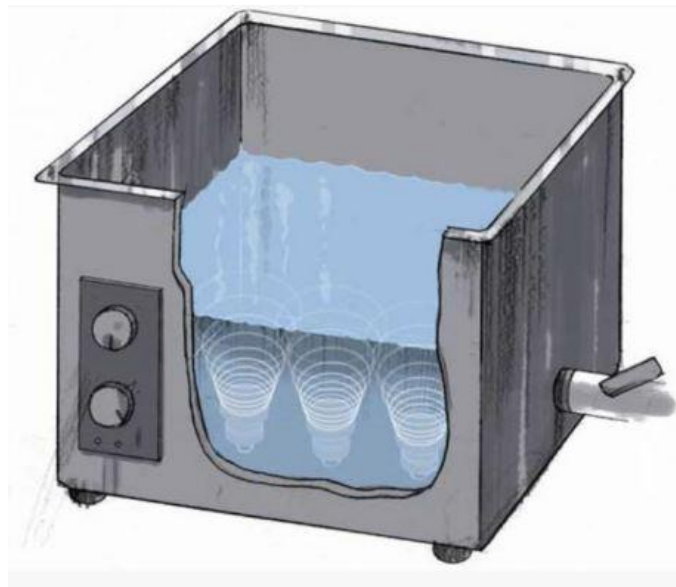


ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΣΚΕΥΗΣ
ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΜΕΣΩ ΥΠΕΡΗΧΩΝ»



Των φοιτητών
Απόσογλου Στέφανου και
Καραμανλίδη Κλεάνθη
Αρ. Μητρώου: 510323 - 511117

Επιβλέπων
Γιακουμής Άγγελος
Επίκουρος Καθηγητής

Ημερομηνία 26/09/23

Τίτλος Δ.Ε.: Σχεδίαση Και Κατασκευή Συσκευής Καθαρισμού Μέσω Υπερήχων

Κωδικός Δ.Ε.: 21380

Όνοματεπώνυμο φοιτητών: Απόσογλου Στέφανος – Καραμανλίδης Κλεάνθης

Όνοματεπώνυμο εισηγητή: Γιακουμής Άγγελος

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε.: 17/10/21

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε.: 26/09/23

Βεβαιώνουμε ότι είμαστε οι συγγραφείς αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχαμε για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχουμε καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες κάναμε χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνουμε ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμάς προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία των φοιτητών Απόσογλου Στέφανου και Καραμανλίδη Κλεάνθη που την εκπόνησαν. 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 κατασκευή μιας βιομηχανικού μεγέθους συσκευής καθαρισμού υπερήχων εκτός από διδακτική για τους συγγραφείς αποτελεί και μια ιδιαίτερος χρήσιμη εφαρμογή με πρακτικές εμπορικές προεκτάσεις από τις οποίες θα επωφεληθούν τοπικές βιοτεχνίες και βιομηχανίες με πολλές πρακτικές εφαρμογές και αύξηση της παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσιών και παραγόμενων προϊόντων.

Περίληψη

Οι συσκευές καθαρισμού υπερήχων με ευρεία γκάμα εφαρμογών από την οδοντιατρική , την αισθητική έως και τη βιομηχανία κερδίζουν συνεχώς έδαφος λόγω της ήπιας χρήσης χημικών και της εξαιρετικής αποτελεσματικότητας τους ακόμα και σε περιοχές που άλλες μέθοδοι δε δύναται να εφαρμοστούν. Στο παρόν πόνημα παρουσιάζεται η κατασκευή και λειτουργία μιας βιομηχανικού μεγέθους συσκευής σε κάθε στάδιο, από την επιλογή των εξαρτημάτων έως τη τεχνική περιγραφή των κυκλωμάτων που την αποτελούν. Συμπερασματικά η συσκευή δοκιμάστηκε ως προς τη λειτουργικότητα της σε ένα εύρος αντικειμένων σε σχέση με το όγκο, τη στιβαρότητα και το είδος των ρύπων που συσσωρεύουν, με ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς το καθαρισμό τους.

Λέξεις κλειδιά: Σπηλαίωση, Συσκευή Καθαρισμού Υπερήχων, Βιομηχανικού Τύπου, Πιεζοηλεκτρικά Υλικά, Υπερηχητικοί Μορφοτροπείς

«DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN ULTRASONIC CLEANING DEVICE»

«Aposoglou Stefanos & Karamanlidis Kleanthis»

Abstract

Ultrasonic cleaning devices have a plethora of uses spanning from dental, aesthetic to industrial applications constantly gaining ground due to their mild use of chemicals and outstanding performance to applications where no other method could deliver results. In this work we describe in detail the construction and functionality of such an industrial grade device every step of the way, from the selections of the relevant electronic and mechanical parts to the technical description of the circuits consisting the device. Conclusively the device was tested in a variety of materials in regard of volume, durability and the type of pollutants they tend to accumulate with satisfactory results.

Keywords: Cavitation, Ultrasonic Power Cleaner, Industrial Grade, Piezoelectric Materials, Ultrasonic Actuators

Ευχαριστίες

Επειδή η έρευνα και η μελέτη μιας διπλωματικής εργασίας δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο από ένα άτομο, αισθανόμαστε την ανάγκη να αναφερθούμε και να ευχαριστήσουμε όλους όσους συνέβαλαν με τον τρόπο τους στην προσπάθεια μας να την ολοκληρώσουμε.

Πρωτίστως το Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος για τις γνώσεις που αποκομίσαμε κατά την διάρκεια των σπουδών μας.

Έπειτα να ευχαριστήσουμε θερμά τον επίκουρο και επιβλέπων καθηγητή κ. Άγγελο Γιακουμή για τις επιστημονικές του υποδείξεις, καθώς επίσης την άμεση και υπεύθυνη καθοδήγηση του καθ όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειες μας για τη ηθική, ψυχολογική και οικονομική υποστήριξη καθ όλη την διάρκεια των σπουδών μας.

Απόσογλου Στέφανος – Καραμανλίδης Κλεάνθης

Περιεχόμενα

Πρόλογος	3
Περίληψη	4
Abstract.....	5
Ευχαριστίες	6
Περιεχόμενα.....	7
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΟΙ ΥΠΕΡΗΧΟΙ.....	12
1.1 Ορισμός υπερήχων.....	12
1.2. Ιστορική εξέλιξη των υπερήχων	12
1.3. Αντίληψη του ανθρώπου	13
1.4. Δοκιμές υπερήχων.....	13
1.5 Χημεία υπερήχων	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ	19
2.1. Τι είναι η σπηλαίωση	19
2.2 Χρυσοί κανόνες του Apfel	22
2.3 Πώς λειτουργεί ο καθαρισμός με υπερήχους	25
2.4 Τι είναι ο μορφοτροπέας υπερήχων	26
2.5 Τι είναι μια γεννήτρια υπερήχων	30
2.7 Αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο	32
2.8 Πιεζοηλεκτρικός ερπυσμός (piezoelectric creep)	35
2.9 Πιεζοηλεκτρισμός και Πιεζο-Οξειδοαναγωγική Χημεία	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΥΠΕΡΗΧΩΝ.....	38
3.1 Μορφοτροπέας LANGEVIN με κοιλία στερέωσης.....	38
3.2 Κεντρικό κύκλωμα.....	40
3.3 Τροφοδοτικό μορφοτροπέα	41
3.4 Στατικά κύματα	42
3.5 Προστασία υπερφόρτωσης.....	43

3.6 Διαχείριση τροφοδοσίας.....	44
3.7 Λυχνίες LED.....	46
3.8 Χρονοδιακόπτης καθαρισμού.....	46
3.9 Κεντρική παροχή.....	47
3.10 Λουτρό εμβάπτισης.....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	49
4.1 Μπλοκ διάγραμμα (block diagram).....	49
4.2 Λίστα υλικών και εξαρτημάτων.....	51
4.3 Σύγκριση συσκευών εμπορίου.....	53
4.4 Επίδειξη λειτουργίας – Μετρήσεις.....	55
Βιβλιογραφία.....	57
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΚΩΔΙΚΑΣ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ.....	58

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1 Ελεύθερης εκτροπής – Ανασταλτικής δύναμης.....	29
Διάγραμμα 2 τάσης ηλεκτρικού πεδίου – μετατόπισης (strain) υλικού.....	33
Διάγραμμα 3 Ένταση εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού – Απομάκρυνσης πιεζοηλεκτρικού υλικού	34
Διάγραμμα 4 Απομάκρυνση υλικού – Χρόνος λόγο ερπυσμού για τέσσερα διαφορετικά υλικά	35
Διάγραμμα 5 Συχνότητα - Ισχύς πιεζοηλεκτρικών δίσκων.....	39
Διάγραμμα 6 Απεικόνιση του νεκρού χρόνου ανάμεσα στα δύο MOFSET	41

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 Επιφάνεια δύο συζευγμένων αστάλινων πλακών	15
Εικόνα 2 Σάρωση της επιφάνειας με υπερήχους για τον εντοπισμό αστοχιών	15
Εικόνα 3 Σάρωση ενός πλαστικού σωλήνα με υπερήχους.....	16
Εικόνα 4 Ατελής βουλκανισμός λαστιχένιου μπλοκ	17
Εικόνα 5 Πλήρης βουλκανισμός του ίδιου μπλοκ.....	17
Εικόνα 6 Χρονική εξέλιξη του φαινομένου σπηλαίωσης	19
Εικόνα 7 Πρωτογενής και δευτερογενής χημεία υπερήχων.....	21
Εικόνα 8 Σύνθεση προβιοτικών αμινοξέων μέσω σπηλαίωσης.....	22
Εικόνα 9 Τυπικός μορφοτροπέας υπερήχων	26
Εικόνα 10 Ένας τυπικός διαμήκης μορφοτροπέας	27
Εικόνα 11 Τυπικός διατμητικός μορφοτροπέας	28
Εικόνα 12 Τυπική γεωμετρία κυλινδρικού μορφοτροπέα.....	28
Εικόνα 13 Απεικόνιση ενός συμβαλλόμενου μορφοτροπέα στρέψης	29
Εικόνα 14 Τυπική γεννήτρια υπερήχων.....	30
Εικόνα 15 Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο σε ένα κρύσταλλο Quartz	31
Εικόνα 16 Σχηματική απεικόνιση (α) πιεζοηλεκτρικού φαινομένου και (b) αντίστροφου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου	36
Εικόνα 17 Το BaTiO ₃ ή το ZnO παρουσιάζουν ακουστικές δονήσεις που προκαλούν διάσπαση του νερού μέσω πιεζοηλεκτρικού φαινομένου	37
Εικόνα 18 Μορφοτροπέας Langevin με κοιλία στερέωσης	38
Εικόνα 19 Εγκάρσια τομή μορφοτροπέα Langevin	39
Εικόνα 20 Κεντρικό κύκλωμα μικροελεγκτή IC1	40
Εικόνα 21 Στατικά κύματα στην επιφάνεια της δεξαμενής καθαρισμού	43
Εικόνα 22 Υλοποίηση σχηματικού διαγράμματος σε πλακέτα.....	50
Εικόνα 23 Συσκευή καθαρισμού υπερήχων supply swar χωρητικότητας 3 λίτρων.....	53

Εικόνα 24 Συσκευή καθαρισμού υπερήχων Visco Parts χωρητικότητας 3 λίτρων	54
Εικόνα 25 Συσκευή καθαρισμού υπερήχων NC pro equipment χωρητικότητας 3 λίτρων	54
Εικόνα 26 Έξοδος θυρών RC4 και RC5	55
Εικόνα 27 Απεικόνιση του νεκρού χρόνου ανάμεσα στα δύο MOSFETs Q1 και Q2	56
Εικόνα 28 Μετρήσεις ορθής λειτουργίας συσκευής καθαρισμού υπερήχων	56

Κατάλογος Εξισώσεων

$I = \frac{P_A}{2\rho c}$ Εξίσωση 1	23
$P(w) = m C_p \frac{\Delta T}{\Delta t}$ Εξίσωση 2.....	24

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο υπέρηχος πήρε το όνομα εκ του γεγονότος ότι το κατώτερο όριο συχνότητάς του είναι περίπου ίσο με το ανώτερο όριο της ανθρώπινης ακοής. Δεδομένου ότι το ανθρώπινα όρια ακοής είναι από 20Hz έως 20kHz, οι υπέρηχοι είναι ηχητικά κύματα που εκκινούν από τα 20kHz και άνω. Έχει καλή κατευθυντικότητα, ισχυρή ικανότητα διείσδυσης, μικρή απώλεια ενέργειας λόγω διάδοσης και μπορεί να διανύσει μεγάλη απόσταση στο νερό. Έχει ευρεία γκάμα εφαρμογών καθώς δύναται να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της απόστασης, τη μέτρηση της ταχύτητας, εργασίες καθαρισμού, απεικόνιση επιφανειών και εκτίμηση εσωτερικών δομών σε πολλαπλά πεδία από στρατιωτικές εφαρμογές έως τη βιομηχανία και την ιατρική.

Η χρήση υπερήχων για το καθαρισμό επιφανειών βασίζεται στην αξιοποίηση της μηχανικής ενέργειας που μεταφέρουν αυτά τα υψηλής συχνότητας ηχητικά κύματα. Το προς καθαρισμό αντικείμενο θα πρέπει να εμβαπτιστεί εξ ολοκλήρου σε ένα καθαριστικό διάλυμα (συνήθως απιονισμένο νερό αναμεμιγμένο με απορρυπαντικό). Με τη χρήση ενός μοροτροπέα υπερήχων τα ηχητικά κύματα διαχέονται σε όλο τον όγκο του καθαριστικού διαλύματος και προσκρούουν στην επιφάνεια του εμβαπτισμένου αντικειμένου και τα τοιχώματα της εσωτερικής επιφάνειας της δεξαμενής εμβάπτισης. Ακολουθεί η δημιουργία μικροσκοπικών φυσαλίδων σε όλο τον όγκο του υγρού λόγω της δημιουργίας περιοχών υψηλής και χαμηλής πίεσης, φαινόμενο που ονομάζεται σπηλαίωση. Οι φυσαλίδες δημιουργούνται και διαλύονται ακατάληπτα καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του μοροτροπέα. Η καταστροφή των φυσαλίδων προκαλεί ισχυρές μεταβολές της θερμοκρασίας και της πίεσης με αποτέλεσμα τη δημιουργία μικροσκοπικών πιδάκων και οστικών κυμάτων τα οποία με τη σειρά τους αποξέουν τα στρώματα βρωμιάς στην επιφάνεια του προς καθαρισμού αντικειμένου.

Δεδομένου ότι δεν υπάρχει περιορισμός ως προς τη μορφοποίηση των φυσαλίδων σε όλο τον όγκο του διαλύματος η καθαριστική δράση των υπερήχων δεν περιορίζεται από το σχήμα του προς καθαρισμού αντικειμένου. Επιπλέον το χαμηλό κόστος κατασκευής καθώς και το ότι η δράση των υπερήχων μπορεί να γίνει επικουρικά με άλλες χημικές μεθόδους καθαρισμού καθιστούν την χρήση τους ιδιαίτερα διαδεδομένη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΟΙ ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Στο κεφάλαιο αυτό παρέχεται ο ορισμός των υπερήχων και μια ιστορική αναδρομή από την ανακάλυψη τους και τις πρώτες πρακτικές εφαρμογές τους έως τη σημερινή τους χρήση στην επιστήμη της Χημείας και τις πρακτικές εφαρμογές τους στη βιομηχανία και την ιατρική.

1.1 Ορισμός υπερήχων

Ο υπέρηχος (ultrasound) είναι ένα μηχανικό κύμα με συχνότητα μεγαλύτερη από το ανώτερο όριο της ανθρώπινης ακοής. Αυτό σημαίνει ότι δεν διαχωρίζεται από τον «κανονικό» ήχο λόγω διαφορών στις φυσικές τους ιδιότητες, αλλά μόνο από το γεγονός ότι ο άνθρωπος δεν μπορεί να το ακούσει. Παρόλο που το όριο αυτό κυμαίνεται από άτομο σε άτομο, είναι περίπου 20kHz (20000Hertz) στο μέσο ενήλικα. Οι συσκευές υπερήχων λειτουργούν με συχνότητες που κυμαίνονται από 20kHz έως πολλά GHz. Η φυσική των υπερήχων είναι ίδια με των ηχητικών κυμάτων.

1.2. Ιστορική εξέλιξη των υπερήχων

Η τεχνολογία των υπερήχων ξεκινά από τις αρχές του 20ού αιώνα. Οι πρώτες αναφορές για τη χρήση των υπερήχων προέρχονται από την εποχή του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, όταν οι επιστήμονες ανέπτυξαν τεχνολογίες υπερήχων για χρήση στη ναυτιλία και τις επικοινωνίες γενικότερα.

Στη δεκαετία του 1940, οι ερευνητές ανακάλυψαν τις αρχές της πιεζοηλεκτρικής μετατόπισης, κατά την οποία μια πιεζοηλεκτρική ύλη (όπως οι κρύσταλλοι κουάρτς) μπορεί να μετατοπίσει μηχανικά κύματα υπερήχων όταν της εφαρμόζεται ηλεκτρική τάση. Αυτή η ανακάλυψη ήταν καθοριστική για την ανάπτυξη των υπερηχογράφων, των συσκευών που χρησιμοποιούν τους υπερήχους για την απεικόνιση των εσωτερικών δομών του ανθρώπινου σώματος.

Τη δεκαετία του 1950, οι πρώτες εμπορικά διαθέσιμες συσκευές υπερηχογραφίας έγιναν διαθέσιμες και χρησιμοποιήθηκαν για ιατρικές εξετάσεις. Αρχικά, η τεχνολογία υπερηχογραφίας εφαρμοζόταν κυρίως στην καρδιολογία και την απεικόνιση του καρδιακού ιστού. Στη συνέχεια, η υπερηχογραφία

εξελίχθηκε και επεκτάθηκε για την απεικόνιση των οργάνων και των ιστών σε άλλους ιατρικούς κλάδους, όπως η μαιευτική-γυναικολογία, η ουρολογία, η αιματολογία, και η ακτινολογία.

Κατά τη διάρκεια των επόμενων δεκαετιών, η τεχνολογία υπερηχογραφίας συνεχίστηκε να εξελίσσεται. Εμφανίστηκαν πιο σύγχρονοι υπερηχογράφοι με αυξημένη ανάλυση, βελτιωμένη απόδοση και περισσότερες λειτουργίες. Επιπλέον, οι εφαρμογές της τεχνολογίας υπερηχογραφίας διευρύνθηκαν για χρήση σε μη ιατρικά πεδία, όπως η βιομηχανία, η επιστήμη των υλικών και η υποβρύχια έρευνα.

Τα τελευταία χρόνια, η τεχνολογία υπερηχογραφίας έχει γνωρίσει περαιτέρω πρόοδο με την εισαγωγή νέων τεχνικών, όπως η τρισδιάστατη υπερηχογραφία και η διαρκής υπερηχοτομογραφία (Doppler υπερηχογραφία) [8] (Jacinta E, 2014). Αυτές οι εξελίξεις έχουν βελτιώσει την ακρίβεια και την αξιοπιστία των διαγνωστικών απεικονίσεων και έχουν επεκτείνει το πεδίο εφαρμογής της υπερηχογραφίας σε πολλούς τομείς της ιατρικής και της βιομηχανίας.

1.3. Αντίληψη του ανθρώπου

Το ανώτατο όριο συχνότητας στους ανθρώπους (περίπου 20kHz) οφείλεται σε περιορισμούς του μέσου αυτιού. Η μεμβράνη του τύμπανου στο μέσο αυτί υπόκειται σε περιορισμούς ως προς το μέγιστο πλάτος δόνησης και συνεπώς θέτει το άνω όριο της μέγιστης συχνότητας ακοής [14] (PUMPHREY, 1950). Τα παιδιά μπορούν να ακούσουν μερικούς ψηλούς ήχους που οι ηλικιωμένοι δεν μπορούν, επειδή στους ανθρώπους το ανώτατο όριο της ακοής τείνει να μειώνεται με την ηλικία σε ευθεία αναλογία με τη δονητική ικανότητα του ακουστικού τυμπάνου.

