας 2.12 με σήμα εισόδου $V_{sin} = 10\text{mV}(\text{peak})$ ο Τ.Ε. αναμένεται να παράξει στην έξοδο του σήμα $V_{RL} = 50\text{mV}(\text{peak})$ και αντιστραμένο κατά 180° σε σχέση με το αρχικό.



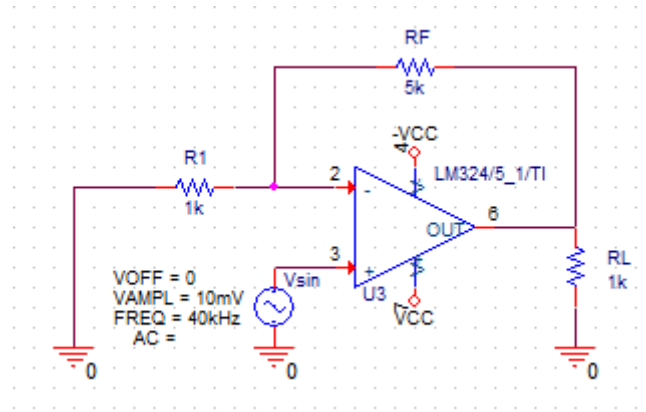
Εικόνα 2.13: Απεικόνιση της χρονικής μορφής των τάσεων εισόδου/εξόδου

Στην Εικόνα 2.13 παρατηρείται γραφική αναπαράσταση της εισόδου και εξόδου του κυκλώματος έπειτα από προσομείωση στο Pspice. Στη προσομείωση αυτή το σήμα εισόδου απεικονίζεται με πράσινο χρώμα ενώ το σήμα εξόδου με κόκκινο. Έτσι γίνεται ξεκάθαρο ότι το **ημιτονοειδές** σήμα που εμφανίστηκε στην αναστρέφουσα είσοδο του Τ.Ε. ενισχύθηκε κατά πέντε φορές, σύμφωνα δηλαδή με τις αντιστάσεις $R1$ και RF και υπέστη μετατόπιση κατά 180° . Τέλος παρατηρείται πως η μορφή του σήματος εισόδου παρέμεινε αναλλοίωτη.

2.3.2.1.2 Μη Αναστρέφουσα συνδεσμολογία Τ.Ε.

Κατά τον ίδιο τρόπο που αναλύθηκε το κύκλωμα του αναστρέφων ενισχυτή, μπορεί να αναλυθεί και ένα κύκλωμα Τ.Ε. σε μη-αναστρέφουσα συνδεσμολογία όπως αυτό της Εικόνας 2.14.

Το κύκλωμα αυτό χρησιμοποιεί τα ίδια βασικά στοιχεία με το κύκλωμα του αναστρέφων ενισχυτή με τη μόνη διαφορά όμως πως το σήμα εισόδου αυτή τη φορά συνδέεται στη **μη-αναστρέφων** είσοδο του ενισχυτή και η αντίσταση $R1$ είναι γειωμένη στο αριστερό της άκρο.

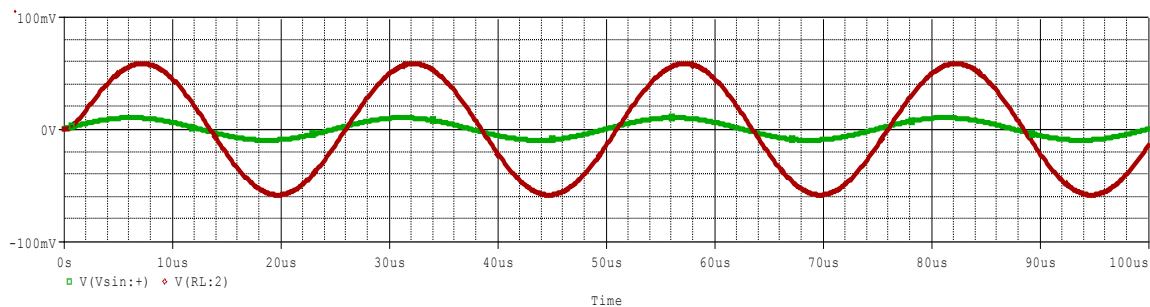


Εικόνα 2.14: Κύκλωμα ενίσχυσης T.E. σε μη-αναστρέφουσα συνδεσμολογία

Μια μεγάλη διαφορά σε σχέση με τον αναστρέφον ενισχυτή, όπως γίνεται κατανοητό και από την ονομασία του κυκλώματος είναι πως, ο **μη αναστρέφον** ενισχυτής παράγει σήμα με μηδενική διαφορά φάσης σε σχέση με αυτό που δέχεται στην είσοδό του. Επίσης, σε αντίθεση με το κύκλωμα του προηγούμενου υποκεφαλαίου ένα κύκλωμα μη αναστρέφον ενισχυτή εκφράζεται από τη σχέση:

$$A(CL) = 1 + \frac{RF}{R1} \quad (2.4)$$

Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι πέρα από τη μη αναστροφή της φάσης, στη συγκεκριμένη συνδεσμολογία ενισχυτή θα παρουσιαστεί κέρδος κατά μία μονάδα υψηλότερο απ' ότι σε έναν αναστρέφον ενισχυτή αν οι αντιστάσεις R1 και RF παραμένουν ίδιες. Η συμπεριφορά αυτή απεικονίζεται στην Εικόνα 2.15 όπου εμφανίζεται απεικόνιση της χρονικής μορφής των τάσεων εισόδου/εξόδου έπειτα από προσομείωση στο Pspice.

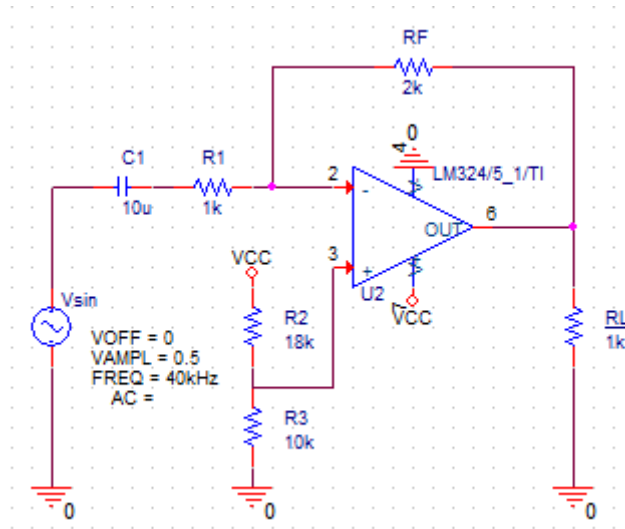


Εικόνα 2.15: Απεικόνιση της χρονικής μορφής των τάσεων εισόδου/εξόδου

2.3.2.1.3 Κυκλώματα ενισχυτών απλής τροφοδοσίας

Τα κυκλώματα ενισχυτών που εξετάστηκαν στα προηγούμενα υποκεφάλαια αποτέλεσαν μια πολύ καλή εισαγωγή στους αναστρέφοντες και μη αναστρέφοντες ενισχυτές, ωστόσο τα κυκλώματα αυτά παρουσιάζουν δυσκολίες στην εφαρμογή τους σε σύγχρονες εφαρμογές, και κατ' επέκταση στο αντικείμενο της πτυχιακής εργασίας αυτής. Αυτό συμβαίνει γιατί τα κυκλώματα των υποκεφαλαίων 2.3.2.1.1 και 2.3.2.1.2 είχαν **συμμετρική τροφοδοσία** ($\pm VCC$) και με αυτόν τον τρόπο ήταν σε θέση να παράγουν θετικές αλλά και αρνητικές κυματομορφές στην έξοδό τους.

Αντιθέτως στις περισσότερες σύγχρονες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα τα συστήματα που βασίζονται σε **μικροελεγκτές**, επιβάλλεται συνήθως ο περιορισμός της απλής (μονοπολικής) τροφοδοσίας, δηλαδή μεταξύ 0 V και VCC.



Εικόνα 2.16: Κύκλωμα αναστρέφων ενισχυτή απλής τροφοδοσίας

Προκειμένου να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα είναι αναγκαίο να εισαχθεί μια **τάση αναφοράς** (V_{ref}) η οποία θα φέρει το σήμα εισόδου εντός των ορίων λειτουργίας του Τ.Ε. ($0\text{ V} - VCC$). Ένα παράδειγμα τέτοιου κυκλώματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.16.

Στο κύκλωμα αυτό παρουσιάζεται ένα κύκλωμα αναστρέφων ενισχυτή **απλής τροφοδοσίας**. Οι κύριες διαφορές σε σχέση με το κύκλωμα αναστρέφων ενισχυτή που παρουσιάστηκε προηγουμένως είναι πως η μη-αναστρέφουσα είσοδος του ενισχυτή δεν είναι γειωμένη αλλά αντιθέτως συνδέεται μέσω ενός διαιρέτη τάσης σε μία τάση αναφοράς (V_{ref}). Επιπλέον στο κύκλωμα αυτό συνδέεται και ένας πυκνωτής C1 σε σειρά με την αντίσταση R1.

Για την ανάλυση του κυκλώματος εφαρμόζεται το θεώρημα της **υπέρθωσης**. Αρχικά η AC πηγή Vsin θεωρείται βραχυκυκλωμένη και ο πυκνωτής C1 ανοιχτό κύκλωμα. Συνεπώς οι αντιστάσεις R1 και RF δεν διαρρέονται από ρεύμα, με αποτέλεσμα ο Τ.Ε. να λειτουργεί ως **ακόλουθος τάσης (buffer)** και το DC κέρδος του κυκλώματος να ισούται με μονάδα [12].

Επομένως, η τάση αναφοράς στην έξοδο του Τ.Ε. θα είναι ίση με τη τάση V_{ref} που εφαρμόζεται στην μη-αναστρέφουσα είσοδο και δίνεται από :

$$V_{ref} = \frac{R_3}{R_2+R_3} V_{CC} \quad (2.5)$$

Συνεχίζοντας την ανάλυση με το θεώρημα της υπέρθεσης, αυτή τη φορά η πηγή V_{CC} θεωρείται βραχυκυκλωμένη και συνεπώς το ίδιο και η μη-αναστρέφουσα είσοδος του Τ.Ε. Σε αυτήν τη περίπτωση η λειτουργία του κυκλώματος εκφράζεται από τη σχέση:

$$Av(AC) = -\frac{RF}{\sqrt{R1^2+XC1^2}} \quad (2.6)$$

Όπου $XC1$ η ισοδύναμη χωρητική αντίσταση του πυκνωτή που βρίσκεται συνδεδεμένος σε σειρά με την αντίσταση $R1$ και επομένως η τιμή του πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον υπολογισμό της απολαβής του συστήματος.