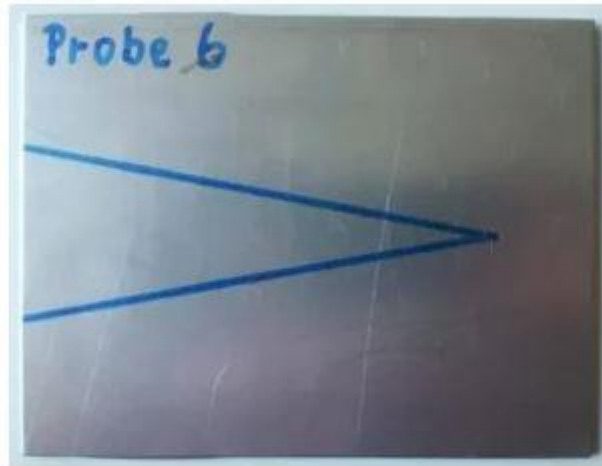
1.4. Δοκιμές υπερήχων

Ο υπερηχητικός έλεγχος (UT) είναι μια οικογένεια τεχνικών μη καταστρεπτικών δοκιμών (ως μη καταστρεπτική νοείται μια δοκιμή που αφήνει ανέπαφο το προς εξέταση υποκείμενο) που βασίζονται στη διάδοση υπερηχητικών κυμάτων στο αντικείμενο ή το υλικό προς δοκιμή. Στις περισσότερες κοινές εφαρμογές UT, πολύ σύντομα υπερηχητικά κύματα παλμών με κεντρικές συχνότητες που κυμαίνονται από 0.1-15MHz και ενίοτε μέχρι 50MHz μεταδίδονται σε υλικά για την ανίχνευση εσωτερικών ελαττωμάτων ή για τον χαρακτηρισμό τους. Ένα κοινό παράδειγμα είναι η μέτρηση πάχους μέσο υπερήχων, η οποία ελέγχει το πάχος του αντικειμένου δοκιμής, για παράδειγμα, για την παρακολούθηση της διάβρωσης των σωληνώσεων. Η υπερηχητική δοκιμή συχνά εκτελείται σε

χάλυβα και άλλα μέταλλα και κράματα, αν και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε σκυρόδεμα, ξύλο και σύνθετα υλικά, αν και με μικρότερη αναλυτική ικανότητα. Χρησιμοποιείται σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπως κατασκευές από χάλυβα και αλουμίνιο, μεταλλουργία, μεταποίηση, αεροδιαστημική, αυτοκινητοβιομηχανία και άλλους τομείς μεταφορών.

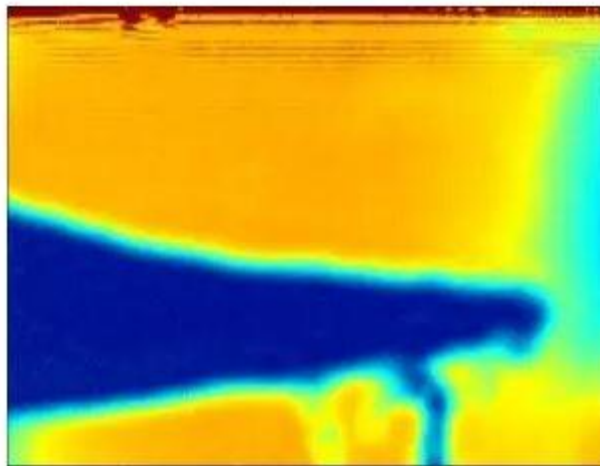
Στην υπερηχητική δοκιμή, ένας υπερηχητικός μοροτροπέας που συνδέεται με ένα διαγνωστικό μηχάνημα περνάει πάνω από το αντικείμενο που επιθεωρείται. Ο μοροτροπέας τυπικά διαχωρίζεται από το αντικείμενο δοκιμής με συζεύκτη (όπως έλαιο ή νερό). Ωστόσο, όταν διεξάγεται δοκιμή υπερήχων με ηλεκτρομαγνητικό ακουστικό μοροτροπέα (EMAT), δεν απαιτείται η χρήση συμπλοκοποιητού. Υπάρχουν δύο μέθοδοι λήψης της κυματομορφής υπερήχων: ανάκλαση και εξασθένηση. Σε λειτουργία ανάκλασης, ο μοροτροπέας εκτελεί τόσο την αποστολή όσο και τη λήψη των παλμών, καθώς τα ηχητικά κύματα ανακλώνται πίσω στη συσκευή. Το διαγνωστικό μηχάνημα εμφανίζει αυτά τα αποτελέσματα με τη μορφή σήματος με εύρος που αντιπροσωπεύει την ένταση της αντανάκλασης και την απόσταση, που αντιπροσωπεύει τον χρόνο άφιξης της αντανάκλασης. Στη λειτουργία εξασθένησης μέσω μετάδοσης, ένας πομπός στέλνει υπερήχους μέσω μιας επιφάνειας και ένας ξεχωριστός δέκτης ανιχνεύει την ποσότητα που έχει φτάσει στην άλλη επιφάνεια μετά τη διέλευση από το μέσο. Ατέλειες ή άλλες συνθήκες στο χώρο μεταξύ του πομπού και του δέκτη μειώνουν την ενέργεια των ηχητικών κυμάτων που μεταδίδεται, αποκαλύπτοντας έτσι την παρουσία τους. Η χρήση συζεύκτη αυξάνει την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας μειώνοντας τις απώλειες στην υπερηχητική ενέργεια κυμάτων λόγω του διαχωρισμού μεταξύ των επιφανειών.

Στις σύγχρονες γραμμές παραγωγής η τάση είναι να συνενώνονται διαφορετικά υλικά με κολλώδεις πάστες (adhesive bonds) διότι αποδεικνύονται ιδιαίτερα ανθεκτικές και μειώνουν το ολικό βάρος της κατασκευής και κατά συνέπεια το κόστος. Η συνήθης περίπτωση είναι να προσκολλούνται μέταλλο με πλαστικό ή μέταλλο με μέταλλο με εφαρμογές από την αυτοκινητοβιομηχανία μέχρι τη κατασκευή κινητών τηλεφώνων. Παρότι είναι υψίστης σημασίας για κάθε ουσιώδη ποιοτικό έλεγχο η εποπτεία των δεσμών αυτών, μετά τη κατασκευή του προϊόντος, οπτικά αυτό δεν είναι εφικτό. Η συνήθης τακτική έλεγχου στις περιπτώσεις αυτές είναι μέσω τη χρήσης υπερήχων με συζευγμένο αέρα (air coupled ultrasonic test). Κάνοντας χρήση υπερήχων και λαμβάνοντας υπόψη την εξάρτηση του ήχου από το μέσο διάδοσης μπορούμε να αποτυπώσουμε το εσωτερικό ενός όγκου που δεν έχει ομοιογενή σύσταση. Ως παράδειγμα της τεχνικής αυτής παραθέτουμε δύο ασφάλινες συζευγμένες πλάκες με ειδική κόλλα.



Εικόνα 1 Επιφάνεια δύο συζευγμένων ασάλινων πλακών

Όπως βλέπουμε και στην Εικόνα 1 είναι σχεδόν αδιάκριτο το όριο των δύο πλακών. Ακολουθεί το αποτέλεσμα σάρωσης με υπερήχους της ίδια επιφάνειας στην Εικόνα 2 όπου τώρα το όριο είναι ευδιάκριτο και τυχόν ατέλειες ή αστοχίες καθαρά ορατές.

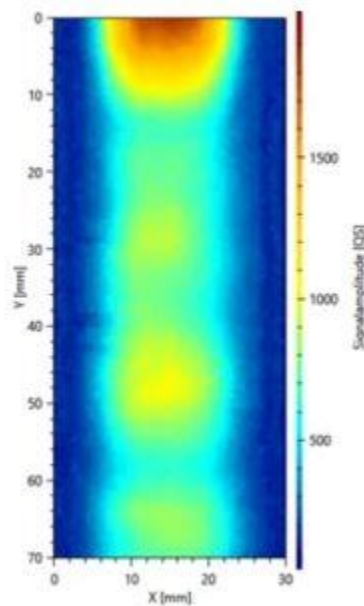


Εικόνα 2 Σάρωση της επιφάνειας με υπερήχους για τον εντοπισμό αστοχιών

Μία επίσης νέα τεχνική που έχει υιοθετηθεί ευρέως στη βιομηχανία είναι τα εξ ολοκλήρου πλαστικά εξαρτήματα (plastic welds). Τα πολυμερή δεν σκουριάζουν και δεν διαβρώνονται και προσφέρουν μεγάλα οφέλη ως προς τη μείωση του βάρους και κόστους σύνθετων κατασκευών. Τα οφέλη αυτά καθιστούν τα εξαρτήματα αυτά ιδανικά για την αυτοκινητοβιομηχανία και την αεροναυπηγική. Όμως λόγω των δραματικών επιπτώσεων λόγω αστοχίας των εξαρτημάτων αυτών, ο ενδεδειγμένος ποιοτικός τους έλεγχος είναι επιβεβλημένος.

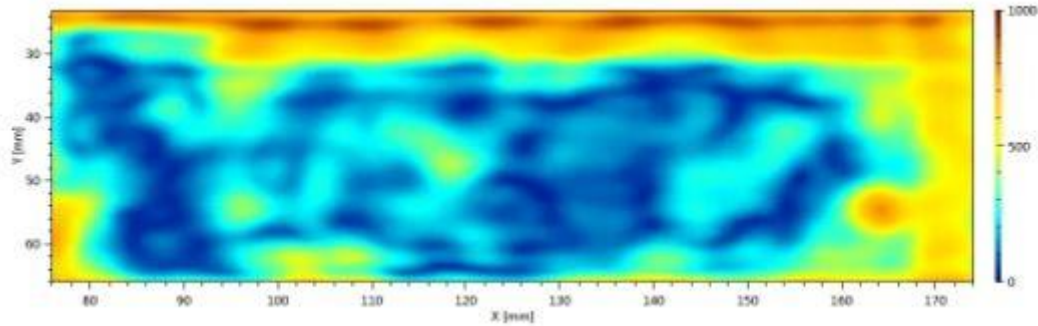
Η μέθοδος ελέγχου για πλαστικές κατασκευές κάνει χρήση των φυσαλίδων αέρα ή της διαφορετικής σύστασης μεταξύ των εσωτερικών ζωνών του προς εξέταση υλικού. Με το πομπό να είναι τοποθετημένος από την μια πλευρά του αντικειμένου και το δέκτη από την άλλη, το αντικείμενο βομβαρδίζεται με υπερήχους και οι χρόνοι άφιξης τους καταγράφονται στη πλευρά του δέκτη. Με τον

τρόπο αυτό σαρώνεται το αντικείμενο και αποδίδοντας διαφορετικό χρώμα σε κάθε χρόνο άφιξης παράγεται η απεικόνιση του εσωτερικού του αντικειμένου (Εικόνα 3).



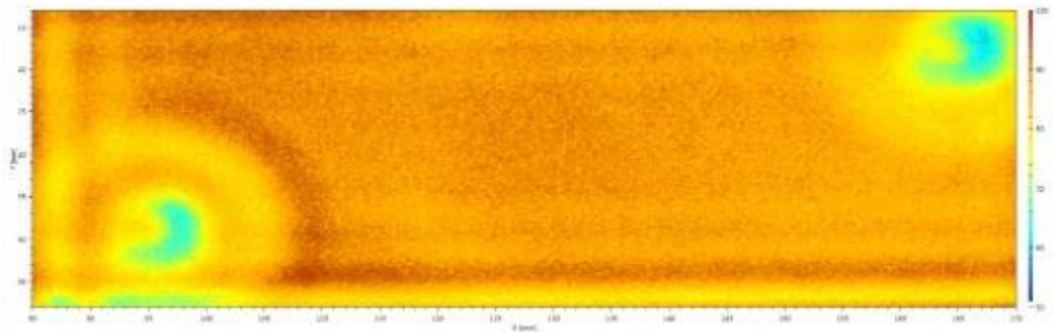
Εικόνα 3 Σάρωση ενός πλαστικού σωλήνα με υπερήχους

Η ανίχνευση ατελειών στα τελικά προϊόντα είναι μια επίπονη και δαπανηρή διαδικασία αλλά απαραίτητη για την επίτευξη ποιοτικών προδιαγραφών και την ελαχιστοποίηση επιστροφών. Ο εντοπισμός ελαττωματικών προϊόντων πριν αυτά φύγουν από τη γραμμή παραγωγής είναι η ασφαλέστερη και οικονομικότερη τακτική. Με τη χρήση υπερήχων για τον μαζικό έλεγχο των προϊόντων καθώς εξέρχονται της γραμμής παραγωγής εντοπίζονται ανομοιογένειές και ελαττώματα λόγω της διαφορετικής σκέδασης του ήχου εντός του μέσου. Πέρα όμως από τον απλό χαρακτηρισμό ενός προϊόντος ως ελαττωματικό ή όχι, η χρήση υπερήχων καθιστά και το ακριβές σημείο της αστοχίας που πιθανόν να επιδιορθώνεται και συμβάλει έτσι στην ελάττωση των ακατάλληλων προϊόντων. Ως παράδειγμα της διεργασία αυτής παραθέτουμε την περίπτωση αστοχίας κατά το βουλκανισμό ενός λαστιχένιου κομματιού στη γραμμή παραγωγής [16] (Wells, 2011).



Εικόνα 4 Ατελής βουλκανισμός λαστιχένιου μπλοκ

Είναι εμφανής η ανομοιογένεια του μπλοκ. Το προϊόν όμως δεν απορρίπτεται αλλά ξανά μπαίνει στην αρχή της διαδικασίας βουλκανισμού ώστε να φτάσει τα ποιοτικά στάνταρ που απαιτούνται.



Εικόνα 5 Πλήρης βουλκανισμός του ίδιου μπλοκ

1.5 Χημεία υπερήχων

Η χημεία υπερήχων είναι ένας τομέας της χημείας που μελετά τα χημικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή υπερήχων σε χημικές αντιδράσεις. Αποτελεί τη συνδυασμένη μελέτη της χημείας και της ακουστικής, με τον ήχο να αποτελεί το κύριο εργαλείο για τη δημιουργία εντατικών και υψηλής συχνότητας μηχανικών κυμάτων [13] (Pokhrel, 2016).

Οι υπέρηχοι μπορούν να δημιουργήσουν μηχανικούς κραδασμούς και κυματικά φαινόμενα που επηρεάζουν τις χημικές αντιδράσεις, προκαλώντας σπηλαιώση, καταλύσεις και δίνες σε υγρά, δημιουργώντας έντονη μηχανική ενέργεια και διαταραχή. Αυτή η ενέργεια μπορεί να επηρεάσει τα μόρια και τα ιόντα εντός του διαλύτη, προκαλώντας επιπλέον αντιδράσεις, επιταχύνοντας την αντίδραση και βελτιώνοντας την απόδοση των χημικών διεργασιών.

Οι εφαρμογές της χημείας υπερήχων είναι ευρέως διαδεδομένες. Χρησιμοποιείται στην κατανόηση και την βελτίωση των χημικών αντιδράσεων, στην επεξεργασία υλικών, στην απομάκρυνση ρύπων και στον καθαρισμό, στην παραγωγή φαρμάκων και σε πολλές άλλες εφαρμογές.

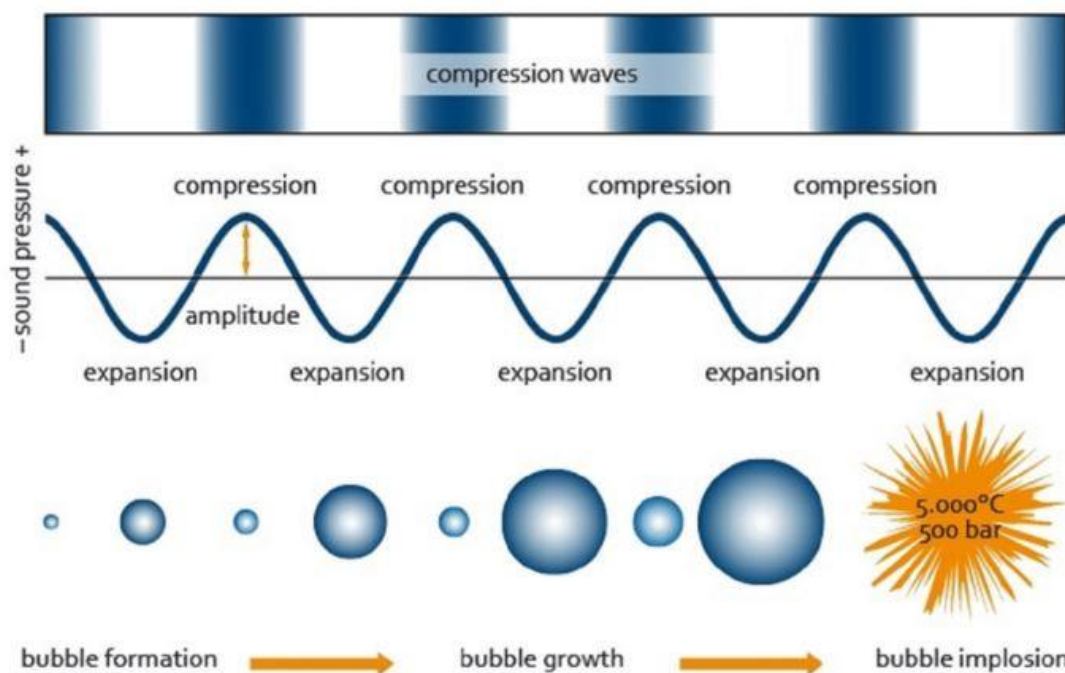
Με τη χρήση της χημείας υπερήχων, είναι δυνατόν να βελτιωθεί η απόδοση και η ταχύτητα των χημικών αντιδράσεων, να περιοριστούν οι απαιτούμενες θερμοκρασίες και οι χρόνοι αντίδρασης και να παράγονται προϊόντα υψηλότερης ποιότητας. Επίσης, η χρήση των υπερηχητικών κυμάτων μπορεί να επιταχύνει την απομάκρυνση ρύπων από επιφάνειες και να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα των διαδικασιών καθαρισμού.

Όσο αφορά τις αντιδράσεις στη χημεία υπερήχων, διακρίνονται τρεις βασικές κατηγορίες. Οι ομογενής αντιδράσεις υπερήχων των υγρών, η ανομοιογενής αντιδράσεις υπερήχων υγρό με υγρό ή υγρό με στερεό καθώς και αλληλοεπικάλυψη των δύο αντίστοιχων περιπτώσεων και η κατάλυση με υπερήχους. Ως κατάλυση με υπερήχους νοείται η αύξηση της ταχύτητας (ή και απόδοσης) της αντίδρασης με τη χρήση υπερήχων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ

Ο καθαρισμός με υπερήχους λειτουργεί μέσω ηχητικών κυμάτων υψηλής συχνότητας που μεταδίδονται μέσω υγρού για τον καθαρισμό της επιφάνειας των βυθισμένων εξαρτημάτων. Τα ηχητικά κύματα υψηλής συχνότητας, συνήθως 40kHz, αναδεύουν το υγρό διάλυμα νερού ή διαλύτη και προκαλούν τη σπηλαίωση των μορίων του διαλύματος.

2.1. Τι είναι η σπηλαίωση



Εικόνα 6 Χρονική εξέλιξη του φαινομένου σπηλαίωσης

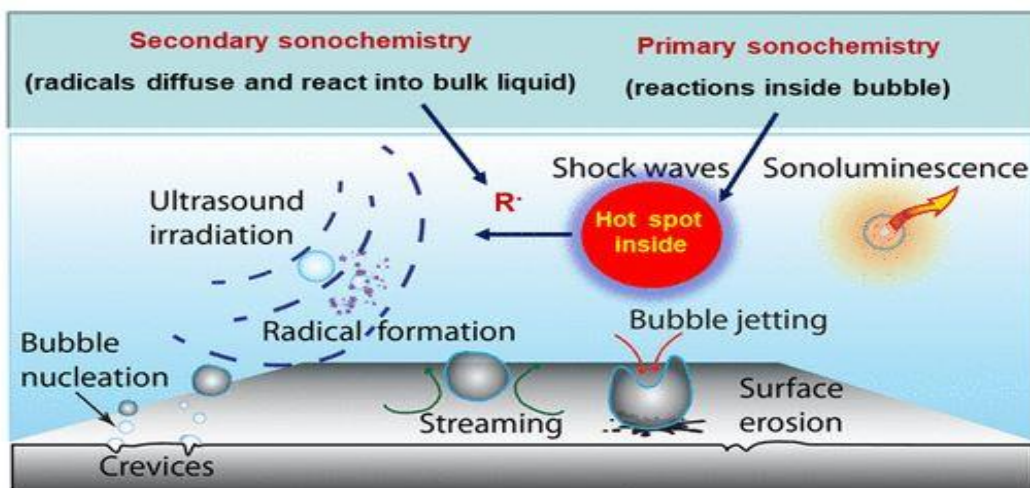
Οι «φουσαλίδες» σπηλαίωσης σχηματίζονται όταν η ηχητική ενέργεια δημιουργεί ένα κενό (ή κοιλότητα) που παγιδεύεται ως φουσαλίδα σε υγρό διάλυμα νερού ή διαλύτη. Αυτές οι μικροσκοπικές φουσαλίδες εκρήγνυνται με τέτοια δύναμη που οι ρύποι που προσκολλώνται στις επιφάνειες απομακρύνονται. Τα μηχανήματα καθαρισμού με υπερήχους καθαρίζουν τις επιφάνειες μέσω εκρήξεων μικροσκοπικών φουσαλίδων [3](Arndt, 1981).

Κατά την έκρηξη τους οι φουσαλίδες μπορούν να φτάσουν στο εσωτερικό τους σε τεράστιες πιέσεις της τάξεως των 500 bar και ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες που μπορούν να φτάσουν τους 5000 °C.

Συνεπώς η απόξεση βρωμιάς και γενικότερα ξένων υλών πάνω από την προς καθαρισμό επιφάνεια γίνεται με την εγγύτητα των τελευταίων εντός των ορίων της έκρηξης της εκάστοτε φυσαλίδας. Φυσικά μιας και δεν έγκειται διαχωρισμός επιθυμητής επιφάνειας και φερτής ύλης, εκτεταμένη ή πολύ έντονη χρήση τους μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητες φθορές στο προς καθαρισμό αντικείμενο.

Καθώς το μέγεθος και πλήθος των φυσαλίδων εξαρτάται ευθέως από τη συχνότητα των υπερήχων καθώς υψηλότερες συχνότητες παράγουν περισσότερες φυσαλίδες αλλά μικρότερου μεγέθους, ενώ αντίστοιχα χαμηλότερες συχνότητες παράγουν μεγαλύτερες φυσαλίδες αλλά σε μικρότερο αριθμό, ενδείκνυται η χρήση διαφορετικής συχνότητας ανάλογα με το προς καθαρισμό αντικείμενο. Συνήθως όταν το προς καθαρισμό αντικείμενο είναι ευπαθές και με μικρολεπτομέρειες γίνεται χρήση υψηλών συχνοτήτων (όπως κοσμήματα, νομίσματα και μικροεργαλεία ιατρικής). Σε μεγαλύτερα και πιο ανθεκτικά αντικείμενα (όπως μηχανικά μέρη κινητήρων) όπου δεν μας ενδιαφέρει τόσο η λεπτομέρεια αλλά επίσης απαιτείται και μεγαλύτερη μηχανική ισχύς για την αφαίρεση της βρωμιάς γίνεται χρήση χαμηλότερων συχνοτήτων για μεγαλύτερη απόδοση.

Οι επιδράσεις του φαινομένου είναι τόσο σημαντικές που σε πολλές περιπτώσεις η χημεία υπερήχων ονομάζεται και χημεία σπηλαιώσης. Η πλειονότητα των αντιδράσεων λόγω υπερήχων λαμβάνει χώρα στην περιοχή συχνοτήτων από 20 έως 100kHz. Η σπηλαιώση παράγει την απαιτούμενη κινητική ενέργεια που τροφοδοτεί το μηχανισμό μετουσίωσης για τη περάτωση της αντίδρασης δημιουργώντας μια αντιπαράθεση από καθαρά χημικά φαινόμενα (λόγου χάρι αντιδράσεις διάσπασης και δημιουργίας δεσμών) και μηχανικά φαινόμενα (απόξεσης, τριβής, αφαίρεσης των αερίων από το μίγμα, κατάλυσης των αφρών επιφανείας κτλ). Οι ακραίες συνθήκες εντός των φυσαλίδων έγιναν από νωρίς ορατές (υδροδυναμικό μοντέλο του Raleigh, 1917). Το μικρό τους μέγεθος (~1μm) και η παροδικότητα τους (χρόνος ζωής ~1ns) ανάγκασε τους ερευνητές να το προσεγγίσουν με φασματοσκοπικές μεθόδους (sonoluminescence) αναλύοντας πρακτικά το φως που παράγεται κατά τη κατάρρευση των φυσαλίδων, αποκαλύπτοντας συνθήκες που παραπέμπουν σε πλάσμα πάρα άλλες καταστάσεις της ύλης.

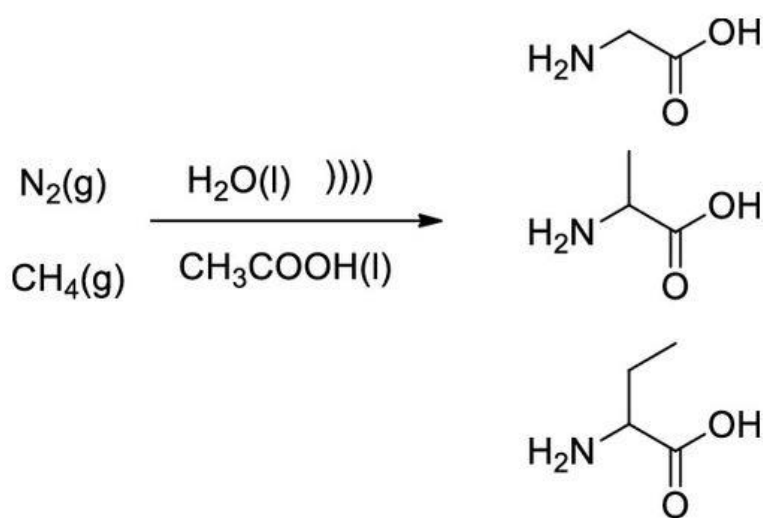


Εικόνα 7 Πρωτογενής και δευτερογενής χημεία υπερήχων

Στη πρωτογενή χημεία υπερήχων η κύρια διεργασία είναι ότι, τα πτητικά αντιδραστήρια και οι διαλύτες θα παγιδευτούν στις μικροφουσαλίδες και στη συνέχεια θα υποβληθούν σε ομολυτική διάσπαση ή και μετάπτωση σε διεγερμένες καταστάσεις (Εικόνα 7). Ωστόσο μετέπειτα λαμβάνουν χώρα δευτερογενή φαινόμενα (δευτερογενής χημεία υπερήχων) όπως ανενεργά έως τώρα στοιχεία εντός του διαλύματος θα αντιδράσουν με τα μόρια στο μέτωπο της επιφάνειας της φυσαλίδας (διότι τώρα πληρούνται οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας τοπικά για να συμβούν οι αντιδράσεις αυτές) ή θα επανασυνδιαστούν σχηματίζοντας νέα σταθερά προϊόντα. Η κατάρρευση των φυσαλίδων ακολουθείτε από ωστικά κύματα και διατμητικές δυνάμεις που δύναται να διασπάζουν τα μη πτητικά μόρια που βρίσκονται εντός βεληνεκούς τους. Στις ετερογενείς αντιδράσεις όπου υπάρχει διεπαφή στοιχείων από υγρή σε υγρή ή υγρή σε στερεή επιφάνεια, δυνάμεις όπως οι παραπάνω δημιουργούν υψηλής ταχύτητας δίνες και εν συνεχεία ακουστικές ροές (acoustical streaming) οι οποίες με τη σειρά τους ενισχύουν τη μεταφορά μάζας και ενέργειας εντός του μίγματος. Η έκρηξη των φυσαλίδων σε επιφάνειες προκαλεί μικροπίδακες, σφρηηλάτηση και διασωματιδιακές συγκρούσεις, φαινόμενα τα οποία σωρευτικά είναι υπαίτια για την έντονη μηχανική δράση και καθαριστική ικανότητα του φαινομένου της σπηλαιώσης. Σε υδατικά διαλύματα και γενικότερα μέσα τα οποία περιέχουν οξυγόνο, προκύπτει δημιουργία δραστικών ενώσεων οξυγόνου (Reactive Oxygen Species) με το υδροξείδιο -OH να είναι ο πιο σημαντικός μη εξειδικευμένος οξειδωτικός παράγοντας. Κατά συνέπεια, μια μεγάλη ποικιλία οργανικών μορίων, ιδιαίτερα ρύπων, μπορεί να αποδομηθεί μόνο με υπερήχους ή σε συνδυασμό με άλλα πρωτόκολλα. Έχουν παρατηρηθεί καλές συσχετίσεις μεταξύ των συντελεστών κατανομής οκτανόλης-νερού και των ρυθμών αντίδρασης, καθώς οι υδρόφοβοι ρύποι τείνουν να συσσωρεύονται κοντά σε φυσαλίδες σπηλαιώσης. Η κυτταροτοξικότητα που σχετίζεται με ορισμένα ROS μπορεί επίσης να αξιοποιηθεί σε ηχοδυναμικές θεραπείες, που περιλαμβάνουν τη δράση ηχοευαισθητοποιητών υπό υπερηχητική διέγερση.

Αξιοσημείωτο είναι ότι η σπηλαιώση είναι ένα γεωχημικό φαινόμενο που συμβαίνει φυσικά κάτω από έντονες υδροδυναμικές συνθήκες, τυρβώδη ρεύματα, σεισμούς ή καταρράκτες και όπου μια

δύναμη διάτμησης διακόπτει γρήγορα τη συνέχεια των υδατικών επιφανειών. Η κατάρρευση των κυμάτων στους αρχέγονους ωκεανούς θα είχε δημιουργήσει επαρκή σπηλαιώση για να προκαλέσει χημικές αντιδράσεις και, ως εκ τούτου, σχηματισμό οργανικών ενώσεων. Ο υποτιθέμενος ρόλος της σπηλαιώσης στην προβιοτική σύνθεση δομικών στοιχείων με βάση τη ζωή είχε προταθεί εδώ και πολύ καιρό, αλλά οι δυνατότητές του ελάχιστα έχουν διερευνηθεί. Μια πρόσφατη και λεπτομερής μελέτη ανέφερε ότι η σπηλαιώση μπορεί να είναι αποτελεσματική στην παραγωγή μιγμάτων αμινοξέων από πηγές άνθρακα και αζώτου που είναι διαθέσιμες στην πρώιμη βίωση [5](Dharmarathne & Grieser, 2016). Η υπερηχητική ακτινοβολία (355kHz, 70 W) ενός μείγματος αζώτου, μεθανίου, νερού και οξικού οξέος οδήγησε στον σχηματισμό λίγων αμινοξέων (γλυκίνη, αιθυλογλυκίνη και αλανίνη) με ρυθμούς στην περιοχή 1-100nM/min. [1] (Amots, 2007)



Εικόνα 8 Σύνθεση προβιοτικών αμινοξέων μέσω σπηλαιώσης

2.2 Χρυσοί κανόνες του Apfel

Η δημιουργία κανόνων και βέλτιστων τακτικών δεν άργησε να γίνει ορατή, καθώς η Χημεία όντας μια εφαρμοσμένη επιστήμη δεν απαιτούσε πάντοτε λεπτομερή γνώση των φυσικών διεργασιών του περιβάλλοντος που λαμβάνουν χώρα οι αντιδράσεις. Η δημιουργία αυτοτελή κλάδου της χημείας υπερέχων οδήγησε στη δημιουργία ενός πλαισίου μέσα από το οποίο διεζάγονταν οι μελέτες, όταν εμπλέκονταν υπέρηχοι στη πειραματική διαδικασία. Οι χρυσοί κανόνες του Apfel συνήθως εκφράζονται με Σωκρατική χροιά και είναι τρεις.

- Γνώριζε το διαλύτη σου
- Γνώριζε το ακουστικό πεδίο στο πειραματικό σου περιβάλλον
- Γνώριζε πότε κάτι συμβαίνει

Ο Apfel [2] (Apfel, 1981) αιτιολόγησε ότι ο πρώτος κανόνας προκαθορίζει το κάτω όριο δημιουργίας σπηλαιώσης, ο δεύτερος κανόνας προσδιορίζει την ακρίβεια των μετρήσεων και ο τρίτος ότι τα αποτελέσματα της σπηλαιώσης μας δίνουν πληροφορίες για το μέγεθος της σπηλαιώσης αυτής κάθε αυτής. Εν ολίγοις, οι κανόνες προειδοποιούν για τη μέτρηση και τη σημασία των ακουστικών παραμέτρων και, κατά συνέπεια, για τη σωστή χρήση και βαθμονόμηση των συσκευών υπερήχων.

Ο ορισμός και η χρήση των φυσικών παραμέτρων στον τομέα των υπερήχων είναι σπάνια προφανείς και μπορεί να αποτελέσουν πηγή παρερμηνειών και υπερεκτιμήσεων. Είναι, ωστόσο, υψίστης σημασίας για την αναπαραγωγισημότητα και θα πρέπει να παραμένουν σταθερές για συγκριτικές αναλύσεις. Οι συχνότητες υπερήχων χωρίζονται σε δύο μεγάλες ομάδες: χαμηλής συχνότητας/υψηλής ισχύος (από περίπου 18kHz έως 100kHz) και υψηλής συχνότητας/χαμηλής ισχύος (από 100kHz έως 10MHz). Ο πρώτος είναι ο συνήθης τομέας της ηχοχημείας όπου κυριαρχούν τα μηχανικά φαινόμενα, ενώ η ενισχυμένη παραγωγή ριζών και επομένως τα χημικά αποτελέσματα συνδέονται με το εύρος των υψηλών συχνοτήτων. Τα δραστικά είδη που δημιουργούνται μέσα στη φυσαλίδα που καταρρέει και διαχέονται στο περιβάλλον υγρό, ακολουθούν διαφορετική εξέλιξη ως συνάρτηση της διάρκειας ζωής και της ακτίνας της φυσαλίδας, που εξαρτώνται μεταξύ άλλων από τη συχνότητα. Επιπλέον, σε ορισμένες κοινές συσκευές, όπως τα λουτρά εμβλαπτισμού, η συχνότητα συντονισμού τροποποιείται από άλλες παραμέτρους όπως η θερμοκρασία, το επίπεδο του υγρού στη δεξαμενή και το φορτίο του μορφοτροπέα λόγω του μίγματος αντίδρασης.

Δεδομένου ότι ο ήχος προκαλείται από κύματα πίεσης, η ακουστική ένταση μπορεί να οριστεί ως η ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας και να συμβολίζεται ως :

$$I = \frac{P_A^2}{2\rho c} \quad \text{Εξίσωση 1}$$

Όπου P_A είναι το πλάτος της ακουστικής πίεσης του κύματος, ρ η πυκνότητα του υγρού μέσου και c η ταχύτητα του ήχου στο μέσο αυτό. Αυτή η έκφραση ισχύει μόνο για επίπεδα ή σφαιρικά κύματα που δημιουργούνται σε διακυμάνσεις χαμηλής πίεσης. Η σπηλαιώση σε υπέρηχους χαμηλής συχνότητας προκαλεί σημαντικές αλλαγές στις ακουστικές πιέσεις και παρατηρούνται πολύπλοκες, μη γραμμικές συμπεριφορές. Μια σχετική μέτρηση (και συνήθως χρησιμοποιείται σε χημικές μελέτες) μπορεί να ληφθεί από το πλάτος του πομπού. Ωστόσο, ένα κοινό λάθος είναι να συσχετίσουμε το φαινόμενο υπερηχητικής ισχύος με το πλάτος δόνησης επειδή η ακουστική ισχύς που μεταδίδεται εξαρτάται από την επιφάνεια εκπομπής. Ακόμη χειρότερα, εάν το πλάτος διατηρείται στο ίδιο επίπεδο κατά τη διάρκεια μιας χημικής αντίδρασης, οποιαδήποτε τροποποίηση του συστήματος (όπως θερμοκρασία, ιξώδες, συγκέντρωση κ.λπ.) θα τροποποιήσει επίσης την ισχύ. Με άλλα λόγια, το πλάτος πρέπει να αλλάξει για να παραμείνει σταθερή η ισχύς. Τούτου λεχθέντος, η εκτέλεση μιας αντίδρασης σε διαφορετικά πλάτη δόνησης επιτρέπει συγκρίσεις της συνθετικής

απόδοσης, υπό την προϋπόθεση ότι προσδιορίζονται άλλες παράμετροι, συμπεριλαμβανομένου του σχήματος και των διαστάσεων του συγκροτήματος ανιχνευτή.

Πιθανώς ο καλύτερος τρόπος για να χαρακτηριστεί η ενέργεια που παρέχεται στον αντιδραστήρα είναι η έννοια της υπερηχητικής ισχύος, δηλαδή η μεταδιδόμενη ακουστική ισχύς (σε Watt ή Milliwatt) ή η πυκνότητα ισχύος (W/cm²). Αυτή η τιμή μπορεί να συναχθεί από φυσικές ή χημικές μετρήσεις. Η ευκολότερη φυσική μέθοδος συνεπάγεται στην προσάρτηση του δοχείου αντίδρασης σε ένα θερμιδόμετρο, όπου η θερμοκρασία μετράται και απεικονίζεται σε γραφική παράσταση με το χρόνο. Πάνω από το κατώφλι σπηλαίωσης, η ακουστική ενέργεια διαχέεται εν μέρει σε θερμότητα. Η θερμιδομετρική ισχύς (σε Watt) μπορεί να συναχθεί από την ακόλουθη σχέση με την κλίση $\Delta T/\Delta t$:

$$P(w) = m C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad \text{Εξίσωση 2}$$

όπου m είναι η μάζα του υγρού που ακτινοβολείται με υπερήχους και C_p η ισοβαρής θερμοδιαπερατότητα. Είναι προφανές, λόγω της μη γραμμικής συμπεριφοράς των φυσαλίδων σπηλαίωσης, ότι η θερμοκρασία του όγκου μπορεί να μην είναι χωρικά ομοιογενής και να συμβαίνουν διακυμάνσεις μέσα στο δοχείο αντίδρασης. Συνεπώς, η ακτινοβολία που επικεντρώνεται σε μικρούς όγκους είναι επιθυμητή για την αναζήτηση της αναπαραγωγιμότητας. Η χημική δοσομετρία περιλαμβάνει την εκτίμηση των ειδών ριζών με ηχόλυση, η οποία μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με μετρήσεις UV-vis ή φθορισμού. Σε υδατικά μέσα, οι ρίζες OH δημιουργούνται και παρακολουθούνται με διαφορετικές μεθόδους, με πιο δημοφιλή να είναι η αντίδραση Weissler, που βασίζεται στην οξειδωση ενός υδατικού διαλύματος KI σε I_2 . Η προσθήκη ορισμένων αλογονωμένων διαλυτών ενισχύει σημαντικά τον ρυθμό οξειδωσης. Σε οργανικούς διαλύτες, μπορούν να δημιουργηθούν ρίζες διαφορετικές από το OH• και η αποσύνθεση αντιδραστηρίων όπως το DPPH (2,2-διφαινυλ-1-πικρυλ-υδραζύλιο) έχει γίνει ένας πολύ ευαίσθητος ανιχνευτής οργανικής ηχολύσεως. Η περιστροφή των ριζών με παρακολούθηση με ESR είναι μια ακριβής μέθοδος, που δεν είναι πάντα διαθέσιμη σε κάθε εργαστήριο. Τα πιο εξελιγμένα και ακριβή πρωτόκολλα εκμεταλλεύονται τα φάσματα ηχοφωταύγειας ή τη χαρτογράφηση χημειοφωταύγειας που λαμβάνονται με οξειδωτική αποδόμηση της λουμινόλης. Αυτές οι μέθοδοι παρέχουν μια τοπολογία του υπερηχητικού πεδίου, δηλαδή τη χωρική κατανομή της ακουστικής ενέργειας και τη θέση των μεγίστων στη σπηλαίωση [10] (Juarez, 2015).

2.3 Πώς λειτουργεί ο καθαρισμός με υπερήχους

Ο καθαρισμός με υπερήχους είναι κατάλληλος για μια μεγάλη ποικιλία υλικών, συμπεριλαμβανομένων μετάλλων, γυαλιού, καουτσούκ, κεραμικών και ορισμένων σκληρών πλαστικών. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για την αφαίρεση κολλημένων ρύπων από περίπλοκα αντικείμενα με τυφλές οπές, ρωγμές και εσοχές. Παραδείγματα μολυσματικών ουσιών που αφαιρούνται μέσω καθαρισμού με υπερήχους περιλαμβάνουν σκόνη, βρωμιά, λάδι, γράσο, χρωστικές ουσίες, παράγοντες ροής και δακτυλικά αποτυπώματα. Το υγρό που χρησιμοποιείται στα βιομηχανικά συστήματα καθαρισμού με υπερήχους μπορεί να είναι είτε με βάση το νερό (υδατικό) είτε με βάση διαλύτη, συνήθως αλκοόλες (πχ αιθανόλη, ισοπροπυλική αλκοόλη) και διαλύτες με βάση υδρογονάνθρακες (πχ τολουόλη, ακετόνη και ξυλένιο). Και οι δύο τύποι διαλυμάτων καθαρισμού περιέχουν παράγοντες διαβροχής (επιφανειοδραστικές ουσίες) για τη μείωση της επιφανειακής τάσης και την αύξηση της σπλαιώσης. Τα υδατικά διαλύματα καθαρισμού είναι γενικά πιο περιορισμένα στην αποτελεσματικότητα καθαρισμού, αλλά καλύτερα για το περιβάλλον από τα διαλύματα καθαρισμού με διαλύτες όπου η διαχείριση των αποβλήτων απαιτεί ιδιαίτερη κατεργασία [7] (Fuchs's, 2015).