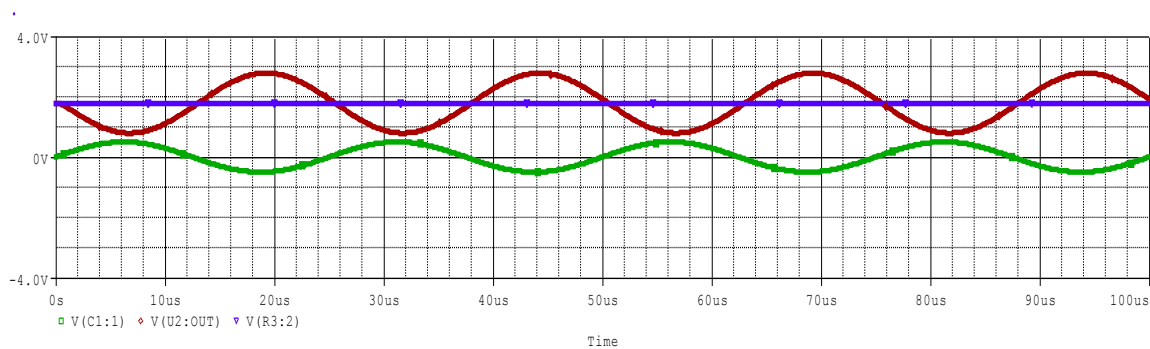
Σε περίπτωση που η ισοδύναμη χωρητική αντίσταση $XC1 \leq 0.1R1$ τότε ο τύπος απλοποιείται σε [12]:

$$Av(AC) = -\frac{RF}{R1} \quad (2.7)$$

Συνοψίζοντας, η DC απολαβή του κυκλώματος ισούται με μονάδα, δηλαδή $AV(DC) = 1$ ενώ η AC απολαβή προκύπτει από τη σχέση (2.6) και ισούται με $AV(AC) \approx 2$. Έτσι όταν στην αναστρέφουσα είσοδο εφαρμοστεί ένα ημιτονοειδές σήμα, στην έξοδο θα προκύψει σήμα ίδιας μορφής, ενισχυμένο με λόγο απολαβής 2 και μετατοπισμένο ως προς τη στάθμη αναφοράς V_{ref} .

Η συμπεριφορά αυτή επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο PSpice (Εικόνα 2.17). Ενώ συνολικά η λειτουργία του κυκλώματος μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση:

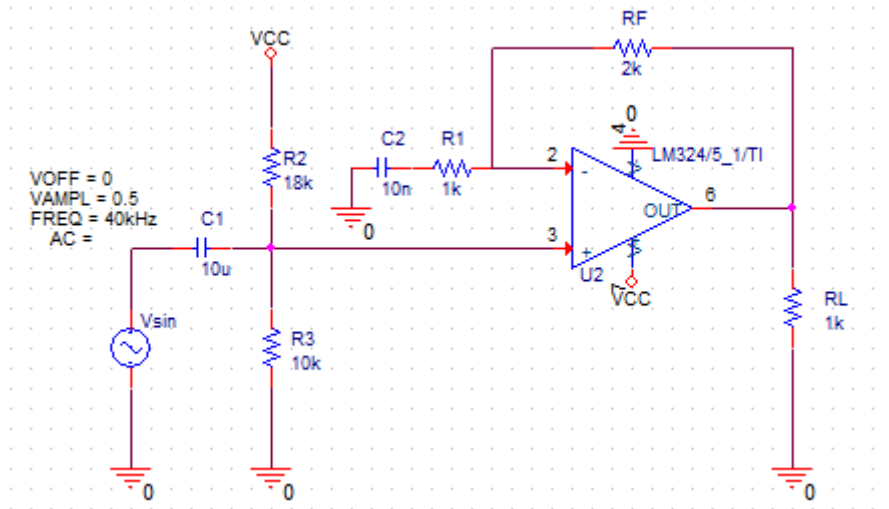
$$V_{out}(t) = -Av(AC) \cdot V_{in} + V_{ref} \quad (2.7)$$



Εικόνα 2.17: Απεικόνιση της χρονικής μορφής των τάσεων εισόδου/εξόδου και V_{ref}

Θεωρητικό Υπόβαθρο

Στην Εικόνα 2.18 παρουσιάζεται η μη-αναστρέφουσα εκδοχή του κυκλώματος απλής τροφοδοσίας που εξετάστηκε προηγουμένως.



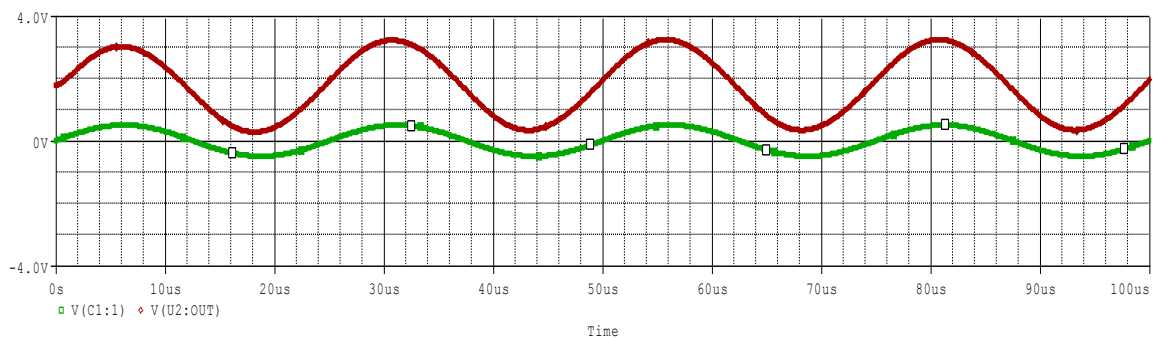
Εικόνα 2.18: Κύκλωμα μη αναστρέφοντος ενισχυτή απλής τροφοδοσίας

Αν εφαρμοσθεί και πάλι το θεώρημα της υπέρθεσης, για τη DC ανάλυση, η AC πηγή V_{sin} θεωρείται βραχυκυκλωμένη και οι πυκνωτές $C1$ και $C2$ ανοιχτά κυκλώματα. Έτσι η αντίσταση R_F δεν διαρρέεται από ρεύμα και η DC απολαβή του κυκλώματος ισούται με μονάδα $A_v(DC) = 1$. Η έξοδος του Τ.Ε. λαμβάνει την τιμή της τάσης αναφοράς V_{ref} , η οποία ορίζεται από τον διαιρέτη τάσης των αντιστάσεων $R2$ και $R3$.

Στη συνέχεια, για την AC ανάλυση του κυκλώματος η πηγή τάσης VCC θεωρείται βραχυκύκλωμένη και οι αντιστάσεις $R2$ και $R3$ παραλληλίζονται. Η ισοδύναμη αντίστασή τους σε συνδυασμό με την ισοδύναμη χωρητική αντίσταση $XC1$ συνεισφέρουν στη μιγαδική αντίσταση εισόδου [12].

Η συμπεριφορά του κυκλώματος στο AC προκύπτει από τη σχέση:

$$A_v(AC) = \left(\frac{\frac{R2R3}{R2+R3}}{\sqrt{\left(\frac{R2R3}{R2+R3}\right)^2 + XC1^2}} \right) \left(1 + \frac{RF}{\sqrt{R1^2 + XC2^2}} \right) \quad (2.8)$$



Εικόνα 2.19: Απεικόνιση της χρονικής μορφής των τάσεων εισόδου/εξόδου

Ενώ η συνολική λειτουργία του καλύπτεται επαρκώς από τη σχέση 2.7 εφόσον αντικατασταθεί σωστά η απολαβή A_v (AC). Τέλος στην Εικόνα 2.19 παρουσιάζονται οι κυματομορφές των τάσεων εισόδου και εξόδου, όπως προέκυψαν από τη προσομείωση της λειτουργίας του κυκλώματος στο Pspice.

Κεφάλαιο 3ο: Μελέτη – Σχεδίαση Συστήματος

3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η μελέτη και ο σχεδιασμός του συστήματος μέτρησης απόστασης με χρήση υπερηχητικών κυμάτων. Αρχικά αναλύεται η αρχή λειτουργίας του εμπορικού αισθητήρα HC-SR04, στη συνέχεια περιγράφονται τα βασικά υλικά και εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη της διάταξης, και τέλος αναπτύσσεται το σχεδιαστικό μέρος του κυκλώματος εκπομπής και λήψης σήματος, όπως αυτό υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της πτυχιακής εργασίας.

3.2 Μελέτη λειτουργίας HC – SR04

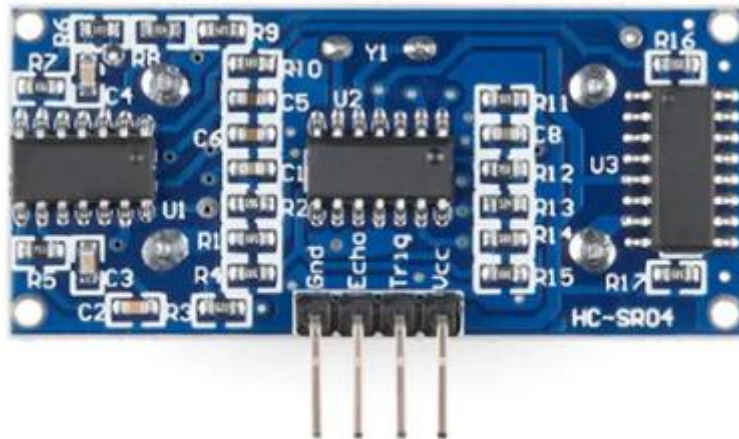
Σε αυτό το υποκεφάλαιο εξετάζεται η λειτουργία του εμπορικού αισθητήρα υπερήχων **HC-SR04** ο οποίος φαίνεται στην Εικόνα 3.1. Ο αισθητήρας αποτελείται από ένα **ολοκληρωμένο κύκλωμα ελέγχου (ASIC)** καθώς και κυκλώματα **εκπομπής** και **λήψης** παρόμοια με εκείνα που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επίσης στην Εικόνα 3.2 παρουσιάζεται η πίσω όψη του αισθητήρα, όπου διακρίνονται τα αντίστοιχα κυκλώματα.

Στόχος της ενότητας είναι η ανάλυση της αρχής λειτουργίας του HC-SR04, καθώς για τη λειτουργία του απαιτείται εξωτερικός σκανδαλισμός και επεξεργασία του παραγόμενου σήματος εξόδου του.



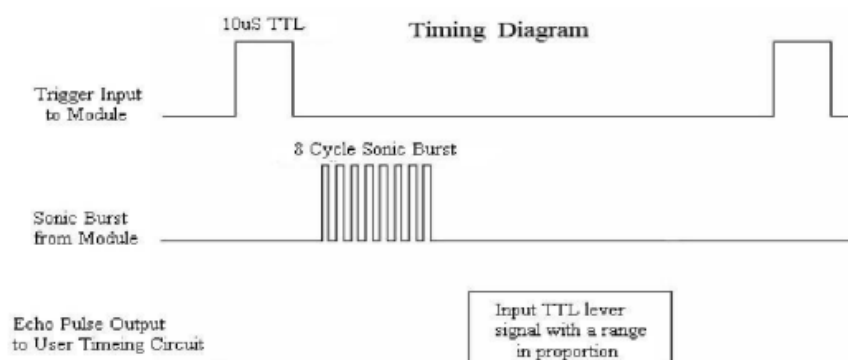
Εικόνα 3.1: Αισθητήρας μέτρησης απόστασης μέσω υπερήχων HC-SR04

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1 ο αισθητήρας HC-SR04 διαθέτει τέσσερις ακροδέκτες (pins) για επικοινωνία με μικροελεγκτή ή αναπτυξιακή πλακέτα, οι οποίοι διακρίνονται σε: **VCC**, **Trig**, **Echo** και **GND**. Οι ακροδέκτες **VCC** και **GND** χρησιμοποιούνται για την **τροφοδοσία** του αισθητήρα, ενώ οι ακροδέκτες **Trig** και **Echo** αντιστοιχούν στην **είσοδο** και **έξοδο** των σημάτων.