Ο χρόνος που απαιτείται για τον καθαρισμό με υπερήχους εξαρτάται από το υλικό και το είδος των ρύπων, αλλά οι τυπικοί χρόνοι καθαρισμού κυμαίνονται από 3 έως 6 λεπτά. Ορισμένα ευαίσθητα αντικείμενα, όπως τα ηλεκτρονικά, ενδέχεται να απαιτούν μεγαλύτερο χρόνο καθαρισμού. Η υψηλότερη θερμοκρασία βοηθά στη χαλάρωση των ρύπων και των χημικών δεσμών πιο γρήγορα, έτσι τα περισσότερα καθαριστικά βιομηχανικών εξαρτημάτων λειτουργούν βέλτιστα σε θερμοκρασίες στην περιοχή 55 – 60 °C. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο καθαρισμός σε λουτρό υπερήχων δεν αποστειρώνει αντικείμενα. Στις ιατρικές εφαρμογές, η αποστείρωση συνήθως ακολουθεί τον καθαρισμό με υπερήχους ως ένα άλλο βήμα της διαδικασίας

2.4 Τι είναι ο μορφοτροπέας υπερήχων

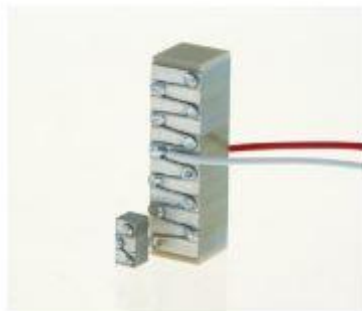


Εικόνα 9 Τυπικός μορφοτροπέας υπερήχων

Ο μορφοτροπέας υπερήχων είναι το βασικό εξάρτημα σε ένα σύστημα καθαρισμού με υπερήχους. Είναι μια συσκευή που παράγει ήχο πάνω από το εύρος της ανθρώπινης ακοής, συνήθως ξεκινώντας από τα 20kHz, γνωστές και ως υπερηχητικές δονήσεις. Ένας μορφοτροπέας υπερήχων αποτελείται από ένα ενεργό στοιχείο, ένα υπόστρωμα και μια πλάκα ακτινοβολίας. Τα περισσότερα καθαριστικά υπερήχων χρησιμοποιούν πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους ως ενεργό στοιχείο. Ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε ενέργεια υπερήχων μέσω του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, στο οποίο οι κρύσταλλοι αλλάζουν μέγεθος και σχήμα όταν λαμβάνουν ηλεκτρική ενέργεια. Η βάση ενός μορφοτροπέα υπερήχων είναι ένα παχύ υλικό που απορροφά την ενέργεια που ακτινοβολεί από το πίσω μέρος του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου. Η πλάκα ακτινοβολίας σε έναν μορφοτροπέα υπερήχων λειτουργεί ως διάφραγμα που ενισχύει την διάδοση των υπερηχητικών κυμάτων (πίεσης) στο ρευστό. Έτσι, όταν ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος δέχεται παλμούς ηλεκτρικής ενέργειας, η ακτινοβολούμενη πλάκα ανταποκρίνεται με υπερηχητικούς κραδασμούς στο διάλυμα καθαρισμού.

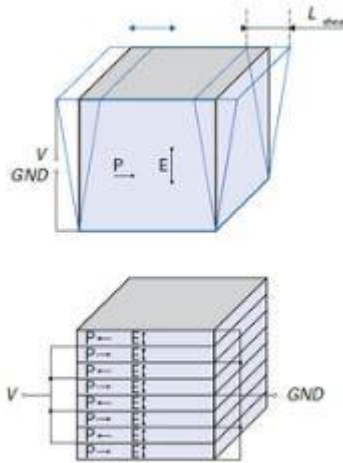
Γενικότερα οι μορφοτροπέες παράγουν πολύ μηχανικό έργο σε σχέση με το μέγεθος τους επιτυγχάνοντας μεγάλη αναλογία ισχύος – μεγέθους. Λόγο του γεγονότος μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανικό έργο συχνά αναφέρονται εναλλακτικά και ως κινητήρες. Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο παράγει κίνηση παράλληλα του ηλεκτρικού πεδίου. Ωστόσο πολλοί μορφοτροπέες λειτουργούν μέσω του αντίστροφου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, όπου η κίνηση παράγεται κάθετα του ηλεκτρικού πεδίου. Γενικότερα υπάρχουν τέσσερις κύριες κατηγορίες μορφοτροπέων ανάλογα με τη γεωμετρία των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων που τους αποτελούν και το τύπο κίνησης που παράγουν.

Διαμήκης μορφοτροπείς (γνωστοί και ως πιεζοηλεκτρικές στήλες). Όπως καταδεικνύει και το όνομα τους οι μορφοτροπείς αυτοί είναι στήλες από πιεζοηλεκτρικά στοιχεία τοποθετημένα το ένα πάνω στο άλλο, συνδυάζοντας αυξητικά με τον τρόπο αυτό της διαστολή του κάθε στοιχείου με σκοπό τη παραγωγή της επιθυμητής κίνησης. Κάνοντας χρήση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου αυτή η κατηγορία μορφοτροπέων επιτυγχάνει 0.1% έως 0.15% διαστολή του ολικού μήκους τους. Έχουν μεγάλη πυκνότητα δύναμης (μια τυπική τιμή είναι γύρο στα 30 N/mm^2) παράγοντας με τον τρόπο αυτό χρηστική δύναμη της τάξεων των χιλιάδων Newton. Οι διαμήκης μορφοτροπείς έχουν μεγάλη συχνότητα συντονισμού καθιστώντας τους ιδανικούς για εφαρμογές όπου απαιτείται μεγάλο μηχανικό έργο.



Εικόνα 10 Ένας τυπικός διαμήκης μορφοτροπέας

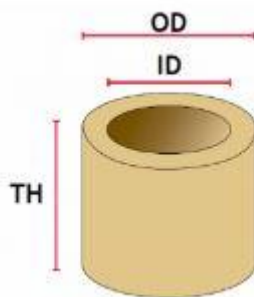
Διατμητικοί μορφοτροπείς. Ομοιάζουν με τους διαμήκης μορφοτροπείς ως προς το γεγονός ότι αποτελούνται και αυτοί από πιεζοηλεκτρικά στοιχεία τοποθετημένα σε στήλες, διαφέρουν όμως ως προς τον τρόπο με τον οποίο εφαρμόζεται η ηλεκτρική τάση στα στοιχεία αυτά και το είδος της κίνησης που παράγουν. Η τάση στα άκρα των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων εφαρμόζεται οριζόντια και το ηλεκτρικό πεδίο κάθετα στην επιφάνεια τους. Η μετατόπιση προκύπτει για το λόγο αυτό κάθετα της επιφάνειας των στοιχείων παράγοντας εγκάρσια κίνηση. Το ύψος των στηλών των διατμητικών μορφοτροπέων περιορίζεται από τις διατμητικές τάσεις και κάμψη του πιεζοηλεκτρικού υλικού. Συχνά για το λόγο αυτό συνδυάζονται με διαμήκης μορφοτροπείς σε συστήματα πολλών αξόνων.



Εικόνα 11 Τυπικός διατμητικός μορφοτροπέας

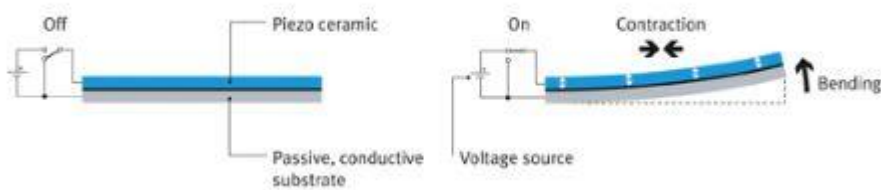
Στην Εικόνα 4 παρουσιάζεται το σχέδιο ενός τυπικού διατμητικού μορφοτροπέα. Το διάνυσμα P αναφέρεται στη πόλωση του πιεζοηλεκτρικού υλικού, το διάνυσμα E στη διεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου και το διάνυσμα L στη κατεύθυνση της μετατόπισης.

Κυλινδρικοί μορφοτροπέες. Είναι και η κατηγορία μορφοτροπέα που χρησιμοποιήθηκε για τη κατασκευή της συσκευής καθαρισμού υπερήχων. Αυτή η κατηγορία μορφοτροπέων έχει ακτινική πόλωση και κάνει χρήση του αντίστροφου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου για τη παραγωγή κίνησης. Αυτό το είδος μορφοτροπέων παρουσιάζει ακτινική, διαμήκη και πλάγια μετατόπιση (στρέψη). Οι μορφοτροπέες αυτού του είδους δεν είναι ιδανικοί για τη παραγωγή μεγάλου μηχανικού έργου αλλά παράγουν μικροσκοπικές ταλαντώσεις ιδεατές για εφαρμογές όπως τη δημιουργία υπερήχων ή εφαρμογές που απαιτούν κινήσεις της τάξεως των μικρονίων για μικροσκοπία σάρωσης και μικροδοσομετρητές (άντληση ναυολίτρων).



Εικόνα 12 Τυπική γεωμετρία κυλινδρικού μορφοτροπέα

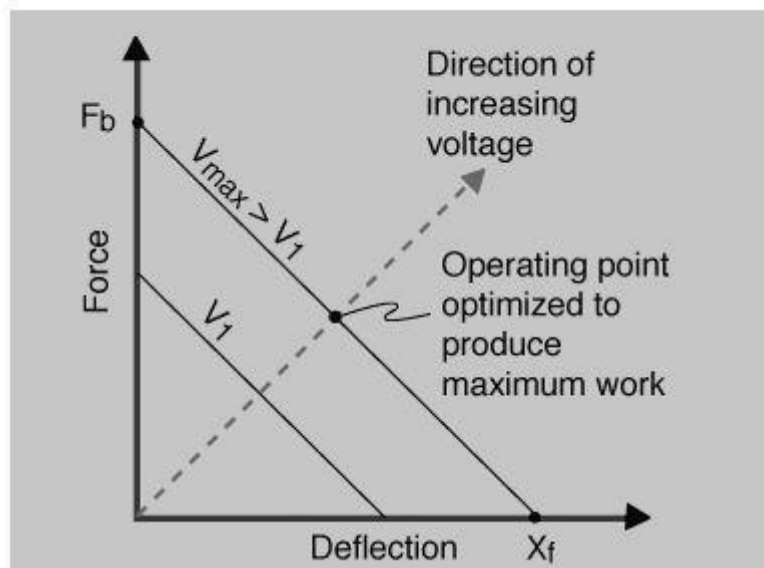
Συμβαλλόμενοι μορφοτροπέες. Πρόκειται περί επίπεδων μορφοτροπέων με δύο πιεζοηλεκτρικά στοιχεία (πλάκες) που παράγουν κίνηση μόνο όταν τα δύο στοιχεία δρουν συνδιαστικά. Αυτή η κατηγορία μορφοτροπέων παράγει κίνηση μόνο προς μία κατεύθυνση κάνοντας χρήση του αντίστροφου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Έχουν συνήθως μικρή μετατόπιση (μια τυπική τιμή είναι τα 20 μικρόνια) αλλά μπορούν να παράγουν δυνάμεις της τάξεως των εκατοντάδων Newton's.



Εικόνα 13 Απεικόνιση ενός συμβαλλόμενου μορφοτροπέα στρέψης

Αν τοποθετήσουμε ένα συμβαλλόμενο μορφοτροπέα πάνω σε μία βάση ή υπόστρωμα τότε δημιουργείτε ένας συμβαλλόμενος μορφοτροπέας στρέψης. Στη περίπτωση αυτή με την εφαρμογή τάσης στο μορφοτροπέα το ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο τείνει να διασταλεί ενώ το άλλο να συσταλεί. Το αποτέλεσμα αυτής της διεργασίας είναι μια μεγάλη μετατόπιση (τυπικά μερικά χιλιοστά) αλλά μικρή παραγωγή μηχανικού έργου.

Γενικότερα για το χαρακτηρισμό ενός μορφοτροπέα δύο παράμετροι λαμβάνονται κυρίως υπόψη, η ελεύθερη εκτροπή (X_f) και η ανασταλτική δύναμη (F_b). Η ελεύθερη εκτροπή είναι η επιτυχούσα κίνηση όταν έχει εφαρμοστεί η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση και δε παράγεται δύναμη. Η ανασταλτική δύναμη αντιστοίχως είναι η μέγιστη επιτυχούσα δύναμη όταν έχει εφαρμοστεί η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση χωρίς να επιτρέπεται στο μορφοτροπέα να κινηθεί.



Διάγραμμα 1 Ελεύθερης εκτροπής – Ανασταλτικής δύναμης

Στο Διάγραμμα 1 φαίνεται η γραφική παράσταση ελεύθερη εκτροπής (X_f) και ανασταλτικής δύναμης (F_b). Για να θεωρηθεί η λειτουργία ενός μορφοτροπέα βέλτιστη για κάποια εφαρμογή θα πρέπει να αποδίδει την απαιτούμενη για την εφαρμογή δύναμη στο μισό της ελεύθερης εκτροπής του.

2.5 Τι είναι μια γεννήτρια υπερήχων

Η ηλεκτρονική γεννήτρια υπερήχων είναι επί της ουσίας ένα τροφοδοτικό. Μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια εναλλασσόμενου ρεύματος από μια πηγή ισχύος, όπως μια πρίζα τοίχου, σε ηλεκτρική ενέργεια κατάλληλη για την ενεργοποίηση ενός μορφοτροπέα σε συχνότητα υπερήχων. Με άλλα λόγια, η γεννήτρια υπερήχων στέλνει ηλεκτρικούς παλμούς υψηλής τάσης στον μορφοτροπέα.

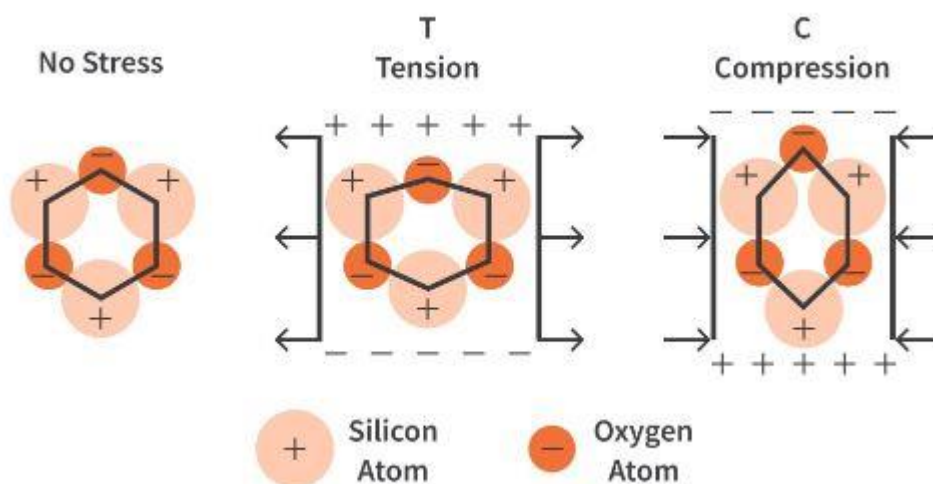


Εικόνα 14 Τυπική γεννήτρια υπερήχων

Η αρχή λειτουργίας της γεννήτριας υπερήχων είναι να στέλνει παλμούς ηλεκτρικής ενέργειας στον μορφοτροπέα, ο οποίος μετατρέπει την ενέργεια σε μηχανικά κύματα (πίεσης) στο υγρό καθαρισμού. Ενώ η συχνότητα υπερήχων των 40kHz είναι μακράν η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη συχνότητα για τον καθαρισμό εξαρτημάτων με υπερήχους, ορισμένες εφαρμογές απαιτούν χαμηλότερη ή υψηλότερη συχνότητα για καλύτερα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, μεγαλύτερα, πολύ λερωμένα αντικείμενα μπορεί να χρησιμοποιούν συχνότητα 20kHz, καθώς αυτό αποδίδει μεγαλύτερες, ισχυρότερες φυσαλίδες καθαρισμού αλλά συνάμα λιγότερες φυσαλίδες ανά δευτερόλεπτο. Στο άλλο άκρο του φάσματος, ορισμένα πολύ μικρά, ευαίσθητα αντικείμενα μπορεί να απαιτούν υψηλότερες συχνότητες καθαρισμού με υπερήχους, έως και 200kHz. Γενικά, μια υψηλότερη συχνότητα επιτρέπει τον καθαρισμό υψηλότερου επιπέδου περίπλοκων λεπτομερειών

2.6 Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

Το φαινόμενο της πιεζοηλεκτρικότητας αναφέρεται στην ιδιότητα ορισμένων υλικών να δημιουργούν ηλεκτρικό φορτίο όταν υπόκεινται σε μηχανική τάση ή παραμόρφωση και αντιστρόφως, να υφίστανται μηχανική παραμόρφωση όταν εφαρμόζεται ένα ηλεκτρικό πεδίο. Αυτό το φαινόμενο ανακαλύφθηκε από τον γάλλο φυσικό Πιέρ Κιουρί και τον αδελφό του Ζακ Κιουρί το 1880.



Εικόνα 15 Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο σε ένα κρύσταλλο Quartz

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά, όπως ορισμένα κρύσταλλα (π.χ. κρύσταλλος Quartz, τουρμαλίνη) και κεραμικά (π.χ. πεντατιτανικό ζirkόνιο - PZT), εκδηλώνουν αυτήν τη συμπεριφορά λόγω της μοναδικής κρυσταλλικής δομής τους δηλαδή της τριτοταγής διάταξης των ατόμων τους. Σε αυτά τα υλικά, θετικά και αρνητικά φορτία κατανέμονται ασύμμετρα, με αποτέλεσμα να υπάρχει ένας διπολικός χώρος εντός της κρυσταλλικής δομής [12] (Lewis, 2005).

Όταν εφαρμόζεται μηχανική τάση σε ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό, προκαλεί μια παραμόρφωση ή μετατόπιση της κρυσταλλικής δομής, που οδηγεί σε χωρισμό των θετικών και αρνητικών φορτίων. Αυτή η διάχυση των φορτίων δημιουργεί ένα ηλεκτρικό δυναμικό διάστασης, δημιουργώντας ένα ηλεκτρικό πεδίο και αντίστοιχα φαινόμενα ηλεκτρικά φορτία.

Αντιστρόφως, αν εφαρμοστεί ένα ηλεκτρικό πεδίο σε ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό, το ηλεκτρικό πεδίο προκαλεί μια μηχανική παραμόρφωση ή μετατόπιση στην κρυσταλλική δομή, προκαλώντας την αλλαγή του σχήματος του υλικού.

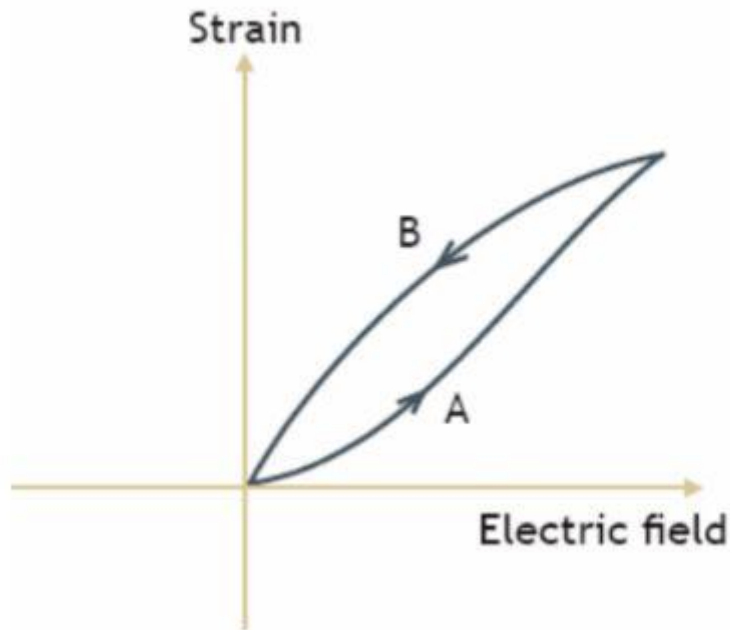
Η επαναλαμβανόμενη παρουσία και εν συνεχεία απουσία ηλεκτρικού πεδίου σε ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό θα προκαλέσει μια παλινδρομική αλληλουχία πίεσης του και επαναφοράς στην αρχική του θέση μετατρέποντας το υλικό αυτό σε ταλαντωτή. Είναι κεντρικής σημασίας για την επίτευξη της

επιθυμητής συχνότητας ταλάντωσης να εκτιμηθεί ο χρόνος που απαιτείται για τα άτομα που αποτελούν το μόριο του πιεζοηλεκτρικού υλικού να επιστρέψουν στις αρχικές τους θέσεις στο χώρο μετά τη παύση επιβολής του ηλεκτρικού πεδίου. Αυτό συμβαίνει διότι αν ο χρόνος αυτός είναι μεγάλος, θέτει ένα άνω όριο στις συχνότητες ταλάντωσης που μπορούν να επιτευχθούν από τα πιεζοηλεκτρικά υλικά. Πρακτικά εάν υποθέσουμε ότι δεν υπάρχει απτός χρονικός περιορισμός στο ρυθμό που εφαρμόζουμε και παύουμε το επιβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο στο πιεζοηλεκτρικό υλικό, τότε ο μόνος περιορισμός που απομένει είναι ο χρόνος επαναφοράς στην αρχική κατάσταση του μορίου προ της εφαρμογής του πεδίου. Εάν γίνει εφαρμογή του ηλεκτρικού πεδίου πριν την επαναφορά στην αρχική θέση τότε μειώνεται δραματικά το πλάτος της ταλάντωσης και άρα η απόδοση του ταλαντωτή.

Οι χρόνοι επαναφοράς στην αρχική θέση εξαρτώνται από το υλικό και έχουν μεγάλη διακύμανση από μερικά κλάσματα του δευτερολέπτου έως και λεπτά της ώρας. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται υστέρηση. Προφανώς στους μορφοτροπείς υπερήχων επιλέγονται υλικά με μικρούς χρόνους υστέρησης (συνήθως κεραμικά) ώστε να μπορούν να επιτευχθούν και οι ανάλογες συχνότητες ταλάντωσης.

2.7 Αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

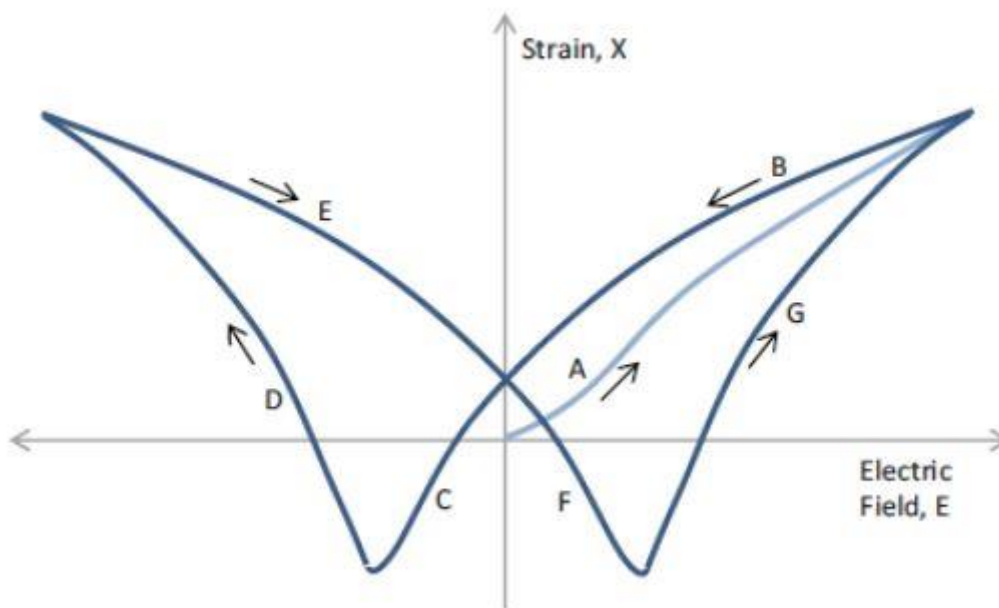
Σε μια δεύτερη προσέγγιση η παύση του πεδίου θα μπορούσε να αντικατασταθεί με την εφαρμογή ενός αντίθετου ηλεκτρικού πεδίου με σκοπό τη γρηγορότερη επαναφορά στην αρχική θέση του υλικού. Εάν γίνει η γραφική παράσταση της μετατόπισης του υλικού με την τάση του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου, παρατηρείται ότι η μετατόπιση δεν ακολουθεί την ίδια διαδρομή για την επιστροφή στην αρχική κατάσταση του υλικού (Εικόνα 5)



Διάγραμμα 2 τάσης ηλεκτρικού πεδίου – μετατόπισης (strain) υλικού

Παρατηρούμε ότι η διαδρομή A δεν είναι συμμετρική ως προς την ευθεία $y=x$ με τη διαδρομή B, το οποίο σημαίνει ότι αντιστροφή της τάσης του ηλεκτρικού πεδίου δεν επιφέρει ακριβώς τα αντίθετα αποτελέσματα. Αυτό συμβαίνει διότι τα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι σιδηροηλεκτρικά (ferroelectric). Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν μια αυθόρμητη ηλεκτρική πόλωση που δύναται να αντιστραφεί με την εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου με αποτέλεσμα την δημιουργία βρόγχων υστέρησης όταν το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο αντιστραφεί. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι πριν την πλήρη αποκατάσταση της πόλωσης επέρχεται η επόμενη αντιστροφή του ηλεκτρικού πεδίου με αποτέλεσμα απομεινάρια της πρότερης πόλωσης να επηρεάζουν την επόμενη. Το φαινόμενο της υστέρησης ποσοτικοποιείται ως ο λόγος της μέγιστης διαφοράς των καμπύλων A και B προς τη μέγιστη απομάκρυνση [15] (Wang, 2012).

Η εναλλαγή του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου στο πιεζοηλεκτρικό υλικό (γνωστή και ως διπολική λειτουργία) μπορεί να παρασταθεί στο διάγραμμα έντασης εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου – απομάκρυνσης.



Διάγραμμα 3 Ένταση εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού – Απομάκρυνσης πιεζοηλεκτρικού υλικού

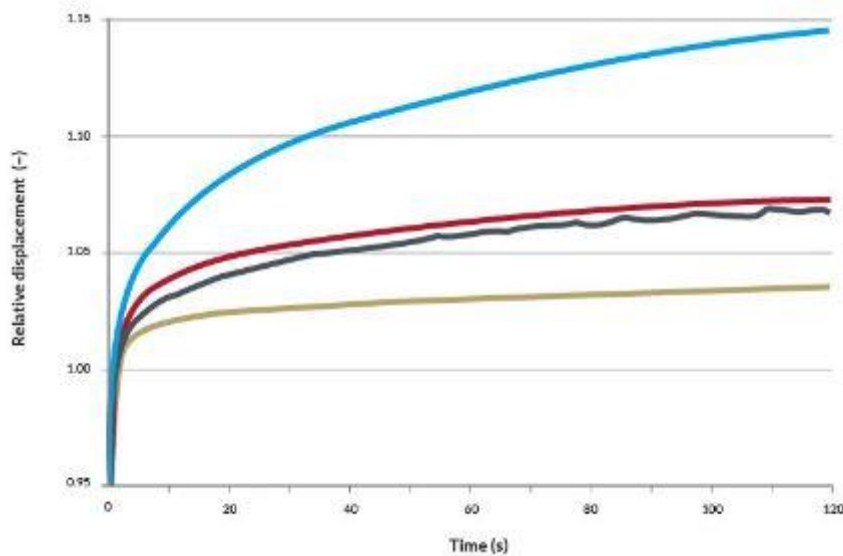
Το Διάγραμμα 2 λόγω του σχήματος του συνήθως αναφέρεται ως διάγραμμα πεταλούδα. Όταν το ηλεκτρικό πεδίο εφαρμόζεται για πρώτη φορά στο πιεζοηλεκτρικό υλικό η αύξηση της μετατόπισης είναι ως επί το πλείστο γραμμική, ακολουθώντας την αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (διαδρομή A). Η μέγιστη απομάκρυνση περιορίζεται από το κορεσμό της πόλωσης εντός πιεζοηλεκτρικού υλικού. Όταν όμως η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου αρχίσει να μειώνεται, η απομάκρυνση δεν μειώνεται με τον ίδιο ρυθμό αλλά βραδύτερα (διαδρομή B) και καθώς η ένταση του ηλεκτρικού πλησιάζει προς το μηδέν ο ρυθμός μείωσης της απομάκρυνσης αυξάνει γρηγορότερα του αντίστοιχου ρυθμού μείωσης του ηλεκτρικού πεδίου (διαδρομή C). Κατόπιν αφού η πόλωση του πιεζοηλεκτρικού υλικού έχει πλήρως αντιστραφεί, η απομάκρυνση αρχίζει να κινείται προς τη μέγιστη τιμή της προς την αντίθετη κατεύθυνση μέχρι το κορεσμό της αρνητικής αυτή τη φορά πόλωσης (διαδρομή D). Όταν πλέον το ηλεκτρικό πεδίο ξανά αναστραφεί, ο ρυθμός μείωσης της απομάκρυνσης γίνεται μικρότερος από τον αντίστοιχο του ηλεκτρικού πεδίου (διαδρομή E) και καθώς το ηλεκτρικό πεδίο μειώνεται συνεχώς ο ρυθμός μεταβολής της απομάκρυνσης αυξάνεται άνω του ρυθμού μεταβολής του ηλεκτρικού πεδίου (διαδρομή F). Τελικά το πιεζοηλεκτρικό υλικό αυξάνει την απομάκρυνση του έως ότου αυτή πάρει τη μέγιστη τιμή της (διαδρομή G) μετά το κορεσμό της πόλωσης του υλικού, κλείνοντας έτσι το βρόγχο.

Η υστέρηση αυξάνεται ανάλογα με την τάση του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου και μπορεί να φτάσει ποσοστιαία μέχρι και το 10~15% της κίνησης στους μορφοτροπείς. Σε μερικούς μορφοτροπείς με ειδική γεωμετρία όπως με πλάκες διάτμησης το ποσοστό αυτό μπορεί να φτάσει και το 40%.

2.8 Πιεζοηλεκτρικός ερπυσμός (piezoelectric creep)

Πρόκειται για ένα παρόμοιο φαινόμενο με το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό που εμφανίζεται κατά τη λειτουργία των μορφοτροπέων. Πρόκειται όπως και πριν για απομάκρυνση όμως αυτή τη φορά οφείλεται στο σταθερό ηλεκτρικό πεδίο.

Όταν εφαρμόσουμε ηλεκτρική τάση στο μορφοτροπέα, αυτός θα φτάσει τη μέγιστη θεωρητική του απομάκρυνση σχεδόν ακαριαία. Παρόλα αυτά το υλικό συνεχίζει να διαστέλλεται (ή να συρρικνώνεται) ακόμα και όταν πλέον παύσει η τάση να μεταβάλλεται διότι τα δίπολα στο εσωτερικό του πιεζοηλεκτρικού υλικού απαιτούν περισσότερο χρόνο ώστε να επανατοποθετηθούν και να επέλθει ισορροπία. Το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρικού ερπυσμού μπορεί να διαρκέσει από λεπτά έως και ώρες και ο ρυθμός μεταβολής του φαινομένου ελαττώνεται με τη πάροδο του χρόνου [11] (Jung, 2000).

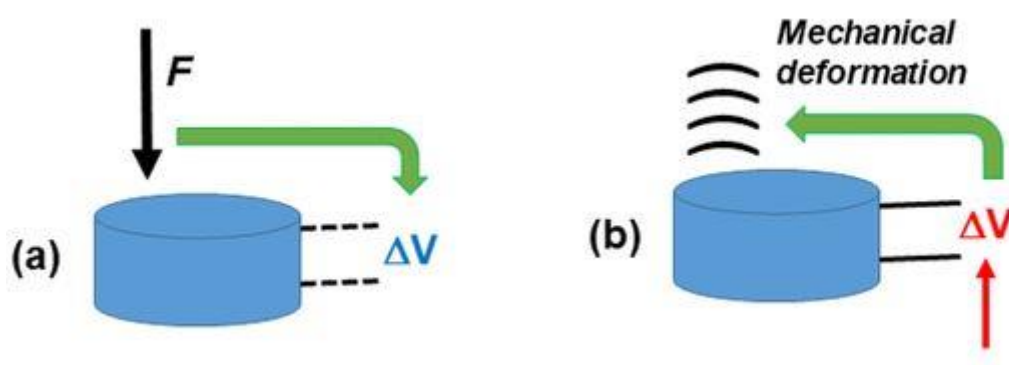


Διάγραμμα 4 Απομάκρυνση υλικού – Χρόνος λόγω ερπυσμού για τέσσερα διαφορετικά υλικά

Στο Διάγραμμα 3 βλέπουμε την απομένουσα μετατόπιση λόγω ερπυσμού στο υλικό κατασκευής του μορφοτροπέα για τέσσερα διαφορετικά πιεζοηλεκτρικά υλικά συναρτήσει του χρόνου.

2.9 Πιεζοηλεκτρισμός και Πιεζο-Οξειδοαναγωγική Χημεία

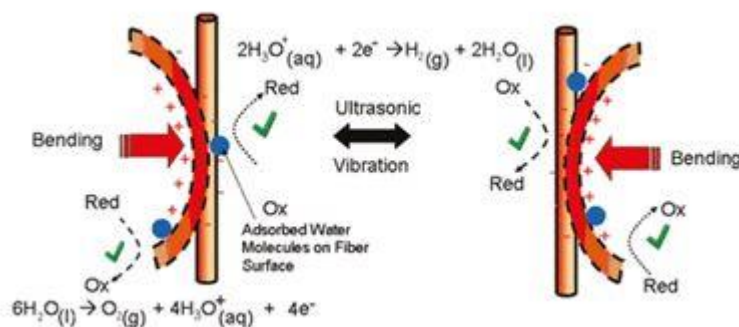
Ο πιεζοηλεκτρισμός προέρχεται από την έλλειψη κέντρου συμμετρίας στην κρυσταλλική δομή και το ανισότροπο αυτό φαινόμενο μπορεί να παρατηρηθεί μόνο σε ορισμένες κατευθύνσεις φυσικών και τεχνητών κρυστάλλων. Μαζί με τους πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς, έχουν χρησιμοποιηθεί και μαγνητοσυστολικά υλικά, όπου ένα μαγνητικό πεδίο μετατρέπεται σε μηχανική κίνηση. Ωστόσο, η ανάπτυξη πιεζοηλεκτρικών κεραμικών με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες καθιστά αυτά τα υλικά κατάλληλα για τα περισσότερα ισχυρά συστήματα υπερήχων. Επιπλέον, οι πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι μπορούν επίσης να είναι σιδηροηλεκτρικοί με βρόχο υστέρησης, δηλαδή με μια μη γραμμική σχέση μεταξύ της πόλωσης και του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου. Τα κοινά πιεζοηλεκτρικά υλικά περιλαμβάνουν οξείδια όπως BaTiO_3 , PbTiO_3 και LiNbO_3 μαζί με πιο σύνθετες συνθέσεις, αν και σε όλες τις περιπτώσεις παρουσιάζουν δομές τύπου περοβσκίτη. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο πιεζοηλεκτρισμός μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με ντόπινγκ μετάλλων, το οποίο μπορεί να βρει περαιτέρω εφαρμογή στην απεικόνιση σόναρ και υπερήχων [6] (Eitel, 2010).



Εικόνα 16 Σχηματική απεικόνιση (α) πιεζοηλεκτρικού φαινομένου και (β) αντίστροφου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά, έχει αποδειχθεί ότι καταλύουν αντιδράσεις οξειδοαναγωγής υπό μηχανικό έργο, όπως αυτές που παράγονται από συνθήκες διάτμησης υπερήχων χαμηλής συχνότητας καθώς και από ισχυρούς μηχανικούς κραδασμούς. Πιστεύεται ότι δημιουργούνται φορτία στον καταλύτη, προκαλώντας έτσι μια τάση από καταπόνηση που μπορεί να συζευχθεί με μεταφορά ηλεκτρονίων με υποστρώματα. Τέτοιοι καταλύτες μπορούν να θεωρηθούν ως ανάλογοι με τους φωτοοξειδωτικούς καταλύτες. Για να κατανοήσουμε πώς ο πιεζοηλεκτρισμός μπορεί να μεσολαβήσει σε έναν οξειδοαναγωγικό μετασχηματισμό, χρειάζονται ορισμένες φυσικές εκτιμήσεις, με βάση το ότι υπάρχουν ευθυγραμμισμένα δίπολα μέσα στο στερεό. Μια συμπιεστική δύναμη θα μειώσει τον διαχωρισμό των δίπολων, οδηγώντας έτσι σε ένα καθαρό φορτίο στις επιφάνειες του υλικού και ως εκ

τούτου σε μια τάση. Αντίθετα, μια δύναμη εφελκυσμού θα παράγει αντίθετη τάση. Ως αποτέλεσμα, ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό συνδυάζει μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες.



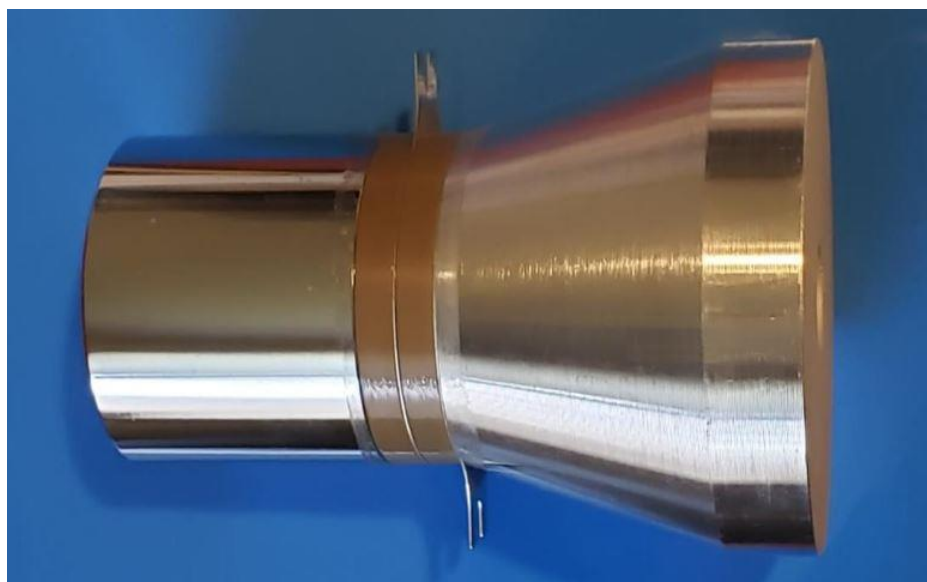
Εικόνα 17 Το BaTiO3 ή το ZnO παρουσιάζουν ακουστικές δονήσεις που προκαλούν διάσπαση του νερού μέσω πιεζοηλεκτρικού φαινομένου

Η ανάδευση με υπερήχους ενός πιεζοηλεκτρικού υλικού μπορεί να είναι επαρκής για τη δημιουργία ικανού ηλεκτροχημικού δυναμικού που απαιτείται για τη διάσπαση του νερού. Έτσι, οι υδροθερμικά συντιθέμενες μικροΐνες ZnO (που παρουσιάζουν επίσης πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες) και οι μικροδενδρίτες BaTiO3 δονήθηκαν με υπερήχους, αναπτύσσοντας έτσι ένα φορτίο που προκαλείται από καταπόνηση στις επιφάνειές τους και προκαλώντας την απελευθέρωση H₂ και O₂ από το νερό. Αυτό το φαινόμενο είναι εννοιολογικά διαφορετικό από άλλες ηχοχημικές και μηχανοκαταλυτικές διεργασίες όπου το αντιδραστήριο υφίσταται μια αντίδραση οξειδοαναγωγής για τη διάσπαση του νερού. Ο πιεζοηλεκτρικός καταλύτης εμπλέκεται στη δωρεά ηλεκτρονίων και οπών που προκαλούνται από καταπόνηση χωρίς αποσύνθεση ή αλλαγή οξειδοαναγωγής. Η ακτινοβολία με έναν μορφοτροπέα υπερήχων (ο οποίος εκμεταλλεύεται στην πραγματικότητα το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο) οδηγεί στην ταχεία παραγωγή H₂ και O₂, με την παραγωγή αερίου να σταματά όταν απενεργοποιείται ο υπέρηχος. Αυτό το είδος μικροσκοπικών συσκευών για χαμηλού κόστους διαχωρισμό νερού μπορεί να είναι πλεονεκτικό σε σχέση με άλλες ηλεκτροχημικές και φωτοχημικές διαδικασίες, αν και η βέλτιστη απόδοση εξαρτάται τόσο από τα μήκη όσο και από τη συχνότητα συντονισμού του πιεζοηλεκτρικού υλικού. Οι μακρύτερες ίνες μπορεί να υποστούν μεγαλύτερη κάμψη και συνεπώς αύξηση της τάσης που προκαλείται από την τάση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

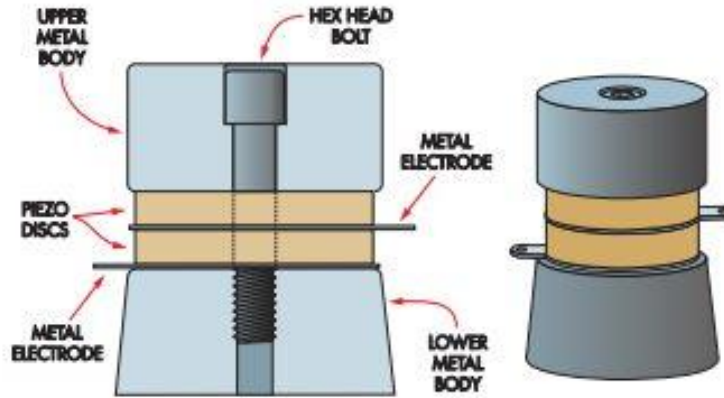
Για την κατασκευή της συσκευής καθαρισμού υπερήχων χρησιμοποιήθηκαν έτοιμα εξαρτήματα που είναι ευρέως διαθέσιμα προς αγορά από το διαδίκτυο ή εξειδικευμένα καταστήματα ηλεκτρονικών.