Εικόνα 3.2: Πίσω όψη αισθητήρα μέτρησης απόστασης μέσω υπερήχων HC-SR04

Στην Εικόνα 3.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα χρονισμού του αισθητήρα HC-SR04, όπου απεικονίζεται η λειτουργία του. Αρχικά μέσω του ακροδέκτη Trig ο αισθητήρας δέχεται ένα παλμό σκανδαλισμού διάρκειας 10μs, έπειτα και μετά από μια καθυστέρηση της τάξης των 250μs ο αισθητήρας θα εκπέμψει 8 κύκλους υπερηχητικών παλμών στη συχνότητα $f=40\text{kHz}$. Με το πέρας της εκπομπής, ο ακροδέκτης Echo τίθεται σε λογική κατάσταση HIGH και παραμένει εκεί μέχρι να ανιχνευθεί ανακλώμενο σήμα, οπότε και θα επιστρέψει σε κατάσταση LOW. Η διαδικασία αυτή θα επαναληφθεί με τον επόμενο παλμό σκανδαλισμού που θα λάβει ο αισθητήρας.



Εικόνα 3.3: Διάγραμμα χρονισμού αισθητήρα HC-SR04 [13].

Με τη τεχνική αυτή στον ακροδέκτη echo του HC-SR04 δημιουργείται παλμός που αντίστοιχος του χρόνου πτήσης t του υπερηχητικού σήματος, ο οποίος με τη κατάλληλη επεξεργασία μέσω ενός μικροελεγκτή μπορεί να φέρει ως αποτέλεσμα την απόσταση d από κάποιο εμπόδιο, σύμφωνα με τις αρχές λειτουργίας των υπερηχητικών αισθητήρων που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 2.1.

Σημαντικό είναι επίσης να τονιστεί πως για τη σωστή λειτουργία ενός τέτοιου αισθητήρα, δεν είναι δυνατή η συνεχής εκπομπή υπερηχητικών σημάτων. Αντιθέτως, εφαρμόζεται η **τεχνική burst**, κατά την οποία εκπέμπεται μία ακολουθία **πεπερασμένου αριθμού κύκλων**, όπως μπορεί να γίνει αντιληπτό

και από το διάγραμμα της Εικόνας 3.3. Η τεχνική αυτή παρέχει ένα σαφές χρονικό σημείο αναφοράς για τον υπολογισμό του χρόνου πτήσης (time-of-flight). Στη περίπτωση συνεχούς εκπομπής, ο δέκτης θα επηρεαζόταν συνεχώς από το αδιάλειπτο σήμα, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει σαφές σημείο εκκίνησης για τον υπολογισμό του χρόνου πτήσης.

3.3 Απαραίτητα υλικά για τη σχεδίαση και κατασκευή του κυκλώματος

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη σχεδίαση και κατασκευή της διάταξης μέτρησης απόστασης μέσω υπερήχων, όπως αυτή αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της πτυχιακής εργασίας.

3.3.1 Αναπτυξιακή πλατφόρμα Arduino

Η πλατφόρμα **Arduino** είναι μια **ανοιχτού κώδικα αναπτυξιακή πλατφόρμα (open-source development board)** και ίσως η γνωστότερη αναπτυξιακή πλατφόρμα μικροελεγκτών. Η πλατφόρμα **Arduino** συνδυάζει **υλικό (hardware)** και **λογισμικό (software)** [9], καθώς μέσω του λογισμικού **Arduino IDE** δίνεται η δυνατότητα στους χρήστες να γράψουν κώδικα σε γλώσσα **C/C++**, να **μεταγλωτίσουν (compile)** τον κώδικα σε εκτελέσιμη για τον μικροελεγκτή μορφή, να τον **μεταφορτώσουν (upload)** καθώς επίσης και να **παρακολουθήσουν** σε πραγματικό χρόνο την επικοινωνία με την αναπτυξιακή πλατφόρμα μέσω του **Serial Monitor**.

Στην Εικόνα 3.4 εμφανίζεται η πιο διαδεδομένη έκδοση της αναπτυξιακής πλατφόρμας **Arduino**, το **Arduino Uno R3**.



Εικόνα 3.4: Arduino Uno R3 [7].

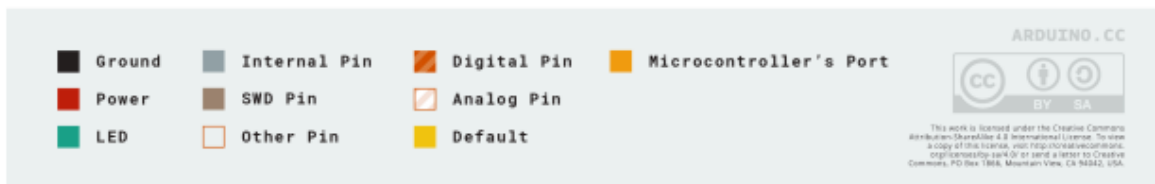
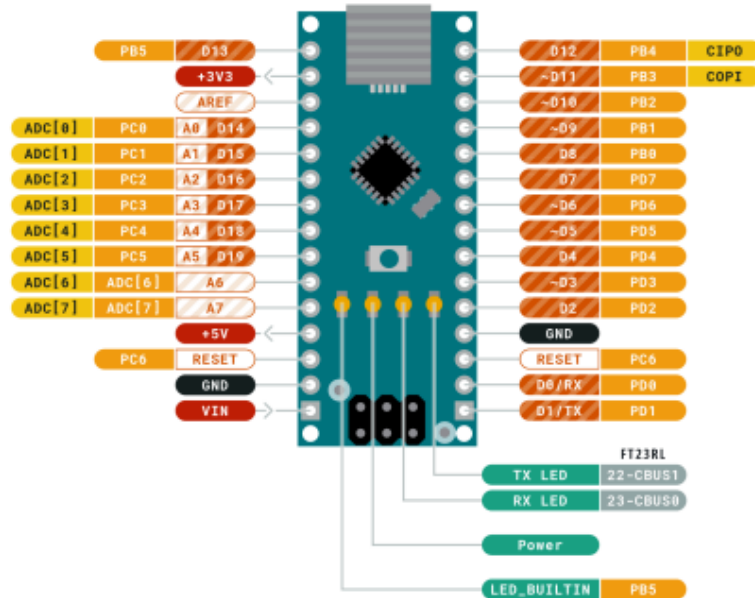
Πέραν του **Arduino Uno** όμως υπάρχουν και άλλες εκδόσεις αναπτυξιακών πλακετών **Arduino**. Μία από τις εκδόσεις αυτές είναι το **Arduino Nano**. Το **Arduino Nano** όπως και το **Uno** βασίζεται στον μικροελεγκτή **ATmega328P** της οικογένειας **AVR** της **Atmel**. Ουσιαστικά αποτελεί μια μικρότερη έκδοση του **Arduino Uno**, διατηρώντας όμως σχεδόν τις ίδιες δυνατότητες. Στην Εικόνα 3.5 παρουσιάζεται η μικρότερη αυτή έκδοση του **Arduino**.



Εικόνα 3.5: Arduino Nano [10].

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί και στην Εικόνα 3.6, το **Arduino Nano** διαθέτει **14 ψηφιακούς ακροδέκτες εισόδου/εξόδου (D0 – D13)** καθώς και **8 αναλογικές εισόδους (A0 – A7)**.

Ο μικροελεγκτής **ATmega328P** λειτουργεί με **συχνότητα 16 MHz** και η τροφοδοσία του μπορεί να γίνει μέσω θύρας **Mini-USB (5V)** ή μέσω pin **Vin (7–12V)** χάρη στον ενσωματωμένο ρυθμιστή τάσης.



Εικόνα 3.6: Pinout του Arduino Nano[10].

Τα **πλεονεκτήματα** που προσφέρει το **Arduino Nano** και το κάνουν μία ιδανική επιλογή για τη χρήση του στη παρούσα πτυχιακή είναι μεταξύ άλλων η **συμπαγής σχεδίαση** του, καθώς είναι ιδανικό για

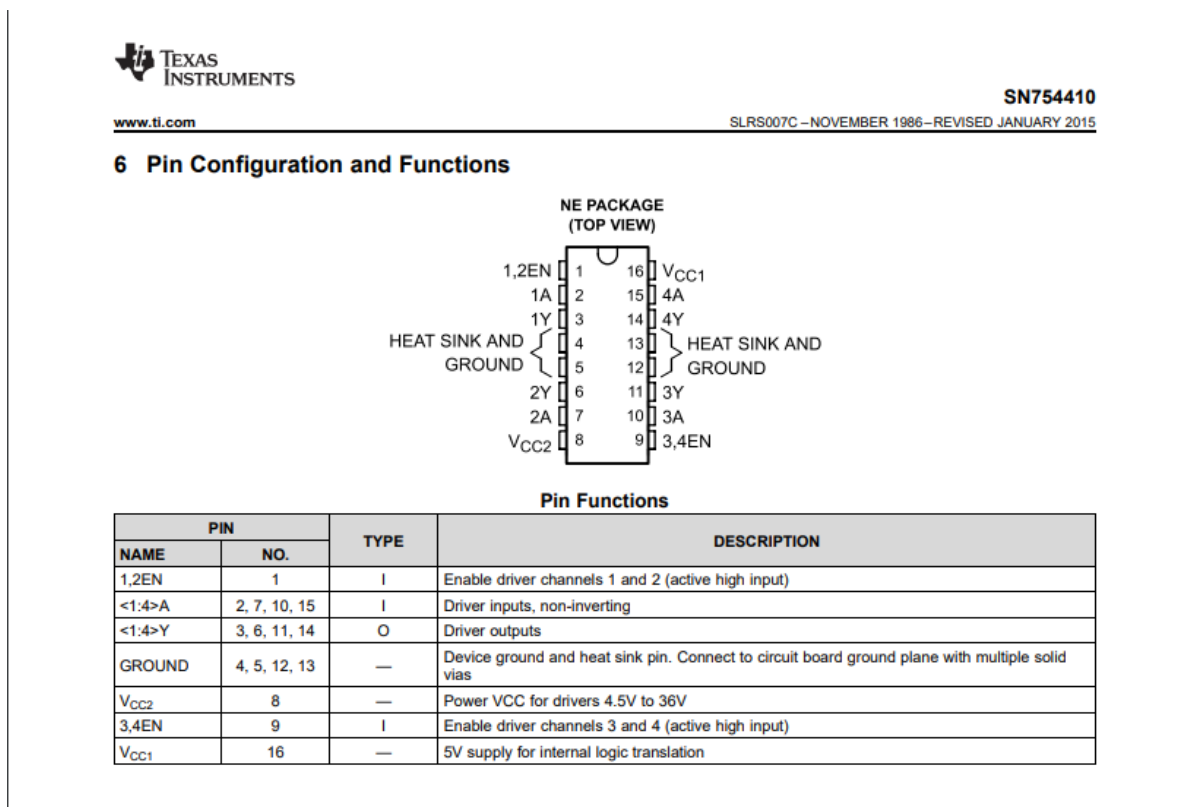
χρήση σε **ράστερ (breadboard)**, όπως επίσης και η συμβατότητά του με το **Arduino IDE** αφού χρησιμοποιεί το ίδιο οικοσύστημα λογισμικού και βιβλιοθηκών με το Uno.