3.1 Μορφοτροπέας LANGEVIN με κοιλία στερέωσης



Εικόνα 18 Μορφοτροπέας Langevin με κοιλία στερέωσης

Ο μορφοτροπέας που χρησιμοποιήθηκε είναι ο Langevin με κωδικό OEM SMBLTF20W120 και οι πιεζοηλεκτρικοί δίσκοι του είναι από το υλικό SM118. Έχει σώμα φτιαγμένο από αλουμίνιο και διαστάσεις 68mm X 94mm και νόμιμη απόδοση συχνότητας στα 40KHz ± 0.5 KHz. Η μέγιστη ισχύς εξαγωγής είναι στα 100W και η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας φτάνει τους 120 °C.



Εικόνα 19 Εγκάρσια τομή μορφοτροπέα Langevin

Αποτελείται από δύο πιεζοηλεκτρικούς δίσκους φτιαγμένους από το κεραμικό υλικό SM118 τοποθετημένους στο κέντρο της διάταξης. Ο κεντρικός κοχλίας στήριξης εκτελεί διπλό ρόλο. Πρωτίστως διατηρεί την όλη διάταξη σταθερή (άνω μέρος, πιεζοηλεκτρικοί δίσκοι και κάτω μέρος) και αφετέρου είναι ρυθμισμένος να παράσχει τόση πίεση όση χρειάζεται ώστε να μη διαρραγεί το κεραμικό υλικό των πιεζοηλεκτρικών δίσκων, καθώς αυτοί δονούνται. Κατά το στάδιο της κατασκευής του αφού ρυθμιστεί η πίεση σύσφιξης με ειδικό δυναμόκλειδο, ο κοχλίας στερεώνεται μόνιμα με κόλλα.

Όταν προκληθεί ηλεκτρική τάση στην επιφάνεια των δίσκων, τότε λόγω του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου προκαλούνται δυνάμεις που συμπύχθουν τους δύο δίσκους και μετέπειτα τους απομακρύνουν περιοδικά παράγοντας δονήσεις στο εύρος των υπερήχων στα 40KHz.

Η συχνότητα δόνησης του μορφοτροπέα πρέπει να ελέγχεται διαρκώς εντός ορίων καθώς μικρές αποκλίσεις της συχνότητας δόνησης από τη συχνότητα συντονισμού παράγουν μεγάλη πτώση στην εκπεμπόμενη ισχύ (Διάγραμμα 5).

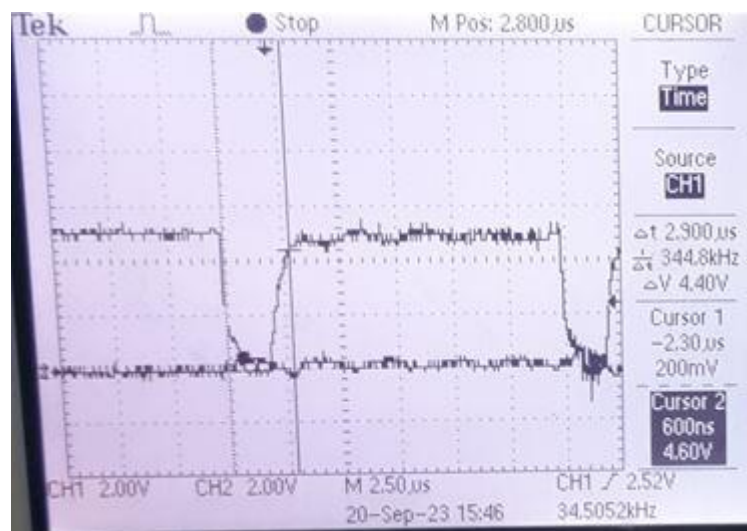


Διάγραμμα 5 Συχνότητα - Ισχύς πιεζοηλεκτρικών δίσκων

Στις λειτουργίες του μικροελεγκτή IC1 εντάσσεται και η παρακολούθηση της ροής ρεύματος μέσω των MOSFETs Q1 και Q2 στην αναλογική θύρα AN11 στη δωδέκατη ακίδα. Επίσης ελέγχει την ήπια φόρτιση του κυρίως πυκνωτή παράκαμψης κάνοντας χρήση του τρανζίστορ Q6 και του MOSFET Q6.

3.3 Τροφοδοτικό μορφοτροπέα

Μια συμπληρωματική γεννήτρια κυματομορφών εντός του μικροελεγκτή IC1 χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία των MOSFETs Q1 και Q2 όταν αυτά είναι στη λειτουργία έλξης-ώθησης. Ο μετατροπέας είναι κατασκευασμένος με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπει τη χρήση μια τέτοιας γεννήτριας. Η γεννήτρια ρυθμιζόμενου πλάτους παλμών (συντομογραφία PWM) (Pulse Width Modulator) είναι κατασκευασμένη έτσι ώστε να παράσχει ένα νεκρό χρόνο ώστε να αποφεύγεται η ταυτόχρονη λειτουργία των δύο MOSFET (Διάγραμμα 6).



Διάγραμμα 6 Απεικόνιση του νεκρού χρόνου ανάμεσα στα δύο MOSFET

Η ύπαρξη του νεκρού χρόνου αποτρέπει την ενεργοποίηση του ενός MOSFET ενώ το άλλο είναι ενεργό, μια λανθάνουσα διαδικασία που ονομάζεται ενδιάμεση εκπυρσοκρότηση και έχει ως αποτέλεσμα την υπερθέρμανση των MOSFETs και κατά συνέπεια την ταχύτερη φθορά τους. Στο διάγραμμα 6 απεικονίζεται με την άνω γραμμή η παροχή στο MOSFET Q1 και με τη κάτω γραμμή η παροχή στο MOSFET Q2. Παρατηρούμε τη ταυτόχρονη παύση στη παροχή και των δύο MOSFETs στα 2μs. Αυτό συμβαίνει τη χρονική στιγμή που η παροχή του MOSFET Q1 παύει και το MOSFET Q2 εκκινεί όταν η γραφική παράσταση παύει να είναι παράλληλη με τον οριζόντιο άξονα.

Οι ψηφιακές θύρες RC5 και RC4 του μικροελεγκτή IC1 παράσχουν τα συμπληρωματικά σήματα εισόδου για τα MOSFETs Q1 και Q2. Επειδή τα εξαγόμενα σήματα των θυρών αυτών έχουν εύρος από 0V έως 5V, έγινε χρήση MOSFETs τύπου λογικής στάθμης. Η χρήση τέτοιων MOSFET κρίθηκε

επιβεβλημένη διότι τα τυπικά MOSFET απαιτούν σήμα εισόδου τουλάχιστον 10V για την ορθή λειτουργία τους ενώ τα αντίστοιχα λογικής στάθμης έχουν συνήθως 4.5V και μερικές φορές μικρότερη τάση εισόδου.

Τα MOSFETs που χρησιμοποιήθηκαν με κωδικό OEM : STP60NF06 έχουν αντίσταση 14mΩ για ένταση 30A και τάση εισόδου 5V. Έχουν κατασκευαστεί να αντέχουν 60 A και παρέχουν ενσωματωμένη ασφάλεια υπερφόρτωσης στα 60V όπου άνω της τάσης αυτής αποκόπτουν την τροφοδοσία.

Τα Q1 και Q2 λειτουργούν εναλλάξ τροφοδοτώντας τα δύο μέρη του μετατροπέα T1 του οποίου η κεντρική παροχή είναι συνδεδεμένη με τη θύρα τροφοδοσίας 12V. Υποθέτοντας 40kHz συχνότητα, όταν το MOSFET Q1 είναι ενεργοποιημένο, το ρεύμα διατρέχει την περιέλιξη του μισού μέρους του μετατροπέα T1 για 25μs και μετά απενεργοποιείται. Ακολουθεί ο νεκρός χρόνος των 2μs όπου και τα δύο MOSFET είναι ανενεργά και μετά το πέρας του ενεργοποιείται το MOSFET Q2. Το Q2 τροφοδοτείται με τη σειρά του με ρεύμα από το άλλο μισό της περιέλιξης του μετατροπέα T1 για τα επόμενα 25μs. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται εωσότου υπάρξει τερματισμός της διαδικασίας χειροκίνητα μέσω διακόπτη.

Η εναλλάξ ενεργοποίηση των δύο MOSFETs δημιουργεί ένα AC τετραγωνικό κύμα στη δευτερεύουσα περιέλιξη του μετατροπέα T1. Με ρυθμό εναλλαγής 8.14:1 (57 εναλλαγές της δευτερεύουσας περιέλιξης και 7 της πρωτεύουσας) και παροχή 12V AC στη πρωτεύουσα περιέλιξη, η δευτερεύουσα περιέλιξη αποδίδει 98V τάση στο μορφοτροπέα.

3.4 Στατικά κύματα

Η συνεχόμενη λειτουργία του μορφοτροπέα κοντά στη συχνότητα συντονισμού είναι εξαιρετικά παραγωγική διότι η εμπέδηση του μορφοτροπέα σε αυτές τις συνθήκες είναι καθαρά ωμική. Αυτό όμως δεν βοηθάει στην ελαχιστοποίηση της δημιουργίας στατικών κυμάτων εντός του καθαριστικού λουτρού. Τα στατικά κύματα μπορούν να γίνουν ιδιαίτερα έντονα όσο η συχνότητα παραμένει σταθερή. Η δημιουργία τους οφείλεται από την ανάκλαση των ηχητικών κυμάτων στα τοιχώματα της δεξαμενής καθαρισμού και του αντικειμένου προς καθαρισμό εντός της και μπορούν να προκαλέσουν ζημιά στα ποιο επίζηλα μέρη του [9] (Jin, 2021).



Εικόνα 21 Στατικά κύματα στην επιφάνεια της δεξαμενής καθαρισμού

Για την αποφυγή δημιουργίας στατικών κυμάτων μπορεί να εναλλάσσεται η συχνότητα με το χρόνο ώστε να μην συντονίζονται οι κυματομορφές όπου με τη σειρά τους θα προκαλούσαν δημιουργική σύζευξη στατικών κυμάτων σε διάφορα μέρη του λουτρού. Όπως διαφαίνεται και στο διάγραμμα 1 ακόμα και μικρές αποκλίσεις από τη συχνότητα συντονισμού οδηγούν σε μεγάλη πτώση της εκπεμπόμενης ισχύς των ηχητικών κυμάτων και κατά συνέπεια η διαρκής μεταβολή της συχνότητας σε ένα εύρος συχνοτήτων γύρω από το συντονισμό κρίνεται μη αποδοτική. Αντ' αυτού επιλέχθηκε ο μορφοτροπέας να λειτουργεί στη συχνότητα συντονισμού για 10 δευτερόλεπτα, κατόπιν να διατρέχει ένα εύρος συχνοτήτων διάφορων της συχνότητας συντονισμού για ένα μικρό χρονικό διάστημα και να επιστρέφει στην συχνότητα συντονισμού για τον επόμενο κύκλο των 10 δευτερολέπτων.

Στο ενδιάμεσο διάστημα μεταξύ δύο κύκλων των 10 δευτερολέπτων η συχνότητα μεταβάλλεται με μικρά βήματα των 37.5Hz πάνω σε ένα εύρος συχνοτήτων 2.4kHz εντός μίας χρονικής διάρκειας 400ms. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η ισχύς μεταβάλλεται εκ του μεγίστου μόνο 4% του συνολικού χρόνου λειτουργίας. Η εναλλαγή των συχνοτήτων αλλάζει τη φάση των υπερηχητικών δονήσεων εντός του λουτρού παράσχοντας έτσι ικανό χρόνο ώστε τα στατικά κύματα που δημιουργήθηκαν κατά τη περίοδο της σταθερής συχνότητας να εξαλειφθούν και αποτρέποντας με τον τρόπο αυτό τη συσσώρευση τους σε βαθμό που να ενέχει κίνδυνο φθοράς στο προς καθαρισμό αντικείμενο.

3.5 Προστασία υπερφόρτωσης

Η προστασία υπερφόρτωσης για τα δύο MOSFETs παράσχετε με δύο τρόπους, όπου και οι δύο βασίζονται στην ανίχνευση του ρεύματος κατά τη διαδρομή της πτώσης τάσης μεταξύ των πηγών Q1 και Q2 ωμικής αντίστασης 0.1Ω και της γείωσης [4] (Clarke, 2021).

Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιεί τα NPN (Negative-Positive-Negative) τρανζίστορες Q3 και Q4. Έχουν τις συνδέσεις τους πάνω στις ανιχνευτικές αντιστάσεις 0.1Ω. Η υπερφόρτωση εκκινεί όταν η

τάση πάνω στις αντιστάσεις υπερβεί τα 0.5V (πρακτικά αυτό σημαίνει πως πάνω από 5 A διαρρέουν μέσω είτε του Q1 είτε του Q2). Τότε το αντίστοιχο τρανζίστορ Q3 και Q4 ενεργοποιείται. Το ρεύμα που διαρρέει εντός του τρανζίστορ από την είσοδο έως την έξοδο του, μειώνει την τάση στη πύλη του αντίστοιχου MOSFET. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ενεργής αντίστασης του MOSFET και κατά συνέπεια τη μείωση της έντασης του ρεύματος που το διαρρέει. Η μέθοδος αυτή δρα γρήγορα και στοχευόμενα ανά κύκλο λειτουργίας.

Παράλληλα οι τάσεις στα άκρα των δύο ανιχνευτικών αντιστάσεων 0.1Ω εξισορροποούνται από ένα ζεύγος αντιστάσεων 10kΩ και φιλτράρονται από ένα πυκνωτή 100nF. Αυτή η εξισορροπημένη τάση άγεται στην ανεπίστροφη ακίδα εισαγωγής 5 του μικροελεγκτή IC2 όπου ενισχύει το σήμα 28 φορές. Λόγο της εξισορρόπησης επί της ουσίας μόνο η μισή τάση ανιχνεύεται αφού μόνο το Q1 ή το Q2 είναι ενεργά ανά δεδομένη χρονική στιγμή. Αυτό οδηγεί σε μια σωρευτική ενίσχυση του σήματος κατά 14 φορές. Η εξαγωγή της ακίδας 7 του μικροελεγκτή IC2b μετράτε από την αναλογική θύρα AN11 του μικροελεγκτή IC2 (αντιστοιχώντας στην ακίδα 12).

Στο διάγραμμα 3 με τη κάτω γραμμή παρουσιάζεται η τάση εξαγωγής του μετατροπέα όταν ο μορφοτροπέας λειτουργεί σε συχνότητα 39,26 kHz. Η άνω γραμμή δείχνει τη τάση στη θύρα AN11 του μικροελεγκτή IC1.

Η μετρούμενη τάση στη θύρα AN11 ψηφιοποιείται και εν συνεχεία επεξεργάζεται στον μικροελεγκτή IC1. Αν η τάση παραμείνει ή υπερβεί τη τιμή των 4.9V για διάστημα μεγαλύτερο των 160ms η τροφοδοσία του μορφοτροπέα διακόπτεται. Η τάση αυτή αποτελεί τη μέση τιμή των 350mV που μετρούνται σε κάθε μία εκ των αντιστάσεων 0.1Ω ή εναλλακτικά ένα μέσο ρεύμα έντασης 3.5 A (τιμή που προκύπτει από τη διαίρεση της τάσης των 4.9V με το παράγοντα ενίσχυσης του σήματος 14 και διαιρείται περαιτέρω με την τιμή της αντίστασης 0.1Ω ήτοι 4,9V:14:0.1Ω).

Στη περίπτωση υπερφόρτωσης τότε τα LED2, LED3 και LED4 στην κεντρική κονσόλα ελέγχου αρχίζουν να αναβοσβήνουν. Τότε ενδείκνυται να διακοπεί η τροφοδοσία ρεύματος και να επανεκκινήσει ολόκληρη η διάταξη. Αν το πρόβλημα επιμένει τότε θα πρέπει να βρεθεί η αιτία της υπερφόρτωσης.

3.6 Διαχείριση τροφοδοσίας

Το ρεύμα που μετράτε στη θύρα AN11 χρησιμοποιείται επίσης για τον έλεγχο της τροφοδοσίας του μορφοτροπέα. Η συνιστώμενη μέγιστη ισχύς του μορφοτροπέα είναι 50W για εναλλασσόμενο και για συνεχές ρεύμα 43W. Χρησιμοποιήθηκε μια συντηρητική παροχή 36W. Για μία παροχή τάσης 12V αυτό σημαίνει ένα συνεχές ρεύμα 3A. Κατά τη διάρκεια λειτουργίας η ένταση του ρεύματος

ελέγχεται διαμέσου της πύλης AN11 και η τάση επίσης δειγματοληπτείται μέσο ενός ωμικού διαχωριστή στην αναλογική θύρα AN8 (ακίδα 8). Αυτό επιτρέπει τον υπολογισμό της ισχύος που εισέρχεται στο μετατροπέα καθώς η συχνότητα μεταβάλλεται, για τη διατήρηση της ισχύος στα επιθυμητά επίπεδα.

Το πρόγραμμα οδηγίων του μικροελεγκτή IC1 εξάγεται από τον εσωτερικό ταλαντωτή του και κατά συνέπεια η εξαγόμενες συχνότητες της γεννήτριας PWM προέρχονται από την ίδια πηγή. Ο εσωτερικός ταλαντωτής μπορεί να ρυθμιστεί χρησιμοποιώντας το καταχωρητή OSCTUNE.

Ο καταχωρητής OSCTUNE (Oscillator Tuning Register) περιέχει μια δυαδική τιμή της οποίας η αλλαγή επιφέρει αύξηση ή μείωση της συχνότητας του εσωτερικού ταλαντωτή κατά ένα βήμα ή ποσοστό. Ο εσωτερικός ταλαντωτής σε ένα μικροελεγκτή παράγει ένα ωρολογιακό σήμα το οποίο συγχρονίζει τις διάφορες διεργασίες που πρέπει να εκτελεστούν. Στον εν λόγω μικροελεγκτή η μέγιστη διαφοροποίηση είναι 12% και μπορεί να επιτευχθεί σε 128 βήματα. Για συχνότητα 40kHz αυτό μεταφράζεται σε ένα εύρος συχνοτήτων 4,8kHz με βήμα 37,5Hz. Ο βηματισμός αυτός είναι ικανά μικρός ώστε να επιτρέπει την ρύθμιση της ισχύος τροφοδοσίας του μορφοτροπέα για την επίτευξη ισορροπίας στην εκάστοτε συχνότητα συντονισμού. Το εύρος των 4,8kHz όμως επιβάλλει τα όρια των συχνοτήτων μέσα στα οποία μπορούμε να επιτύχουμε την κατάλληλη ισχύ στο μορφοτροπέα για να υπάρξει συντονισμός. Τα όρια αυτά κυμαίνονται από 37,6 kHz έως 42,4 kHz.

Για τη διεύρυνση του εύρους των συχνοτήτων για τις οποίες μπορεί να επιτευχθεί η αντίστοιχη ισχύς στο μορφοτροπέα, ο μικροελεγκτής αυτοσυγχρονίζεται (μπορεί όμως και να ρυθμιστεί χειροκίνητα). Με αυτό τον τρόπο αυτόματου συγχρονισμού γίνεται η εύρεση της επιθυμητής ισχύος για συντονισμό και κατόπιν με μικρότερες μεταβολές μέσο του OSCTUNE διορθώνονται τυχόν αποκλίσεις. Διευρύνοντας το εύρος συχνοτήτων στα οποία μπορεί να επέλθει συντονισμός δίνεται η δυνατότητα χρήσης μεγαλύτερης ποικιλίας μορφοτροπέων που δίνετε να χρησιμοποιηθούν. Ο ευρείς συγχρονισμός προς την επιθυμητή ισχύ γίνεται χρησιμοποιώντας το καταχωρητή PR2 το οποίο είναι υπεύθυνο για το προσδιορισμό της περιόδου του εσωτερικού ταλαντωτή και κατά συνέπεια της συχνότητας της γεννήτριας ρύθμισης πλάτους παλμών (PWM). Για το δικό μας κύκλωμα αυτό πρακτικά σημαίνει βήματα της τάξεως των 540Hz. Θέτουμε στη προκειμένη περίπτωση το εύρος του ευρύ συγχρονισμού να είναι από τα 34,88kHz έως τα 45,45kHz, ικανό να καλύψει κάθε μορφοτροπέα με συχνότητα συντονισμού στη γειτονιά των 40kHz.

Όταν βρεθεί ότι η συχνότητα συντονισμού βρίσκεται εντός του βήματος των 540Hz μεταβάλλοντας το καταχωρητή PR2 η τιμή αυτή αποθηκεύεται στη μνήμη flash. Τότε ο καταχωρητής OSCTUNE μεταβάλλει την αποθηκευμένη τιμή κατά ελάχιστο 1,8kHz προς τα πάνω και προς τα κάτω για την εύρεση της συχνότητας συντονισμού.

Μεταβάλλοντας την συχνότητα τροφοδοσίας, πολλαπλές στάθμες ισχύος είναι διαθέσιμες. Η μεγαλύτερη ισχύς προφανώς προκύπτει στη κοντινότερη τιμή της συχνότητας συντονισμού ενώ

μεγαλύτερες τιμές ισχύος τροφοδοσίας από τη τιμή συντονισμού θα παράγουν χαμηλότερη ισχύ στο μορφοτροπέα. Εννέα στάθμες είναι διαθέσιμες εκκινώντας από το 100% (36W) και φτάνοντας στο χαμηλότερο δυνατό 10% (περίπου 3,6W).

3.7 Λυχνίες LED

Οι λυχνίες LED 2 έως 6 καταδεικνύουν ποιο από τα εννέα επίπεδα ισχύος έχει επιλεγεί. Το πρώτο επίπεδο ισχύος (και χαμηλότερο) αντιστοιχεί στη λυχνία LED2 αναμμένη. Το επόμενο επίπεδο αντιστοιχεί στις λυχνίες LED2 και LED3 να είναι αναμμένες. Το τρίτο επίπεδο αντιστοιχεί στη λυχνία LED3 να είναι μόνο αναμμένη και ούτω καθεξής έως το ένατο και ισχυρότερο επίπεδο ισχύος. Για να τεθούν τα επίπεδα ισχύος πρέπει να πατηθεί ο διακόπτης εκκίνησης (Start switch) και να κρατηθεί σε αυτή τη θέση έως ότου επιλεγεί το επιθυμητό επίπεδο ισχύος. Κατά τη διάρκεια που είναι πατημένος τα εννέα επίπεδα ισχύος επιλέγονται κυκλικά. Όταν φτάσουμε στο επιθυμητό επίπεδο απελευθερώνουμε το διακόπτη. Ο μορφοτροπέας δεν λειτουργεί κατά τη διάρκεια επιλογής της επιθυμητής ισχύος. Η λυχνία LED1 (ή ON/Run) καταδεικνύει τότε το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα. Επίσης δρα και ως δείκτης λειτουργία καθώς παύει να λειτουργεί κατά το συγχρονισμό προς συντονισμό του μορφοτροπέα και επαναλειτουργεί όταν η αντίστοιχη τιμή στο καταχωρητή PR2 βρεθεί. Η ως άνω διαδικασία διαρκεί μερικά δευτερόλεπτα εκτός και αν υπάρχει κάποιο σφάλμα (όπως πχ να μην έχει συνδεθεί μορφοτροπέας στο κύκλωμα). Καθώς λοιπόν το LED1 είναι ενεργό δρα ως δείκτης ότι ο μορφοτροπέας λειτουργεί σε συντονισμό.

Όταν πιεστεί ο διακόπτης STOP τότε η παροχή ρεύματος προς το μορφοτροπέα παύει και τα LED 2 έως 6 σβήνουν ενώ το LED1 ανάβει. Το LED1 σβήνει είτε όταν η κυρίως παροχή ρεύματος σβήνει μέσω του διακόπτη S1 είτε χειροκίνητα αποσυνδεθεί η τροφοδοσία ρεύματος στη συσκευή.

3.8 Χρονοδιακόπτης καθαρισμού

Ο χρόνος λειτουργίας ελέγχεται μέσω του διακόπτη VR1. Η τάση από το ροοστάτη του εφαρμόζεται στην αναλογική θύρα AN9 του μικροελεγκτή IC1 (ακίδα 9) και μπορεί να λαμβάνει τιμές από 0V έως 5V. Αυτό αντιστοιχεί σε χρόνους λειτουργίας από 20 δευτερόλεπτα έως 90 λεπτά. Ο χρονοδιακόπτης εκκινεί όταν πατηθεί το κουμπί START και με το πέρας της επιλεγμένης διάρκειας λειτουργίας η τροφοδοσία του μορφοτροπέα παύει.

Οι διακόπτες S1 και S2 συνδέονται αντίστοιχα στις θύρες RA0 και RA1 του μικροελεγκτή IC1. Η τάση εισαγωγής τους διατηρείται υψηλή (5V) μέσω δύο αποσπώμενων αντιστάσεων 10kΩ. Ένας κλειστός διακόπτης (δηλαδή σε λειτουργία) ανιχνεύεται όταν πατηθεί και η τάση εισόδου γίνεται 0V. Σημειώνεται ότι χρησιμοποιήθηκαν πιεζόμενοι διακόπτες με τις τυποποιημένες συνθήκες αλλαγής κατάστασης των επαφών τους Normally on (συντομογραφία NO) και Normally closed (συντομογραφία NC).

Οι ακίδες στους διακόπτες είναι σε σειρά με την κοινή ακίδα στο ένα άκρο, την ακίδα ενεργοποίησης NO στο κέντρο και την ακίδα απενεργοποίησης NC στο άλλο άκρο. Αυτό σημαίνει ότι η οριοθέτηση του διακόπτη κατά τη τοποθέτηση θα πρέπει να είναι σωστή για την ορθή λειτουργία του.

3.9 Κεντρική παροχή

Η επιθυμητή τάση εισόδου είναι 12V σταθερού ρεύματος διαμέσου της θύρας CON1 (με κατά ελάχιστη ένταση 4 A). Στη περίπτωση χρήσης μπαταρίας ως πηγής αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να μπορεί να αποδώσει τουλάχιστον 10AH. Το ρεύμα διαρρέεται από το διακόπτη S1 και επιστρέφει στη μονάδα PCB μέσω ενός βιδωτού συνδέσμου και της θύρας CON2. Κατόπιν το ρεύμα διαρρέει το ροοστάτη (5V) REG1 μέσω της διόδου D2 η οποία διαθέτει προστασία ανάστροφης πολικότητας. Ο ροοστάτης REG1 παράσχει τη τάση 5V που απαιτείται για την ορθή λειτουργία των μικροελεγκτών IC1 και IC2.

Η κεντρική παροχή των 12V επίσης τροφοδοτεί και το MOSFET Q6 μέσω της ασφάλειας f1. Το MOSFET αυτό χρησιμοποιείται για την ήπια εκκίνηση ώστε να φορτιστεί αργά ο μεγάλης χωρητικότητας 4700μF και χαμηλής εμπέδησης πυκνωτής παράκαμψης. Δίχως την ήπια εκκίνηση, η φόρτιση των 4700μF θα δημιουργούσε έντονα δινορεύματα και ενδεχομένως να έκαιγε την ασφάλεια f1.

Όταν ανοίγει η κεντρική παροχή ρεύματος, το MOSFET Q6 δεν είναι ενεργό και κατά συνέπεια ο πυκνωτής δεν φορτίζεται. Με την πίεση του διακόπτη S1 η θύρα RC3 του μικροελεγκτή IC1 αποδίδει 5V και αυτό ενεργοποιεί το τρανζίστορ Q5. Τότε η τάση εισόδου του MOSFET Q6 αρχίζει να πλησιάζει τα 0V καθώς ο πυκνωτής χωρητικότητας 10μF αρχίζει να φορτίζεται διαμέσου της αντίστασης 100kΩ στην είσοδο του Q5.

Όταν το MOSFET ενεργοποιηθεί εκκινά η φόρτιση του πυκνωτή χωρητικότητας 4700μF. Μετά από μισό δευτερόλεπτο η φόρτιση σταματά κλείνοντας το τρανζίστορ Q5 και μετά από καθυστέρηση 250ms η τάση στα άκρα του πυκνωτή μετράτε μέσω της αναλογικής θύρας AN8 του μικροελεγκτή

IC1. Εάν η τάση στα άκρα του πυκνωτή βρεθεί να είναι κάτω από 9V (το οποίο σημαίνει ότι η τάση στην αναλογική θύρα AN8 είναι κάτω από 3V), όλα τα LED ένδειξης στάθμης αναβοσβήνουν δύο φορές το δευτερόλεπτο. Αυτό καταδεικνύει ότι είτε ο πυκνωτής έχει διαρροή είτε υπάρχει κάποιο βραχυκύκλωμα το οποίο προκαλεί αποφόρτιση του πυκνωτή. Εάν δεν υπάρχει σφάλμα τότε το τρανζίστορ Q5 ενεργοποιείτε και πάλι ώστε να συνεχιστεί η φόρτιση προς τη πύλη του MOSFET Q6. Παίρνει στη πύλη ένα ολόκληρο δευτερόλεπτο να αποδώσει 7,5V και στο χρόνο αυτό το MOSFET Q6 είναι πλήρως ενεργοποιημένο. Μετά από μερικά ακόμη δευτερόλεπτα η πύλη θα έχει πέσει στα 0V αφήνοντας ολόκληρη τη τάση των 12V μεταξύ της πηγής και της πύλης. Η διάδος τύπου Zener ZD1 προστατεύει τη πύλη από υπέρταση περιορίζοντας την τάση στα -13V.

Η προστασία αντίστροφης πολικότητας για το τμήμα του τροφοδοτικού γίνεται διαμέσου της 4A ασφάλειας F1, της διόδου D1 και των εσωτερικών ανεπίστροφων διόδων των Q1 και Q2. Οι διάδοι αυτές περιορίζουν την τάση στα -0,7V προστατεύοντας των ηλεκτρολυτικό πυκνωτή χωρητικότητας 4700μF από τη πλεονάζουσα ανάστροφη τάση.

3.10 Λουτρό εμφάπτισης

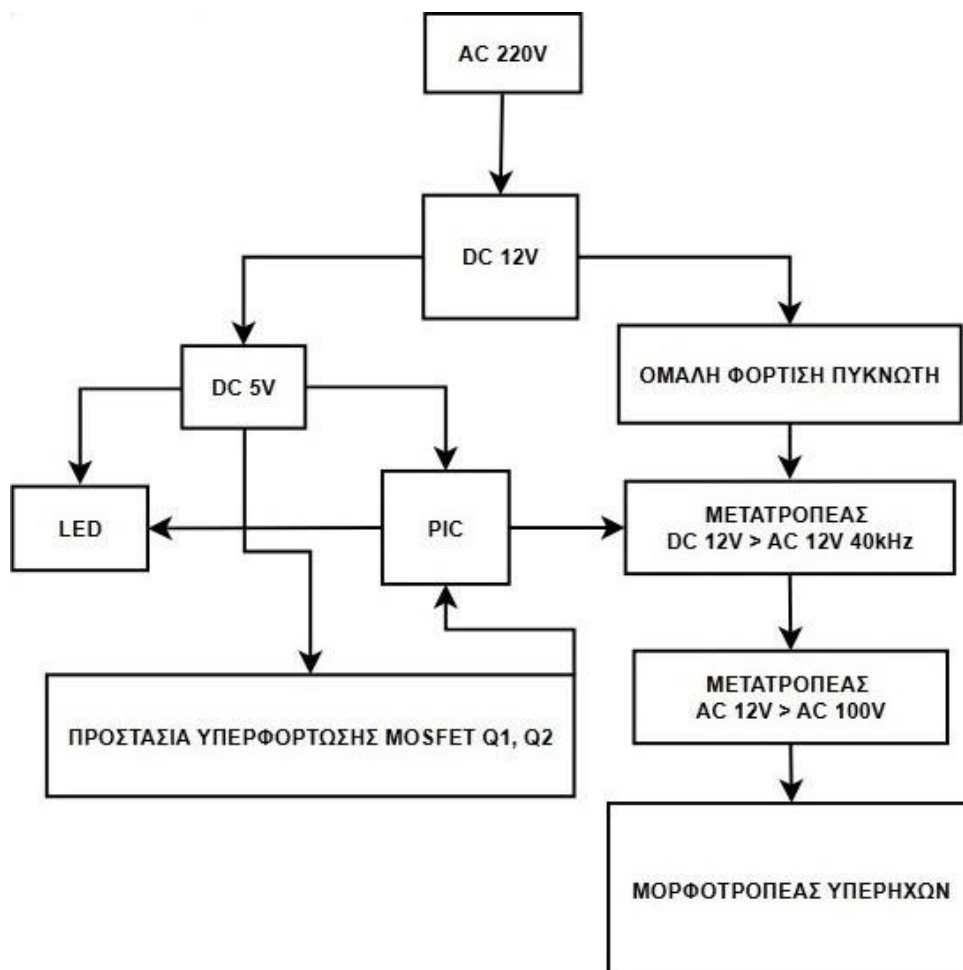
Ο υπερηχητικός μορφοτροπέας θα πρέπει να προσαρτηθεί στο εξωτερικό τοίχωμα ενός κατάλληλου δοχείου. Δεδομένου ότι η σκληρότητα του υλικού κατασκευής του δοχείου εμφάπτισης είναι ευθέως ανάλογη με το συντελεστή ανάκλασης των υπερηχητικών κυμάτων, ελαχιστοποιώντας με τον τρόπο αυτό τις απώλειες, η επιλογή ενός σκληρού υλικού όπως αλουμίνιο, ατσάλι ή και σκληρό πλαστικό είναι επιβεβλημένη. Επίσης προσοχή πρέπει να δοθεί ως προς τη συμβατότητα της εποξικής κόλλας που χρησιμοποιήθηκε για την προσάρτηση του μορφοτροπέα και του υλικού κατασκευής του δοχείου εμφάπτισης.

Ως διαλύτης χρησιμοποιήθηκε νερό βρύσης με λίγες σταγόνες συμυκνωμένου απορρυπαντικού πιάτων ως παράγοντα διαβροχής. Μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν και άλλοι διαλύτες όπως αλκοόλες (ισοπροπυλική αλκοόλη, μεθυλικές αλκοόλες ή ακετόνη). Η αύξηση της θερμοκρασίας βελτιώνει σημαντικά το αποτέλεσμα και η ιδανική ποσότητα διαλύτη συναρτήσσει με την ισχύ του μορφοτροπέα που χρησιμοποιήθηκε βρέθηκε να είναι τα τέσσερα λίτρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και τα αποτελέσματα που εξάχθηκαν κατόπιν χρήσης της συσκευής καθαρισμού υπερήχων καθώς επίσης η κοστολόγηση της και η σύγκριση με τις διαθέσιμες συσκευές παρόμοιων δυνατοτήτων στο εμπόριο.

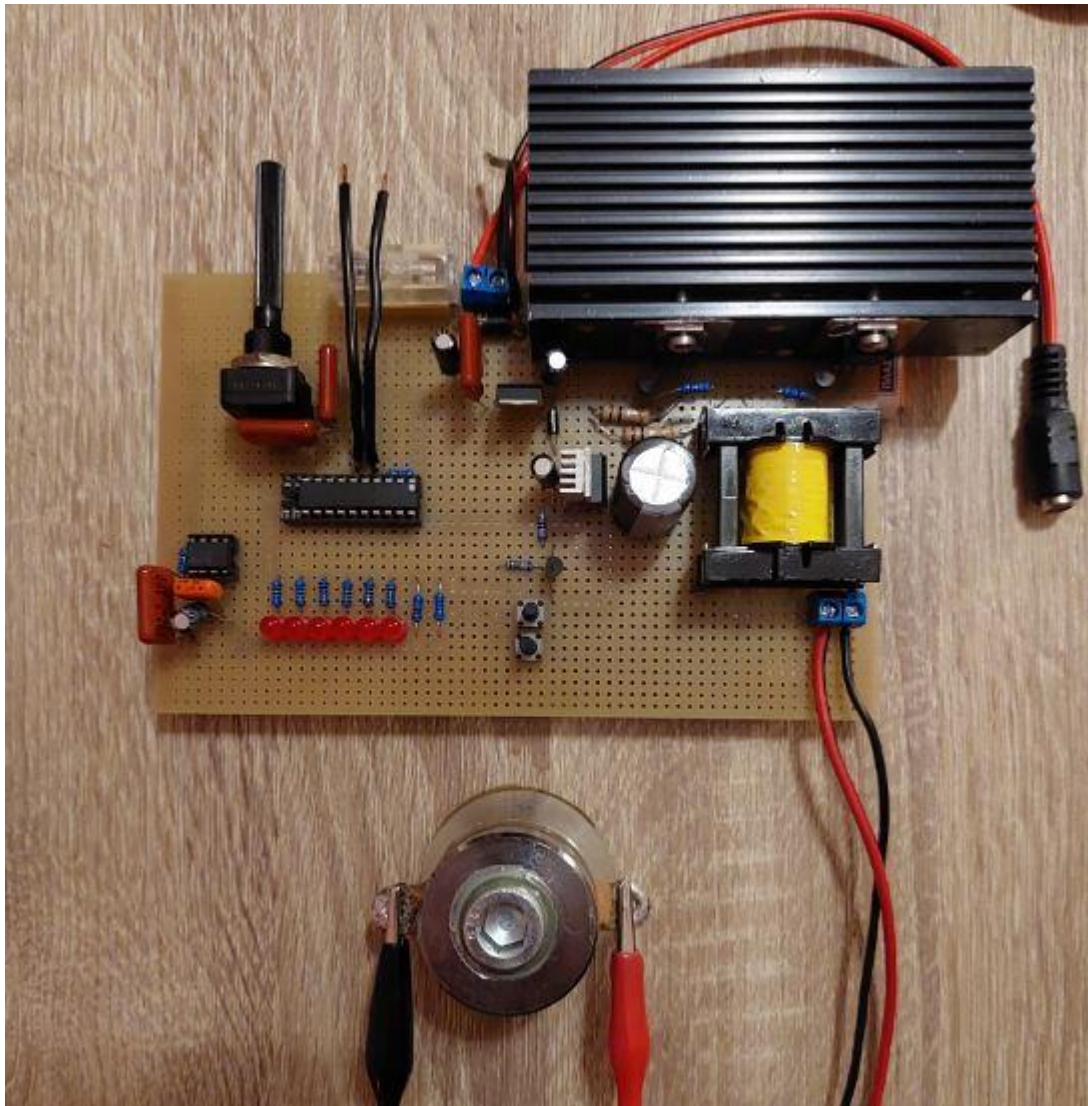
4.1 Μπλοκ διάγραμμα (block diagram)



Διάγραμμα 7 Σχηματικό διάγραμμα συσκευής καθαρισμού υπερήχων

Στο σχηματικό διάγραμμα 7 παρουσιάζονται τα υποσυστήματα της συσκευής καθαρισμού υπερήχων και πως αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Το διάγραμμα έγινε με χρήση του λογισμικού DIA σε μορφή εξαγωγής svg (και όχι τη στάνταρ μορφή .dia διότι δεν αναγνωρίζεται χωρίς τη χρήση του ως άνου λογισμικού από άλλα λογισμικά).

Η κεντρική παροχή 220V εναλλασσόμενου (AC) ρεύματος μετατρέπεται σε 12V συνεχές (DC). Κατόπιν υπάρχουν δύο διακλάδωσεις. Στην αριστερή διακλάδωση το ρεύμα μετατρέπεται σε 5V και τροφοδοτεί τα LED ,τον μικροελεγκτή (PIC) καθώς και τη προστασία υπερφόρτωσης των MOSFETs Q1 και Q2, Το κεντρικό κύκλωμα είναι συνδεδεμένο και ελέγχει τις λυχνίες LED. Στη δεξιά διακλάδωση η παροχή 12V συνεχές ρεύματος κατόπιν ελέγχου ομαλής φόρτισης τροφοδοτεί το μετατροπέα ο οποίος μετατρέπει το συνεχές ρεύμα 12V σε εναλλασσόμενο 12V συχνότητας 40kHz. Ο μετατροπέας με τη σειρά του τροφοδοτεί το μορφοτροπέα υπερήχων (Εικόνα 22).