3.3.2 Ολοκληρωμένο κύκλωμα H-Bridge – SN754410NE

Για την επίτευξη εκπομπής υπερηχητικών σημάτων με επαρκές πλάτος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί διάταξη H-bridge, όπως αυτή που παρουσιάστηκε θεωρητικά στο Κεφάλαιο 2 και δοκιμάστηκε πειραματικά στο Κεφάλαιο 5.

Για λόγους βελτιστοποίησης του διαθέσιμου χώρου και απλοποίησης της κατασκευής, στις περισσότερες εφαρμογές προτιμάται η χρήση ολοκληρωμένου κυκλώματος αντί ενός H-bridge με διακριτά στοιχεία, όπως αυτό που εξετάστηκε προηγουμένως.

Στην αγορά διατίθενται πολλά ολοκληρωμένα κυκλώματα H-bridge ή παρόμοιες διατάξεις, οι οποίες είναι συχνά σχεδιασμένες ως οδηγοί (drivers) για διάφορους τύπους ηλεκτροκινητήρων. Η οδήγηση και ο έλεγχος ενός κινητήρα απαιτεί σχετικά υψηλά ρεύματα, γι' αυτό και στα περισσότερα από αυτά τα κυκλώματα χρησιμοποιούνται MOSFET αντί για διπολικά τρανζίστορ, όπως αυτά που εξετάστηκαν προηγουμένως. Ωστόσο, οι απαιτήσεις σε ρεύμα ενός υπερηχητικού πομποδέκτη είναι εξαιρετικά μικρές, γεγονός που επιτρέπει την ορθή λειτουργία του είτε με MOSFET είτε με διπολικά τρανζίστορ.



Εικόνα 3.7: Ακροδέκτες του SN754410NE [4].

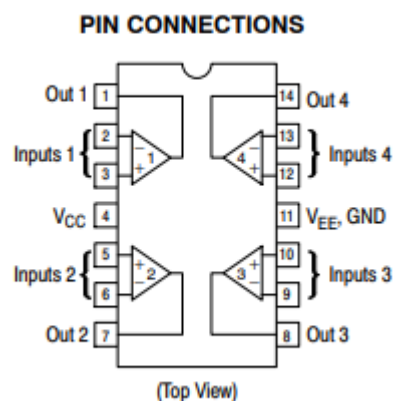
Για τις ανάγκες της παρούσας πτυχιακής εργασίας επιλέχθηκε το ολοκληρωμένο κύκλωμα (O.K.) SN754410NE, το οποίο ανήκει στην κατηγορία των **Half-bridge drivers**. Ο όρος Half-bridge χρησιμοποιείται διότι το ολοκληρωμένο κύκλωμα διαθέτει τέσσερις «μισές» γέφυρες, οι οποίες μπορούν να συνδυαστούν ώστε να σχηματίσουν δύο πλήρη κυκλώματα H-bridge.

Στην Εικόνα 3.7 παρουσιάζονται οι ακροδέκτες του SN754410NE, όπως αυτοί δίνονται στο επίσημο datasheet του κατασκευαστή.

Το ολοκληρωμένο κύκλωμα διαθέτει συνολικά **16 ακροδέκτες (pins)**, οι ακροδέκτες **1,2EN** και **3,4EN** αποτελούν τα enable pins των καναλιών 1-2 και 3-4 αντίστοιχα, ενεργοποιώντας τα αντίστοιχα half-bridges όταν εφαρμόζεται υψηλό δυναμικό και απενεργοποιώντας τα όταν εφαρμόζεται χαμηλό δυναμικό. Οι ακροδέκτες **VCC1** και **VCC2** αποτελούν τους ακροδέκτες τροφοδοσίας του ολοκληρωμένου. Ο ακροδέκτης **VCC1** αντιστοιχεί στην τροφοδοσία της λογικής (logic supply) του ολοκληρωμένου και απαιτεί σταθερή τάση 5V στην είσοδό του. Παρέχοντας τάση 5V στον ακροδέκτη **VCC1** εξασφαλίζεται η ορθή αναγνώριση και επεξεργασία των σημάτων εισόδου, επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο λογικά σήματα (0V – 5V) να ελέγξουν την κατάσταση των αντίστοιχων half-bridges. Σε αντίθεση, ο ακροδέκτης **VCC2** μπορεί να κυμαίνεται από 4.5V έως 36V και αφορά τη τροφοδοσία ισχύος του H-bridge, τη τάση δηλαδή που εφαρμόζεται στο φορτίο. Οι ακροδέκτες **1-4A** αφορούν τις εισόδους των σημάτων ελέγχου ενώ οι **1-4Y** τις εξόδους του. Τέλος οι αριθμημένοι ακροδέκτες **4,5,12** και **13** χρησιμοποιούνται ως γείωση (GND).

3.3.3 Τελεστικός Ενισχυτής LM324

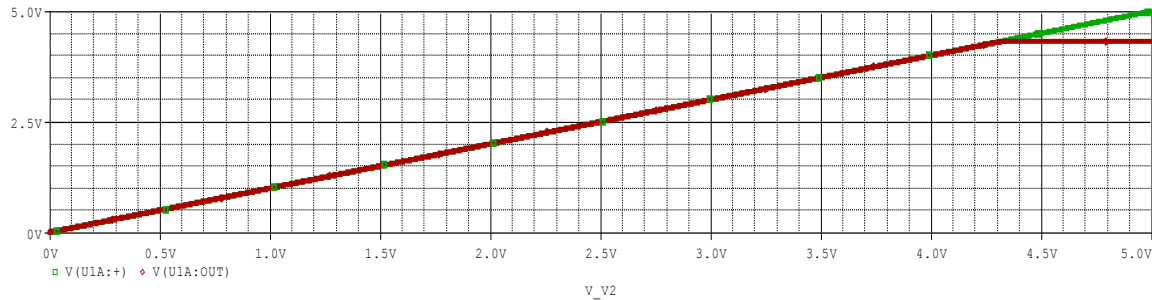
Ο LM324 είναι ένας τετραπλός (quad) τελεστικός ενισχυτής (T.E.) γενικής χρήσης, χαμηλού κόστους και χαμηλής κατανάλωσης. Ανήκει στους τελεστικούς ενισχυτές απλής τροφοδοσίας, γεγονός που του επιτρέπει να λειτουργεί τόσο με **απλή** (μονοπολική) τροφοδοσία όσο και με **συμμετρική** (διπολική) τροφοδοσία. Σε συνθήκες απλής τροφοδοσίας υποστηρίζει εύρος λειτουργίας από 3V έως 32V [14], ενώ ο χαρακτηρισμός τετραπλός αναφέρεται στο γεγονός ότι περιλαμβάνει τέσσερις ανεξάρτητους τελεστικούς ενισχυτές στο ίδιο ολοκληρωμένο κύκλωμα. Στην Εικόνα 3.8 παρουσιάζονται οι ακροδέκτες του LM324 καθώς και οι T.E. που το απαρτίζουν.



Εικόνα 3.8: Ακροδέκτες του LM324 [14].

Σημαντικοί παράγοντες που πρέπει πάντα να λαμβάνονται υπόψη σε έναν T.E. είναι το Input Common Mode Voltage Range (V_{ICR}) και το Output Voltage Swing (V_O). Το V_{ICR} καθορίζει την εμβέλεια τάσεων εισόδου που μπορεί να δεχθεί ο T.E. ενώ το V_O καθορίζει την εμβέλεια των τάσεων εξόδου που μπορεί να παράξει στην έξοδό του. Στη περίπτωση του LM324 το V_{ICR} ορίζεται από τον κατασκευαστή από 0V

εώς $V_{CC}-1.7V$, δηλαδή μπορεί να χειριστεί στην είσοδό του τάσεις που κυμαίνονται από 0V έως και 1.7V χαμηλότερες από τη τάση τροφοδοσίας V_{CC} . Όσο αναφορά το Output Voltage Swing (V_O), αυτό διακρίνεται σε Output Voltage - High Limit (V_{OH}) και Output Voltage - Low Limit (V_{OL}), όπου για τον LM324 ισχύει $V_{OH} \approx V_{CC}-1.5V$ και $V_{OL} \approx 0V$ [14]. Στην Εικόνα 3.9 παρουσιάζεται η απόκριση της εξόδου του LM324 σε σχέση με την είσοδο (0V – 5V) όταν $V_{CC} = 5V$ σε προσομοίωση στο Pspice.



Εικόνα 3.9: Χαρακτηριστική εισόδου–εξόδου του LM324 σε προσομοίωση Pspice.

Άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά του είναι το **εύρος συχνοτήτων Gain Bandwidth (GBW)** το οποίο είναι περίπου 1 MHz, το **Slew Rate SR** που ισούται με 0.5 V/μs, καθώς και η ευρεία χρήση του σε κυκλώματα ενίσχυσης σημάτων αισθητηρίων. Τα χαρακτηριστικά αυτά σε συνδυασμό με το χαμηλό του κόστος κάνουν τον LM324 μια πολύ καλή επιλογή για τις ανάγκες της πτυχιακής εργασίας αυτής.

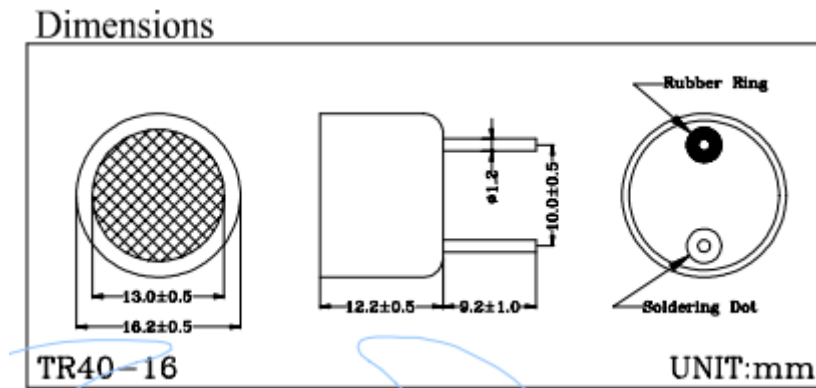
3.3.4 Υπερηχητικοί μετατροπείς TR40-16

Για τους σκοπούς της πτυχιακής εργασίας, είναι προφανές ότι θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι κατάλληλοι **υπερηχητικοί μετατροπείς (ultrasonic transducers)**. Ο όρος των υπερηχητικών μετατροπέων περιλαμβάνει τόσο τους **πομπούς** όσο και τους **δέκτες υπερήχων**. Στο εμπόριο κυκλοφορούν διάφοροι μετατροπείς υπερήχων, με διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας και διαφορετικές διαστάσεις.



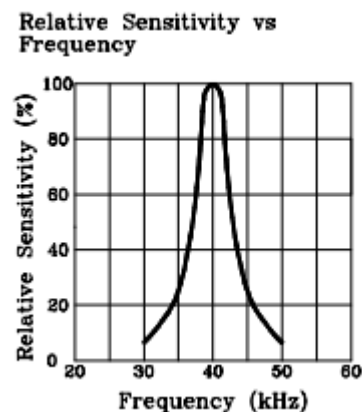
Εικόνα 3.10: Υπερηχητικοί μετατροπείς TR40-16.

Για τις ανάγκες αυτής της πτυχιακής εργασίας, επιλέχθηκαν οι υπερηχητικοί μετατροπείς **TR40-16**, οι οποίοι μπορούν να διακριθούν σε **T40-16** (πομπός) και **R40-16** (δέκτης). Στην Εικόνα 3.10 παρουσιάζεται ένα ζεύγος πομπού και δέκτη υπερήχων TR40-16.



Εικόνα 3.11: Διαστάσεις TR40-16 [8].

Η συχνότητα λειτουργίας των μετατροπέων TR40-16 είναι $f = 40\text{kHz}$ και η διάμετρος $d = 16\text{mm}$, όπως μαρτυρά και η ονομασία τους. Στην Εικόνα 3.11 φαίνονται οι διαστάσεις του TR40-16 όπως αυτές δίνονται από τα datasheets, ενώ στην Εικόνα 3.12 εμφανίζεται η συχνοτική τους απόκριση.

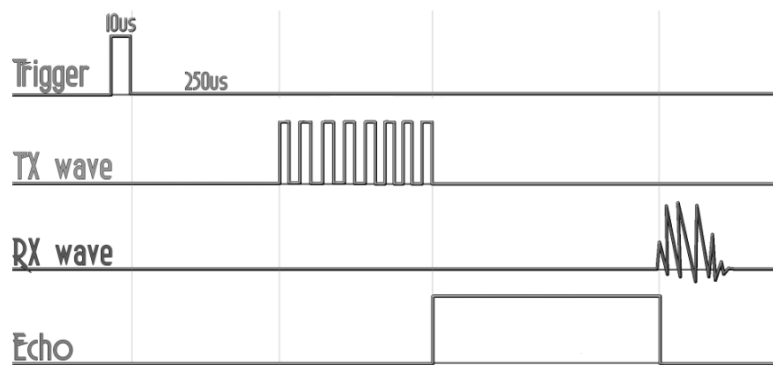


Εικόνα 3.12: Συχνοτική απόκριση TR40-16 [8].

Από το γράφημα της Εικόνας 3.12 γίνεται ξεκάθαρο πως οι υπερηχητικοί μετατροπείς TR40-16 έχουν ως κεντρική συχνότητα την $f = 40\text{kHz}$ και λειτουργούν σχεδόν αποκλειστικά σε αυτή με κάποιες μικρές αποκλίσεις, ενώ για συχνότητες μακριά από αυτή της κεντρικής, η απόδοση του μετατροπέα πέφτει απότομα.

αρνητικό παλμό μέσω του ακροδέκτη D5 ενεργοποιεί το SN754410NE μόνο όταν απαιτείται εκπομπή, μέσω του ακροδέκτη 1,2EN.

Για το κύκλωμα λήψης υπερήχων σχεδιάστηκε τριβάθμιος αναστρέφων ενισχυτής με DC πόλωση, ώστε να εξασφαλιστεί η κατάλληλη ενίσχυση του λαμβανόμενου σήματος. Ο μικροελεγκτής **ATmega328p** και κατ' επέκταση το Arduino Nano αναγνωρίζει στις ψηφιακές εισόδους του ως λογική κατάσταση HIGH σήματα με πλάτος μεγαλύτερο από 0.6VCC [15]. Συνεπώς, για την τάση αναφοράς **Vref** του ενισχυτικού κυκλώματος απαιτείται κατάλληλος υπολογισμός ώστε η Vref να βρίσκεται χαμηλότερα από το κατώφλι του μικροελεγκτή, αλλά ταυτόχρονα αρκετά κοντά σε αυτό ώστε το λαμβανόμενο σήμα να μπορεί εύκολα να το υπερβεί.



Εικόνα 3.14: Προσεγγιστική λειτουργία συστήματος

Με δεδομένο ότι το Arduino Nano λειτουργεί με τάση τροφοδοσίας **VCC = 5 V**, η τιμή **VIH (Input High Voltage)** ορίζεται στα **3 V**. Αν οριστεί **Vref = 2.8 V**, και η αντίσταση **R8 = 2.2 kΩ**, τότε η τιμή της **R2** μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$V_{ref} = VCC \frac{R9}{R8 + R9}$$

Άρα:

$$2,8V = 5V \frac{R9}{2,2k\Omega + R9} \Rightarrow R9 = 2,8k\Omega$$

Με βάση τον παραπάνω υπολογισμό, ορίστηκαν οι τιμές των αντιστάσεων R8 και R9 για Vref = 2.8V, επίσης παράλληλα με την R9 τοποθετήθηκε πυκνωτής παράκαμψης (bypass capacitor) για το φιλτράρισμα θορύβου του διαιρέτη τάσης.

Για κάθε βαθμίδα ενίσχυσης επιλέχθηκαν οι τιμές R1 = 10kΩ και R2 = 100kΩ, ώστε να επιτευχθεί κέρδος Av = 10 ανά βαθμίδα. Το συνολικό κέρδος του ενισχυτή, σύμφωνα με τον κανόνα του πολλαπλασιασμού των επιμέρους κερδών θα είναι :

$$A_{\text{ολ}} = A_{v1} \cdot A_{v2} \cdot A_{v3} = 10 \cdot 10 \cdot 10 = 1000$$

Με τον τρόπο αυτό, το λαμβανόμενο υπερηχητικό σήμα ενισχύεται επαρκώς, διασφαλίζοντας έτσι την ανιχνεύσή του από το Arduino Nano.

Για την επιλογή των αντιστάσεων του τριβάθμιου ενισχυτή, χρησιμοποιήθηκε ο τύπος:

$$Av(AC) = -\frac{R2}{R1}$$

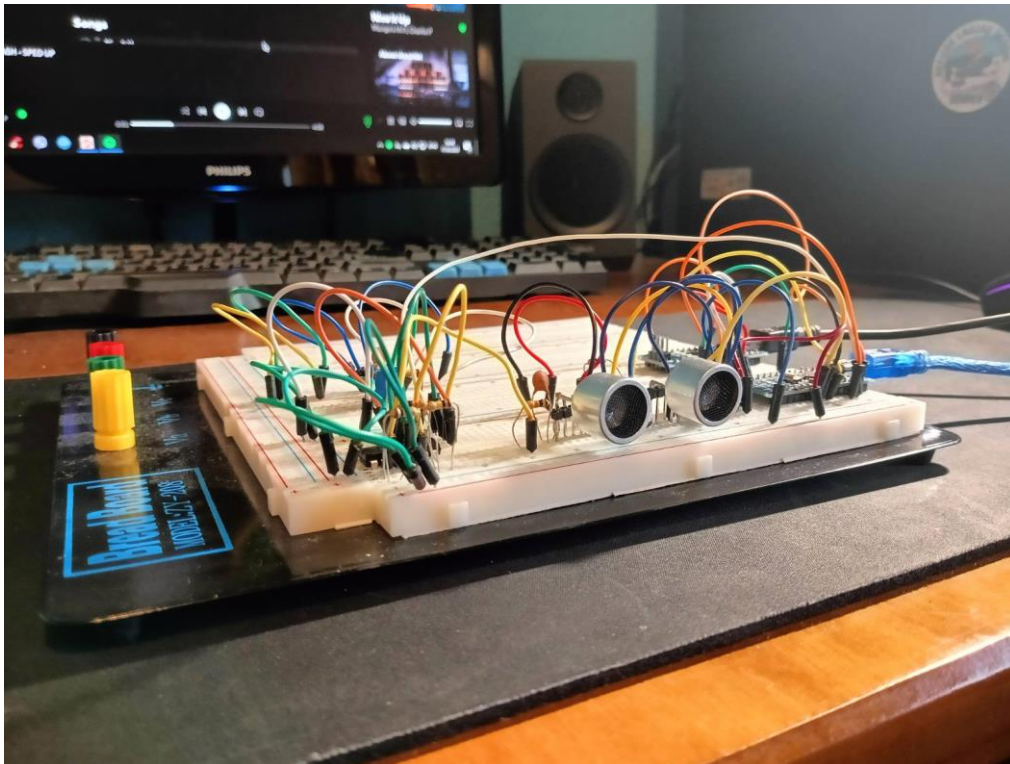
Αφού η ισοδύναμη χωρητική αντίσταση $X_{C1} \leq 0.1R1$ αν οριστεί $R1 = 10k\Omega$.

Τέλος το Arduino Nano έχει προγραμματισθεί κατάλληλα έτσι ώστε ο ακροδέκτης Trig (D10) να έρθει σε λογική κατάσταση HIGH μετά το πέρας της **εκπομπής** του υπερηχητικού σήματος και να επιστρέψει σε λογική κατάσταση LOW μόνο όταν υπάρξει ανίχνευση του ανακλώμενου υπερηχητικού σήματος μέσω του ακροδέκτη D9. Με αυτόν τον τρόπο Arduino Nano παράγει παλμό echo αντίστοιχο του χρόνου πτήσης t από τον οποίο μπορεί να προσδιορισθεί η απόσταση d μετά από επεξεργασία από εξωτερικό μικροελεγκτή ή αναπτυσιακή πλακέτα, εξομοιώνοντας με αυτό τον τρόπο τη λειτουργία του HC-SR04.

Η λειτουργία του κυκλώματος παρουσιάζεται προσεγγιστικά στην Εικόνα 3.14 ενώ ο κώδικας του Arduino Nano παρατίθεται στο **Παράρτημα Α.2**.

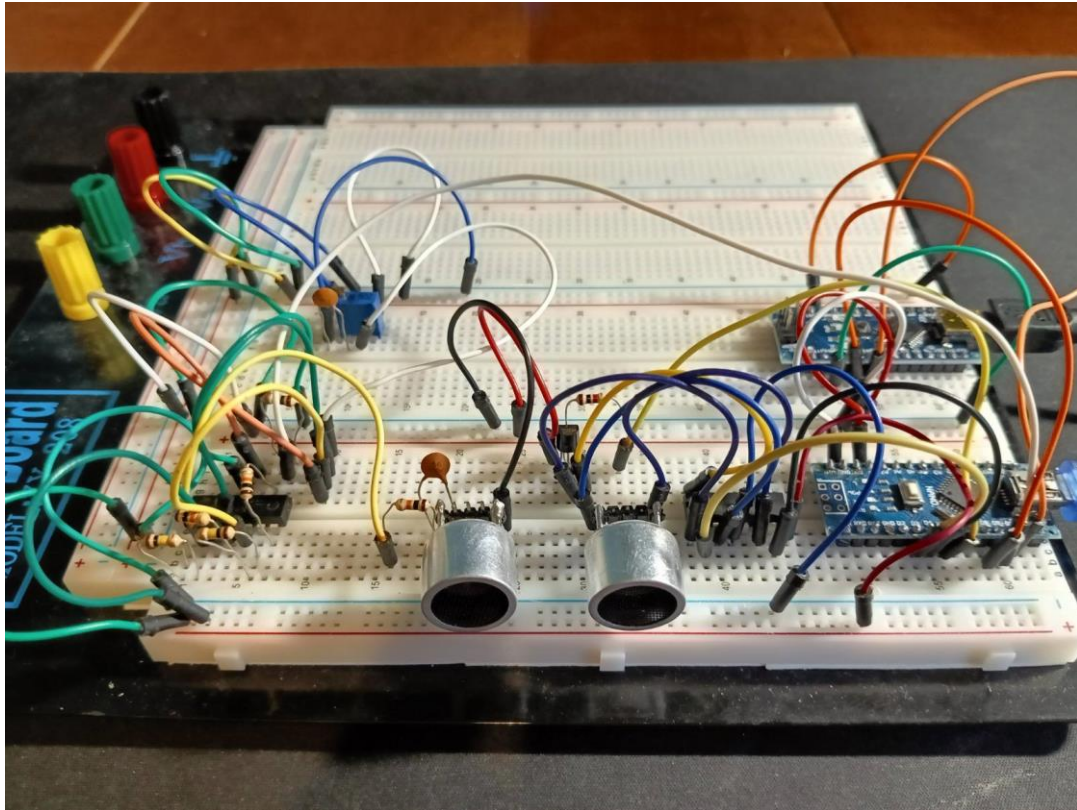
Κεφάλαιο 4ο: Υλοποίηση - Κατασκευή

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζεται η κατασκευή του συστήματος που σχεδιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, καθώς και τα επιμέρους τμήματα που το απαρτίζουν.



Εικόνα 4.1: Κατασκευή υπερηχητικού αισθητήρα μέτρησης απόστασης

Στην Εικόνα 4.1 παρουσιάζεται η κατασκευή του κυκλώματος που σχεδιάστηκε στο Κεφάλαιο 3. Η κατασκευή αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως πρωτότυπο καθώς έχει υλοποιηθεί εξ ολοκλήρου σε breadboard (ράστερ).



Εικόνα 4.2: Κατασκευή υπερηχητικού αισθητήρα μέτρησης απόστασης πάνω όψη

Στην Εικόνα 4.2 διακρίνονται ευκρινέστερα οι βαθμίδες του κυκλώματος όπως αυτές παρουσιάστηκαν νωρίτερα. Ο διαιρέτης τάσης που χρησιμοποιήθηκε για τη DC πόλωση του T.E. αντικαταστάθηκε με ποτενσιόμετρο ακριβείας, ώστε να είναι δυνατή η ακριβής ρύθμιση της τάσης V_{ref} .

Επιπλέον, στη διάταξη χρησιμοποιήθηκε δεύτερη αναπτυξιακή πλακέτα Arduino Nano, η οποία είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία παλμών σκανδαλισμού Trig, την επεξεργασία του σήματος Echo και μετατροπή του σε απόσταση καθώς και για την επικοινωνία με το Arduino IDE για την εκτύπωση της απόστασης σε εκατοστά (cm). Ο αντίστοιχος κώδικας παρατίθεται στο **Παράρτημα Α.1**.

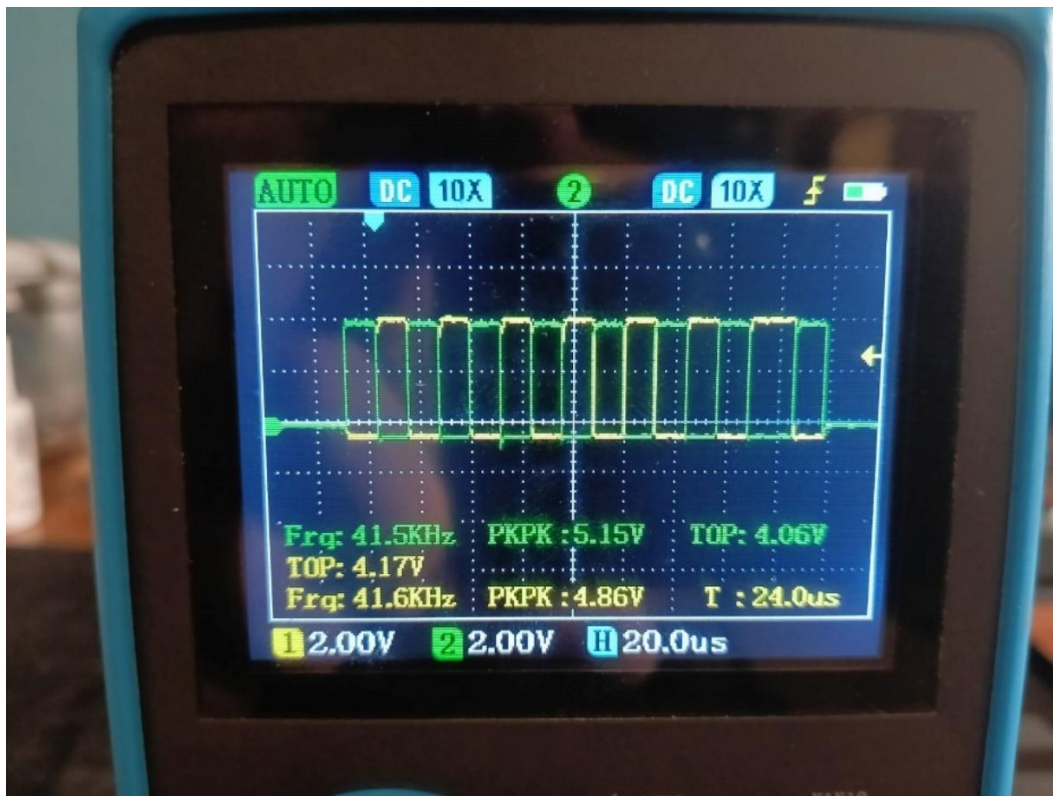
Κεφάλαιο 5ο: Δοκιμές – Μετρήσεις

5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι πειραματικές δοκιμές και οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για την επαλήθευση της λειτουργίας του συστήματος. Αρχικά εξετάζεται η βαθμίδα εκπομπής (H-bridge) και τα χαρακτηριστικά των σημάτων οδήγησης, στη συνέχεια αξιολογείται η συνολική λειτουργία του αισθητήρα, ενώ στο τέλος παρατίθενται ενδεικτικές μετρήσεις απόστασης.

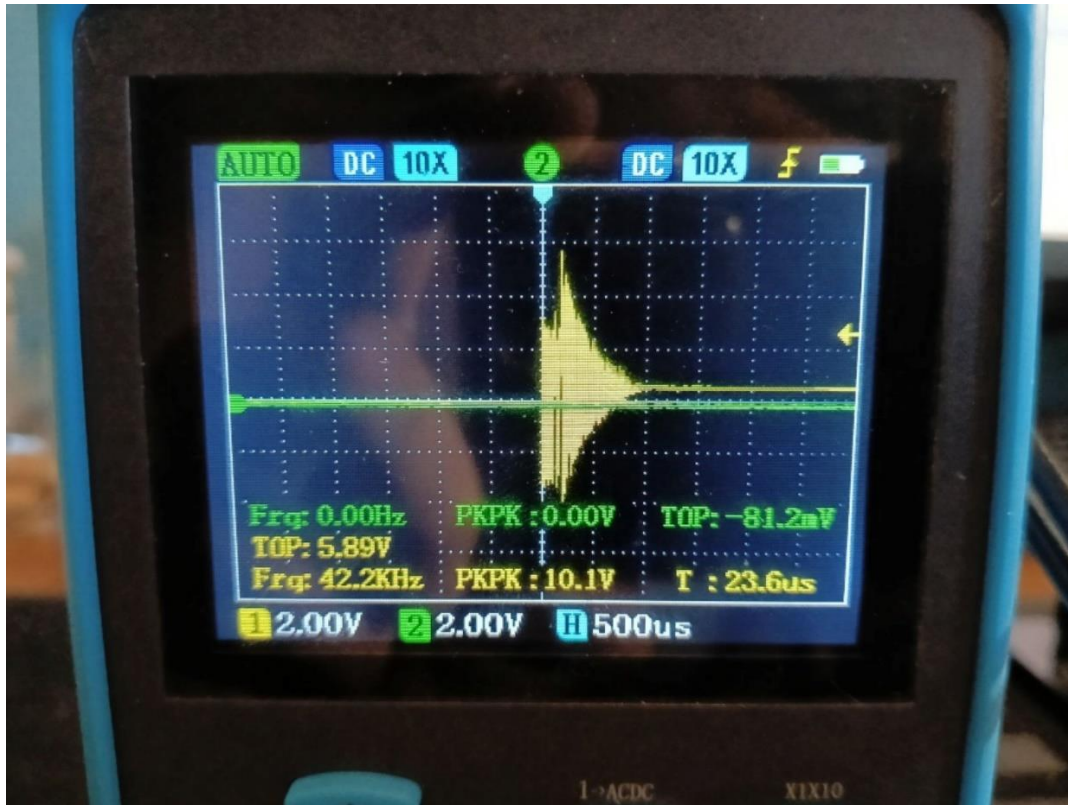
5.2 Δοκιμές πομπού H – bridge

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζονται οι δοκιμές και μετρήσεις στο κύκλωμα εκπομπής. Στην Εικόνα 5.1 φαίνονται οι δύο συμπληρωματικοί παλμοί που παράγει το Arduino Nano κάθε φορά που δέχεται παλμό σκανδαλισμού.



Εικόνα 5.1: Απεικόνιση συμπληρωματικών σημάτων από το Arduino Nano

Οι παλμοί αυτοί έχουν συχνότητα περίπου $f \approx 40 \text{ kHz}$ και πλάτος $V_{\text{peak}} \approx 5 \text{ V}$, ενώ περιορίζονται σε θετικές τάσεις (0–5 V), όπως αναμενόταν από την έξοδο του μικροελεγκτή. Μέσω αυτών των σημάτων τροφοδοτείται το Ο.Κ. H-bridge (SN754410NE), το οποίο μετατρέπει τα συμπληρωματικά σήματα σε εναλλασσόμενο σήμα μεγαλύτερου εύρους, κατάλληλο για την οδήγηση του πομπού υπερήχων. Το παραγόμενο σήμα στην έξοδο του H-bridge παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.2.

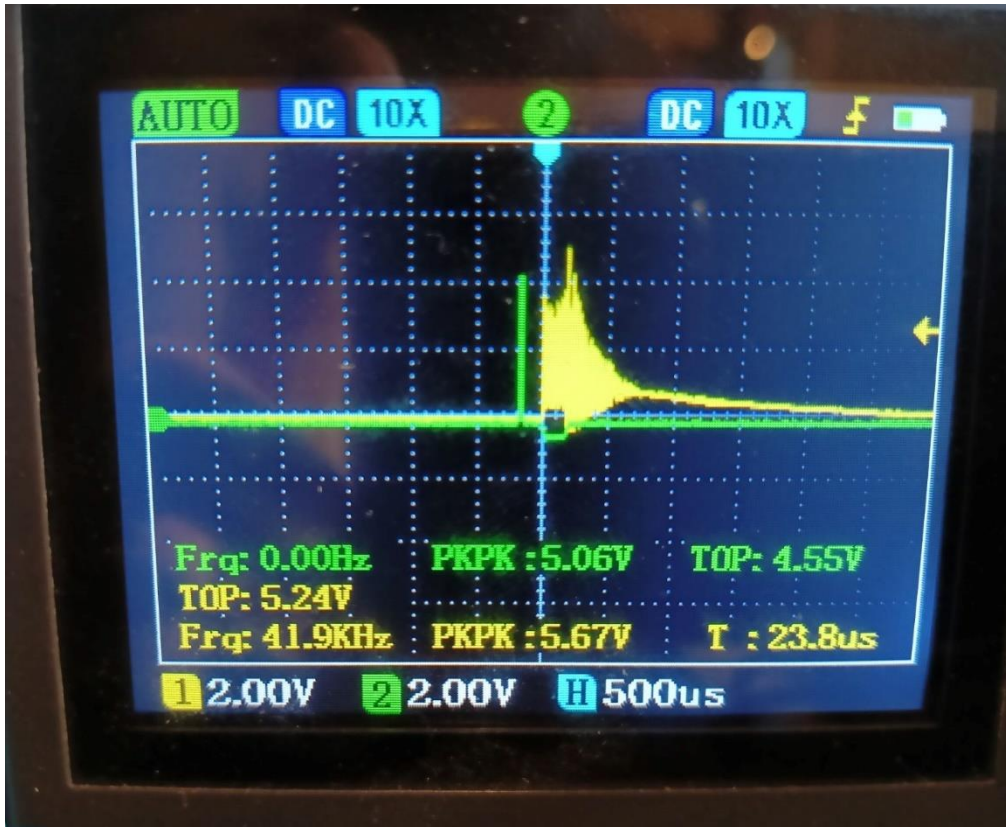


Εικόνα 5.2: Σήμα εκπομπής στα άκρα του υπερηχητικού πομπού

Όπως φαίνεται, το σήμα πλέον έχει εναλλασσόμενη φύση (AC) και εύρος περίπου **10 V_{p-p}**, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για την τροφοδότηση του πομπού υπερήχων. Η χρήση της διάταξης H-bridge επιτρέπει την ενίσχυση του σήματος πέρα από τα 5 V του Arduino Nano, εξασφαλίζοντας έτσι ισχυρότερη εκπομπή και κατ' επέκταση καλύτερη αντίχρεση του ανακλώμενου σήματος από τον δέκτη. Επιπλέον, λόγω της επαγωγικής φύσης του πομπού υπερήχων, παρατηρούνται χαρακτηριστικά φαινόμενα υπερύψωσης και ταλάντωσης τα οποία επηρεάζουν ελαφρώς τη διάρκειά του σήματος.

5.3 Συνολική Λειτουργία Αισθητήρα

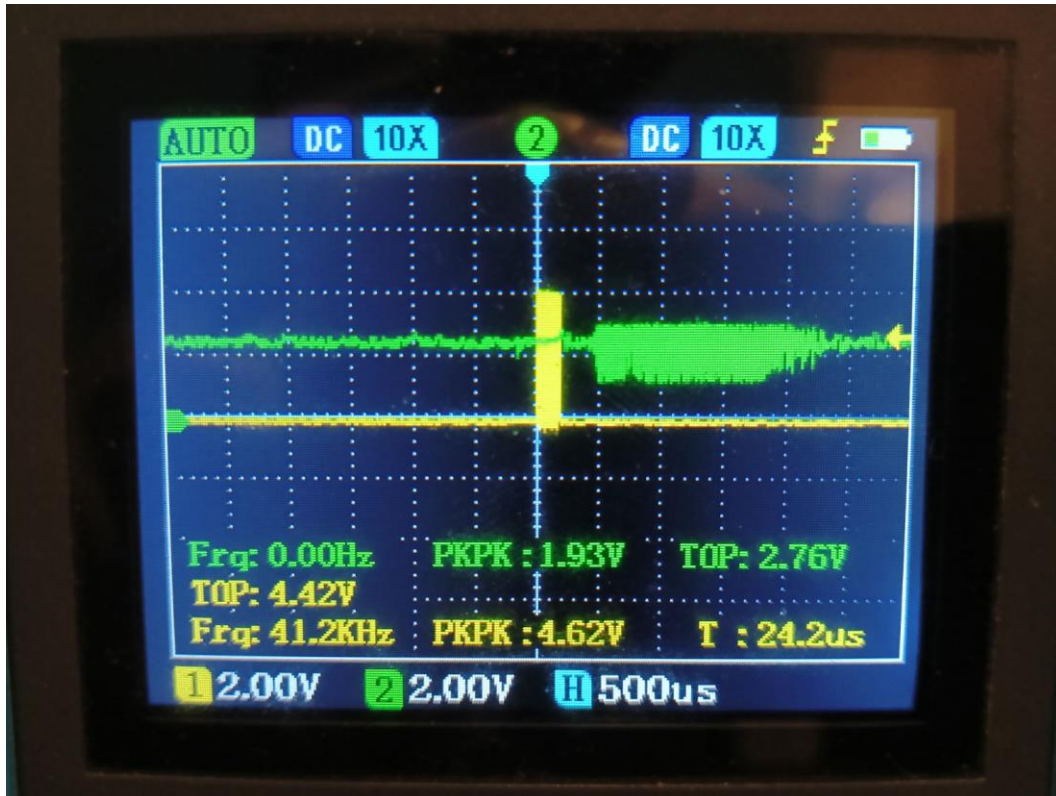
Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζονται οι μετρήσεις που αφορούν τη συνολική λειτουργία του αισθητήρα. Στην Εικόνα 5.3 απεικονίζεται στον παλμογράφο ο παλμός σκανδαλισμού διάρκειας 10 μs που εφαρμόζεται στον ακροδέκτη **Trig (D3)** του Arduino Nano σε χρονικό συσχετισμό με το εκπεμπόμενο υπερηχητικό σήμα.



Εικόνα 5.3: Συσχέτιση παλμού σκανδαλισμού (Trig) με το εκπεμπόμενο υπερηχητικό σήμα.

Από τη παρατήρηση της εικόνας διαπιστώνεται η χρονική καθυστέρηση περίπου **250 μs** μεταξύ του παλμού σκανδαλισμού και την έναρξη της εκπομπής, γεγονός που επιβεβαιώνει την ορθή λειτουργία του συστήματος σκανδαλισμού.

Συνεχίζοντας με τη παρουσίαση των μετρήσεων, στην Εικόνα 5.4 φαίνεται το ένα από τα δυο συμπληρωματικά σήματα που δημιουργεί το Arduino Nano για να τροφοδοτήσει τον πομπό υπερήχων, σε χρονικό συσχετισμό με το σήμα λήψης στον ακροδέκτη D9 του Arduino Nano.

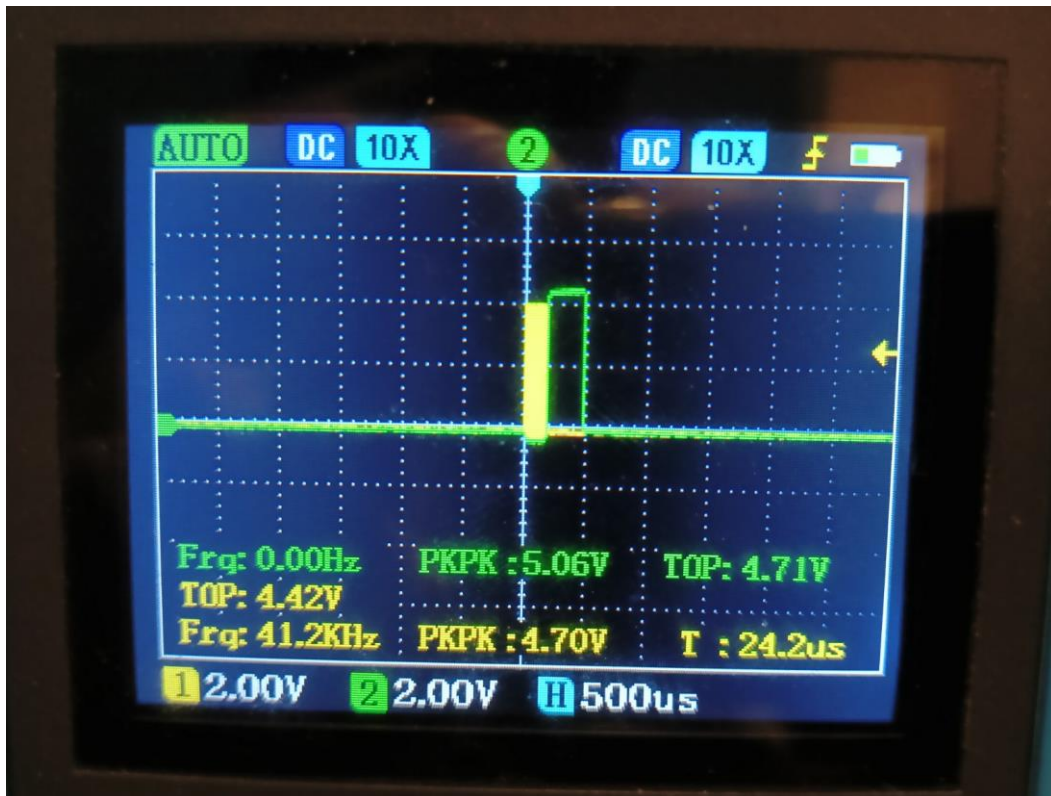


Εικόνα 5.4: Σύσχετιση εκπεμπόμενου και λαμβανόμενου υπερηχητικού σήματος.

Όπως φαίνεται το σήμα λήψης έχει ενισχυθεί μέσω του τριβάθμιου ενισχυτή και έχει «ανυψωθεί» γύρω από την τάση αναφοράς V_{ref} , ώστε να είναι ανιχνεύσιμο από τον μικροελεγκτή. Επίσης στη κορυφή του λαμβανόμενου σήματος παρατηρείται **ψαλιδισμός (clipping)** λόγω της Output Voltage Swing (V_o) του LM324.

Τέλος η χρονική απόσταση μεταξύ εκπεμπόμενου και λαμβανόμενου σήματος αντιστοιχεί στον χρόνο πτήσης t , μέσω του οποίου υπολογίζεται η απόσταση d .

Τέλος, στην Εικόνα 5.5 παρουσιάζεται το ένα από τα δυο συμπληρωματικά σήματα, αυτή τη φορά σε χρονικό συσχετισμό με τον παλμό Echo που παράγεται από το Arduino Nano.



Εικόνα 5.5: Σύγκριση λαμβανόμενου υπερηχητικού σήματος με το παραγόμενο παλμό Echo.

Από την σύγκριση των Εικόνων 5.4 και 5.5 γίνεται σαφές ότι το σήμα echo έρχεται σε λογική κατάσταση HIGH με το πέρας της εκπομπής του υπερηχητικού σήματος και επιστρέφει σε λογική κατάσταση LOW τη στιγμή που ανιχνεύεται το σήμα λήξης. Συνεπώς, η διάρκεια του παλμού Echo ισούται με τον χρόνο πτήσης t . Στην παρούσα μέτρηση παρατηρείται ότι $t = 300 \mu\text{s}$. Επομένως, από τη σχέση (2.1):

$$d = \frac{ct}{2}$$

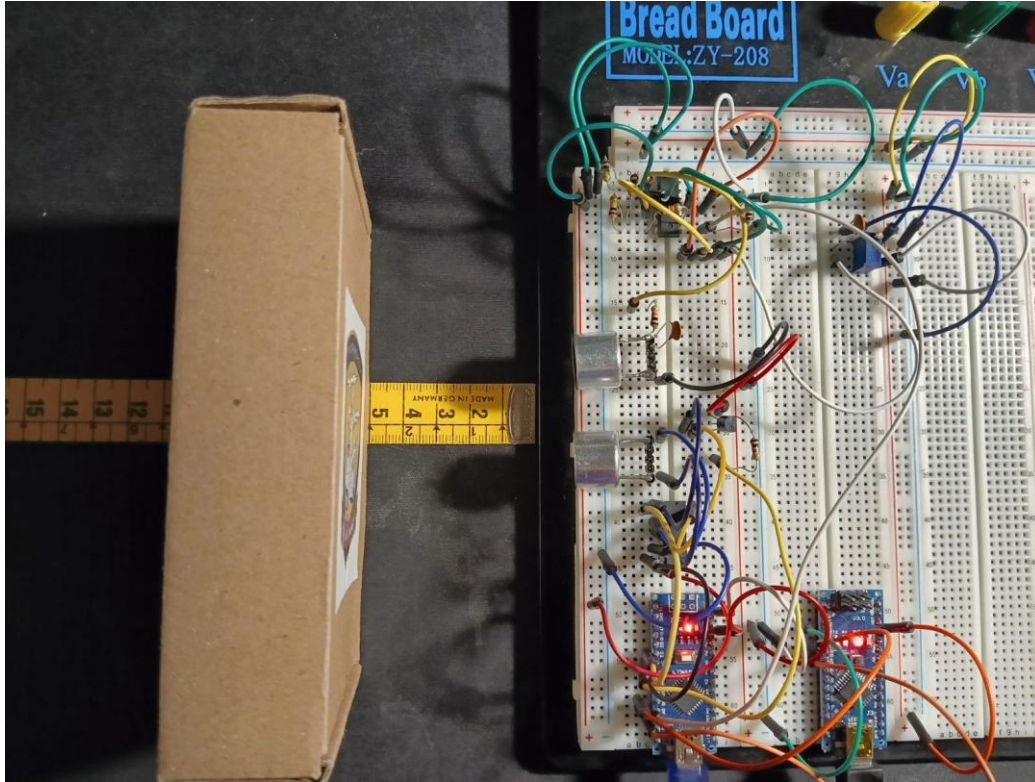
προκύπτει:

$$d = \frac{343\text{m/s} \cdot 300\mu\text{s}}{2} = 5.1 \text{ cm}$$

Μέσω αυτής της διαδικασίας υπολογίζεται η απόσταση του αντικειμένου. Οι πράξεις αυτές εκτελούνται αυτοματοποιημένα από το δεύτερο Arduino Nano του συστήματος, ενώ στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά πειράματα μέτρησης αποστάσεων.

5.4 Μετρήσεις Απόστασης

Σε συνέχεια του υποκεφαλαίου 5.3, παρουσιάζεται πείραμα μέτρησης της απόστασης με το σύστημα που κατασκευάστηκε. Στην Εικόνα 5.6 φαίνεται η διάταξη μέτρησης, όπου ένα εμπόδιο τοποθετήθηκε σε απόσταση 5cm από τον πομπό και τον δέκτη υπερήχων.



Εικόνα 5.6: Πείραμα μέτρησης απόστασης 5cm.

Στην Εικόνα 5.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα στο περιβάλλον Arduino IDE, όπου παρατηρείται πως το σύστημα μετράει με ακρίβεια την απόσταση του εμποδίου στα 5 cm. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνει την ορθή λειτουργία του αισθητήρα και την αξιοπιστία του αλγορίθμου υπολογισμού του χρόνου πτήσης (time-of-flight).

```
Serial Monitor X
Message (Enter to send message to 'Arduino Nano' on 'COM8')
Distance: 5 cm
Distance: 5 cm
Distance: 5 cm
Distance: 5 cm
Distance: 5 cm
Distance: 5 cm
Distance: 5 cm
Distance: 5 cm
```

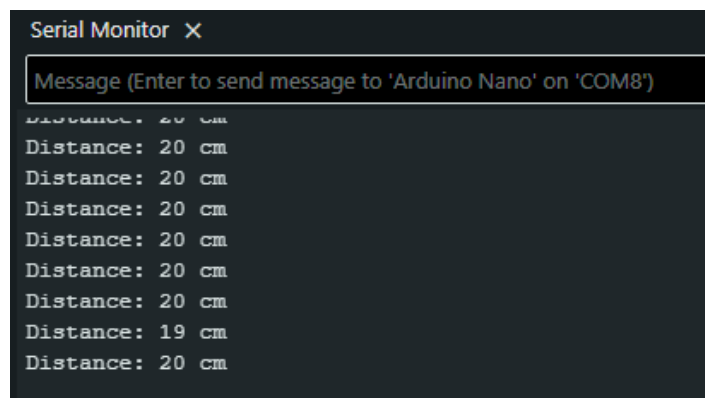
Εικόνα 5.7: Αποτελέσματα στο Arduino IDE

Σε περίπτωση που μετακινήσουμε το αντικείμενο σε μεγαλύτερη απόσταση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.8, το σύστημα συνεχίζει να μετράει την απόσταση με επιτυχία και με παρόμοια ακρίβεια.



Εικόνα 5.8: Πείραμα μέτρησης απόστασης 20cm.

Τα αποτελέσματα της δεύτερης μέτρησης φαίνονται στην Εικόνα 5.9.



Εικόνα 5.9: Αποτελέσματα στο Arduino IDE

Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα ή/και προτάσεις βελτίωσης

Από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα πτυχιακή εργασία προκύπτει ότι το κύκλωμα που αναπτύχθηκε είναι σε θέση να πραγματοποιεί μετρήσεις απόστασης με καλή ακρίβεια και ικανοποιητική εμβέλεια, προσομοιώνοντας επιτυχώς τη λειτουργία ενός εμπορικού αισθητήρα τύπου HC-SR04. Η εμβέλεια του συστήματος παρατηρήθηκε περίπου στα 60cm ενώ σε περιπτώσεις εμποδίων με μεγάλο όγκο μπορεί να φτάσει έως και στο 1m. Η ακρίβεια της διάταξης εκτιμάται πως είναι της τάξης των $\pm 0,5$ cm.

Ως πιθανές βελτιώσεις προτείνεται η ενσωμάτωση συγκριτή για πιο καθαρή και αξιόπιστη ανίχνευση του λαμβανόμενου σήματος, καθώς και η σχεδίαση και υλοποίηση τυπωμένου κυκλώματος (PCB), ώστε να μειωθούν τα προβλήματα θορύβου και αστάθειας που εμφανίζονται σε δοκιμές με breadboard.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Albert P. Malvino και David J. Bates, *Ηλεκτρονική: Αρχές & Εφαρμογές*. Νέα Υόρκη: McGraw Hill Education, 2016.
- [2] Μιχάλης Ν.Σπάσος και Κώστας Θ.Αμοιρίδης, *Σύγχρονες Εφαρμογές Αναλογικών Ηλεκτρονικών*. Θεσσαλονίκη: εκδόσεις Αιβατζή, 2018.
- [3] Σπυρίδων Ι. Λουτριδής, *Ακουστική: Αρχές & Εφαρμογές*. Θεσσαλονίκη: εκδόσεις Τζιόλα, 2018.
- [4] Texas Instruments, "SN754410: Quadruple Half-H Driver," Datasheet, Rev. January 2015. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn754410.pdf>.
- [5] Παναγιώτης Παπάζογλου, *Μικροεπεξεργαστές: Αρχές & Εφαρμογές*. Θεσσαλονίκη: εκδόσεις Τζιόλα, 2016.
- [6] Σ. Μπουλαδάκης, Γ. Πατουλίδης και Ν. Ασημόπουλος, *Προγραμματισμός μικροελεγκτών για μηχανικούς*. Θεσσαλονίκη: εκδόσεις Τζιόλα, 2014.
- [7] Arduino AG, "Arduino® UNO R3," Datasheet, Sep. 2023. [Online]. Available: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf>.
- [8] Waitrony, "Ultrasonic Transducer TR40-16," Datasheet. [Online]. Available: https://datasheet4u.com/pdf-down/T/R/4/TR40-10_Ultrasonic.pdf.
- [9] Arduino, "What is Arduino?," Arduino Official Website. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>.
- [10] Arduino AG, "Arduino Nano (A000005) Datasheet, 2016. [Online]. Available: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000005-datasheet.pdf>.
- [11] Παναγιώτα Αθ. Παπαβραμίδου και Δημήτρης Κλ. Παπακώστας, *Ηλεκτρονικές Εξερευνησεις*. Θεσσαλονίκη: εκδόσεις Τζιόλα, 2014.
- [12] Μιχάλης Ν.Σπάσος, *Αναλογική Επεξεργασία Σημάτων Αισθητηρίων*. Θεσσαλονίκη: εκδόσεις Αιβατζή, 2018.
- [13] ElecFreaks, "Ultrasonic Ranging Module HC-SR04," Datasheet. [Online]. Available: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Proximity/HCSR04.pdf>.
- [14] ON Semiconductor, "LM324, LM324A, LM324E, LM224, LM2902, LM2902E, LM2902V, NCV2902: Single Supply Quad Operational Amplifiers," Datasheet, Rev. 31, Oct. 2021. [Online]. Available: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/lm324-d.pdf>.
- [15] Microchip Technology Inc., "ATmega328P: 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash", Datasheet, Rev. 7810D-AVR-01/15, Jan. 2015. [Online]. Available: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΚΩΔΙΚΑΣ

A.1 Κώδικας Arduino για βασική μέτρηση απόστασης (ενδείκνυται και για χρήση με HC-SR04)

```
const int trigPin = 3;
const int echoPin = 4;

long duration;
int distance;
void setup() {
  pinMode(trigPin, OUTPUT);
  pinMode(echoPin, INPUT);
  Serial.begin(9600);
}
void loop() {

  digitalWrite(trigPin, LOW);
  delayMicroseconds(2);

  digitalWrite(trigPin, HIGH);
  delayMicroseconds(10);
  digitalWrite(trigPin, LOW);

  duration = pulseIn(echoPin, HIGH, 30000);

  distance = duration * 0.034 / 2;

  Serial.print("Distance: ");
  Serial.print(distance);
  Serial.println(" cm");
  delay(50);
}
```



```

PORTD &= B11110111;
PORTD |= B00010000;
delayMicroseconds(13);
PORTD |= B00001000;
PORTD &= B11101111;
delayMicroseconds(13);
PORTD &= B11110111;
PORTD |= B00010000;
delayMicroseconds(13);
PORTD |= B00001000;
PORTD &= B11101111;
delayMicroseconds(13);
PORTD &= B11110111;
PORTD |= B00010000;
delayMicroseconds(13);

PORTD |= B00001000;
PORTD &= B11101111;
delayMicroseconds(13);

PORTD &= B11100111;
PORTD |= B00100000;

PORTB |= B00000100;

triggered = false;
}
}
ISR(PCINT0_vect){

    if(PINB & B00000001){
        Trig_in_state = true;
    }

    else if(Trig_in_state)
    {
        triggered = true;
        Trig_in_state = false;
    }

PORTB &= 11111011;
}

```