Εικόνα 22 Υλοποίηση σχηματικού διαγράμματος σε πλακέτα

4.2 Λίστα υλικών και εξαρτημάτων

Για τη κατασκευή της συσκευής καθαρισμού υπερήχων χρησιμοποιήθηκαν υλικά και εξαρτήματα που η προμήθεια τους έγινε από καταστήματα της περιοχής και ηλεκτρονικού εμπορίου στην ελληνική επικράτεια. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν διαχωρίζονται σε τέσσερις γενικές κατηγορίες. Τα γενικά εξαρτήματα όπως καλώδια, βάση στήριξης, διακόπτες κτλ καθώς και οι ημιαγωγοί, οι πυκνωτές και οι αντιστάσεις. Παρακάτω παρατίθενται η λίστα των υλικών συνοδευόμενη από αριθμό τεμαχίων και τιμών (Πίνακας 1).

Πίνακας 1 Λίστα υλικών και εξαρτημάτων

Γενικά εξαρτήματα		
Είδος	Τεμάχια	Τιμή (€)
Πλακέτα διάτρητη 160x100mm	1	1,00
Πηνίο ETD29	1	7,70
Τροφοδοτικό 12v 5A	1	18,00
Καλώδιο 1000x1mm μονόκλωνο	1	0,50
Καλάι κόλλησης	1	15,00
Ασφαλειοθήκη + ασφάλεια 4A	1	1,50
Διακόπτες	2	3,00
Ποτενσιόμετρο	1	0,60
Μετατροπέας Υπερήχων	1	33,00

Ημιαγωγοί (Semiconductors)		
Είδος	Τεμάχια	Τιμή (€)
PIC16F1459-I/P	1	9,50
Leds	6	0,90
Ρυθμιστής Τάσης 7805 5v 1A	1	0,40

STP60NF06L logic level N-Channel MOSFETs	2	15,00
Τρανζίστορ BC547 NPN	3	0,60
SUP53P06-20 P-Channel	1	7,00
LMC6482AIN CMOS	1	6,50
Δίοδος Zener 13v 1w	1	0,20
Δίοδος 1N5404 3A	1	0,11
Δίοδος 1N4004 1A	1	0,16
Ποικνωτές (Capacitors)		
Είδος	Τεμάχια	Τιμή (€)
4700μF 16v low – ESR ηλεκτρολυτικός	1	1,84
100μF 16v ηλεκτρολυτικοί	2	0,40
10μF 16v ηλεκτρολυτικοί	1	0,20
470nF πολυεστερικός	1	0,40
100nF πολυεστερικοί	4	0,60
Αντιστάσεις (Resistors)		
Είδος	Τεμάχια	Τιμή (€)
1MΩ	1	0,10
100kΩ	2	0,60
27kΩ	1	0,60
20kΩ	1	0,30
10kΩ	8	1,60
1kΩ	7	0,14
47Ω	2	0,24
0,1Ω 1W	2	0,08
	Σύνολο:	154.07

Το συνολικό κόστος των υλικών κατασκευής ανήλθε στα 154.07 ευρώ. Σε αυτό το κόστος για την ορθή αποτίμηση της αξίας της συσκευής θα πρέπει να προστεθεί η αξία του συνόλου εργατωρών

που απαιτήθηκαν για τη κατασκευή της. Η εργατοώρα ενός εξειδικευμένου ηλεκτρονικού κοστολογείται στα 15 ευρώ/ώρα και δαπανήθηκαν συνολικά 9 ώρες. Συνεπώς στο τελικό κόστος συνυπολογίζοντας το κόστος των εργατικών το συνολικό κόστος ανέρχεται σε 289,00 ευρώ.

4.3 Σύγκριση συσκευών εμπορίου

Ύστερα από ενδελεχή έρευνα στην Ελληνική αγορά οι συσκευές παρόμοιων δυνατοτήτων που βρέθηκαν παρουσιάζονται στο Πίνακα 2.

Πίνακας 2 Συσκευές εμπορίου ίδιων δυνατοτήτων

Όνομα συσκευής	Χωρητικότητα (lt)	Τιμή (€)
Suprly swar με ψηφιακό χρονοδιακόπτη (Inox)	3	627,30
Visco Parts με ψηφιακό χρονοδιακόπτη	3	359,60
Nc pro equipment 0123632	3	350,00



Εικόνα 23 Συσκευή καθαρισμού υπερήχων suprly swar χωρητικότητας 3 λίτρων



Εικόνα 24 Συσκευή καθαρισμού υπερήχων Visco Parts χωρητικότητας 3 λίτρων



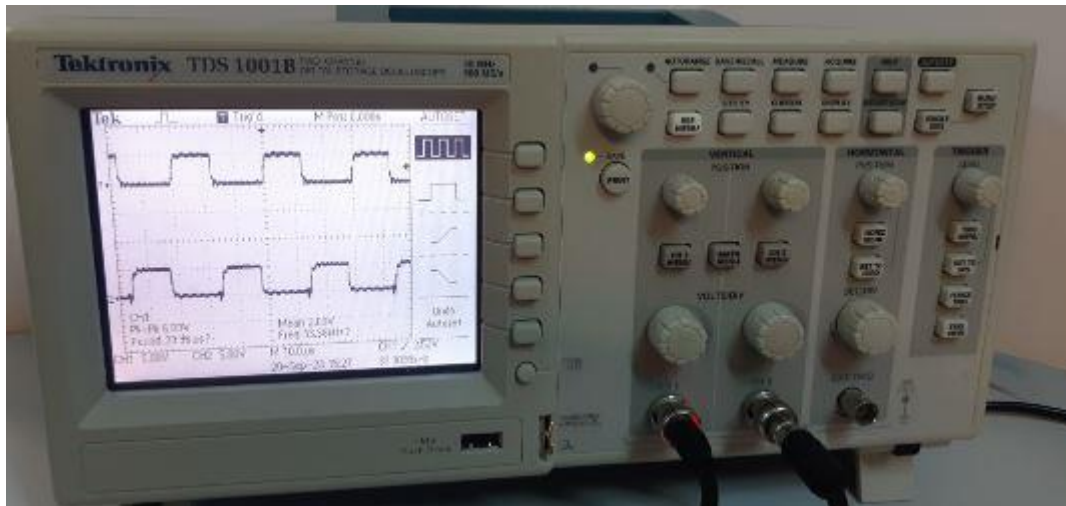
Εικόνα 25 Συσκευή καθαρισμού υπερήχων NC pro equipment χωρητικότητας 3 λίτρων

Δεδομένου ότι το κόστος κατασκευής στο παρόν πόνημα ανήλθε στα 289,00 ευρώ βλέπουμε ότι υπάρχει ένα μέσο κέρδος 156 ευρώ σε σύγκριση με τις τιμές εμπορίου. Φυσικά το κόστος των υλικών που απαιτήθηκαν καθώς και εργατοώρες που απαιτούνται για τη κατασκευή της συσκευής μπορούν να μειωθούν δραματικά χρησιμοποιώντας οικονομία κλίμακας στη γραμμή παραγωγής. Παρόλα αυτά

παρουσιάζεται σημαντικό περιθώριο κέρδους ακόμα και στη μεμονωμένη κατασκευή ενός μηχανήματος.

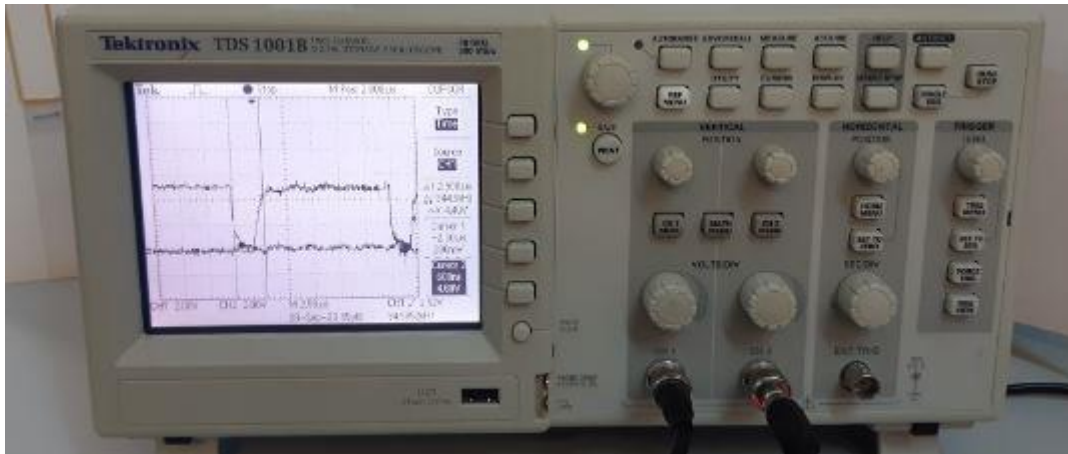
4.4 Επίδειξη λειτουργίας – Μετρήσεις

Όπως αναφέρατε αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 3.3, οι ψηφιακές θύρες RC5 και RC4 του μικροελεγκτή IC1 παράσχουν τα συμπληρωματικά σήματα εισόδου για τα MOSFETs Q1 και Q2.



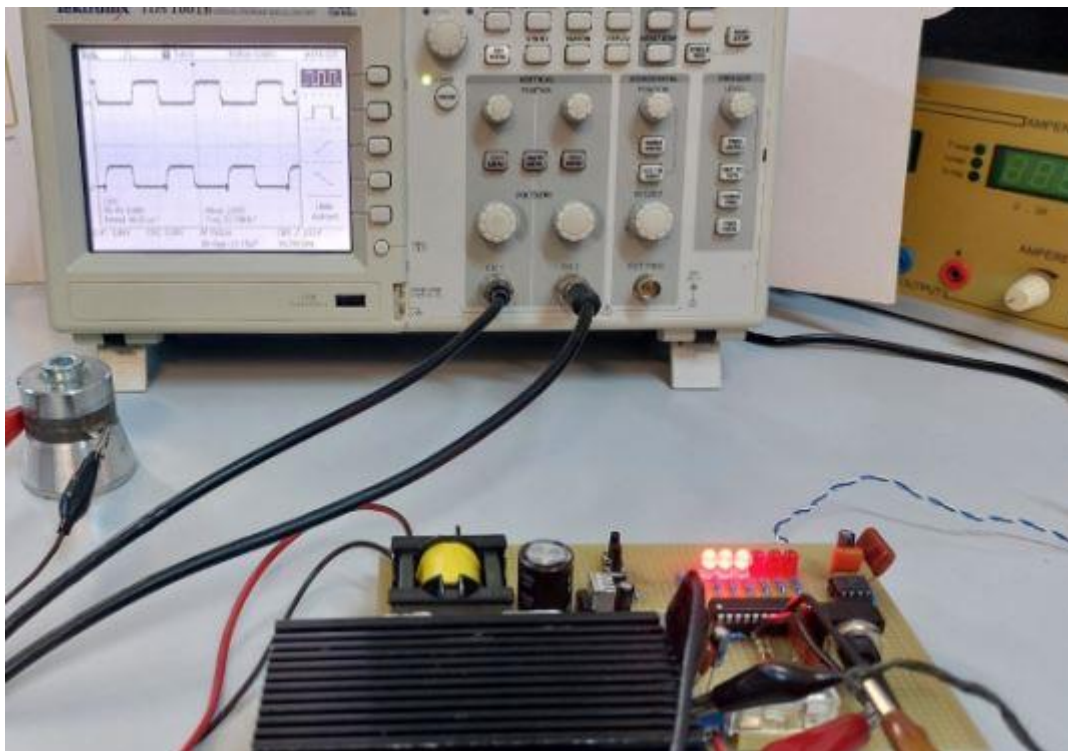
Εικόνα 26 Έξοδος θυρών RC4 και RC5

Στην εικόνα 26 παρουσιάζεται η λειτουργία των MOSFETs Q1 και Q2 οι οποίοι λειτουργούν εναλλάξ τροφοδοτώντας τα δύο μέρη του μετατροπέα T1 του οποίου η κεντρική παροχή είναι συνδεδεμένη με τη θύρα τροφοδοσίας 12V. Υποθέτοντας 40kHz συχνότητα, όταν το MOSFET Q1 είναι ενεργοποιημένο, το ρεύμα διατρέχει την περιέλιξη του μισού μέρους του μετατροπέα T1 για 25μs και μετά απενεργοποιείται. Ακολουθεί ο νεκρός χρόνος των 2μs όπου και τα δύο MOSFET είναι ανενεργά και μετά το πέρας του ενεργοποιείται το MOSFET Q2. Το Q2 τροφοδοτείται με τη σειρά του με ρεύμα από το άλλο μισό της περιέλιξης του μετατροπέα T1 για τα επόμενα 25μs (Εικόνα 27). Η διαδικασία επαναλαμβάνεται εωσότου υπάρξει τερματισμός της διαδικασίας χειροκίνητα μέσω διακόπτη.



Εικόνα 27 Απεικόνιση του νεκρού χρόνου ανάμεσα στα δύο MOSFETs Q1 και Q2

Κατόπιν της διαπίστωσης ορθής λειτουργίας της συσκευής έγινε χρήση της σε ένα εύρος αντικειμένων προς καθαρισμό διαφορετικής στιβαρότητας (παλαιά νομίσματα, κοσμήματα, ανταλλακτικά αυτοκινήτων) και διαφορετικών ρύπων (σκουριά, διάβρωση επιφάνειας, έλαια, σκόνη) με θετικά αποτελέσματα. Διαπιστώθηκε καθαρισμός των αντικειμένων σε χρόνους από πέντε έως δεκαπέντε λεπτά χωρίς τη πρόκληση βλαβών στη συσκευή ή στα προς καθαρισμό αντικείμενα. Χρησιμοποιήθηκε ως μέσο εμβάπτισμού απιονισμένο νερό και όχι κάποιος ισχυρότερος παράγοντας διαβροχής.



Εικόνα 28 Μετρήσεις ορθής λειτουργίας συσκευής καθαρισμού υπερήχων

Βιβλιογραφία

- [1] Amots, B. (2007). Sonochemistry on primordial Earth - Its potential role in prebiotic molecular evolution. *Ultrasonics sonochemistry*.
- [2] Apfel. (1981). Acoustic cavitation. *Methods in experimental Physics*.
- [3] Arndt, R. E. (1981, Δεκέμβριος). Recent Advances in Cavitation Research. *Advances in Hydrosience*.
- [4] Clarke, J. (2021, Σεπτέμβριος). High Power Ultrasonic Cleaner. *Practical Electronics*, σσ. 28-34.
- [5] Dharmarathne, L., & Grieser. (2016). Formation of amino acids on the sonolysis of aqueous solutions containing acetic acid, methane, or carbon dioxide, in the presence of nitrogen gas. *J. Phys. Chem*, σσ. 120, 191–199.
- [6] Eitel, R. (2010). Progress in engineering high strain lead-free piezoelectric ceramics. *Science and technology of advanced materials*.
- [7] Fuchs's, F. (2015). *Power Ultrasonics*.
- [8] Jacinta E, B. (2014, Νοέμβριος). A review of Doppler ultrasound quality assurance protocols and test devices. *European Journal of Medical Physics*, σσ. 742-751.
- [9] Jin, L. (2021, Μάιος). Effect of ultrasonic standing waves on flotation bubbles. *Ultrasonics Sonochemistry*.
- [10] Juarez, G. (2015). Introduction to power of ultrasonics. *Power ultrasonics*.
- [11] Jung, H. (2000). Creep characteristics of piezoelectric actuators. *The review of scientific instruments*.
- [12] Lewis, T. J. (2005). The piezoelectric effect. *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, (σσ. 717-720).
- [13] Pokhrel, N. (2016, Μάρτιος). Sonochemistry: Science and Engineering. *Ultrasonics Sonochemistry*, σσ. 104-128.
- [14] PUMPHREY, R. (1950). Upper Limit of Frequency for Human Hearing. *Nature*, σ. 166.
- [15] Wang, Z. L. (2012). Piezoelectric effect at nanoscale. *Encyclopedia of nanotechnology*.
- [16] Wells, P. (2011). Ultrasonic images in prespective. *Journal of medical engineering and technology*.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΚΩΔΙΚΑΣ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ

ERRORLEVEL -302

ERRORLEVEL -306

list P=16F1459

#include p16f1459.inc

__CONFIG __CONFIG1, __FOSC_INTOSC & __WDTE_OFF & __PWRTE_ON & __MCLRE_ON
& __CP_OFF & __BOREN_OFF & __CLKOUTEN_OFF & __IESO_OFF & __FCMEN_OFF

__CONFIG __CONFIG2, __WRT_OFF & __CPUDIV_NOCLKDIV & __USBLSCCLK_24MHz &
__PLLMULT_4x & __PLLEN_DISABLED & __STVREN_ON & __BORV_HI & __LPBOR_OFF &
__LVP_OFF

VALUE_1	equ	H'20'
VALUE_2	equ	H'21'
VALUE_3	equ	H'22'
STORE3	equ	H'23'
RUN	equ	H'24'
CURRENT	equ	H'25'
TIMEOUT1	equ	H'26'
TIMECNT1	equ	H'27'
TIMECNT2	equ	H'28'
DIRECTION	equ	H'29'
PR2_VAL	equ	H'2A'
FIRST	equ	H'2B'
CYCLE	equ	H'2C'
TIMES2	equ	H'2D'
OSC_TUNE	equ	H'2E'
OFF_FLAG	equ	H'2F'
OVERC	equ	H'30'
TUNESTO	equ	H'31'
DN_UP	equ	H'32'
TEMP1	equ	H'68'
REMB0	equ	H'69'
TEMP2	equ	H'6A'
AARGB1	equ	H'6B'
AARGB0	equ	H'6C'
BARGB1	equ	H'6D'
BARGB0	equ	H'6E'
LOOPCOUNT	equ	H'6F'
TEMPD1	equ	H'70'
TEMPS	equ	H'71'
PWR_UP_DN	equ	H'72'
ERR_FLAG	equ	H'73'
READADDMS	equ	H'74'
READADDLS	equ	H'75'
DATA_ADD	equ	H'76'
POWER	equ	H'77'
PWR_COMP	equ	H'78'

```

OSC1          equ   H'7A'
OSC2          equ   H'7B'
PR1           equ   H'7C'
PR2x          equ   H'7D'
POWER1        equ   H'7E'
POWER2        equ   H'7F'

```

```

org   H'700'
DA    H'000'
DA    H'041'
DA    H'077'

```

```

org           0
goto  MAIN
org           4

```

INTERRUPT

```

movlb D'0'
bcf   PIR1,TMR1IF

bcf   T1CON,TMR1ON
movlw H'E'
movwf TMR1H
movlw H'9C'
movwf TMR1L
nop
nop
bsf   T1CON,TMR1ON

```

```

incf  TIMES2,f
btfss TIMES2,0
retfie

```

```

movf  TIMECNT1,w
xorlw D'255'
btfsc STATUS,Z
retfie

```

```

incfsz    TIMECNT2,f
goto  FLAG
incf  TIMECNT1,w
btfsc STATUS,Z

```

```

retfie
incf  TIMECNT1,f
retfie

```

FLAG

```

movf  TIMECNT2,w
xorlw D'127'
btfsc STATUS,Z
bsf   OFF_FLAG,0
movf  TIMECNT2,w

```

```
xorlw D'1'  
btfsc STATUS,Z  
bsf OFF_FLAG,0  
retfie
```

MAIN

```
clrf RUN  
clrf TIMEOUT1  
clrf DIRECTION  
clrf PWR_UP_DN  
clrf ERR_FLAG  
clrf OSC_TUNE  
clrf POWER1  
clrf OSC1  
clrf PR1
```

```
movlb D'13'  
bcf CWG1CON0,G1EN
```

```
movlb D'2'
```

```
movlw B'00000000'  
movwf LATA  
movlw B'11010000'  
movwf LATB  
movlw B'00000101'  
movwf LATC
```

```
movlb D'29'  
bcf UCON,3  
bcf UCON,1
```

```
movlb D'4'  
clrf WPUA  
clrf WPUB
```

```
movlb D'1'  
movlw B'00001011'  
movwf TRISA  
movlw B'00100000'  
movwf TRISB  
movlw B'11000000'  
movwf TRISC
```

```
movlw B'00000000'  
movwf OPTION_REG
```

```
movlb D'3'  
movlw B'00000000'  
movwf ANSELA  
movlw B'00100000'  
movwf ANSELB  
movlw B'11000000'  
movwf ANSELC
```

```

movlb D'1'
movlw B'00100000'

movwf ADCON0
movlw B'01100000'
movwf ADCON1
bsf  ADCON0,ADON

movlw B'11111100'
movwf OSCCON

movlb D'0'
movlw D'69'
movwf PR2

movlw B'00000101'
movwf T2CON

movlw B'00110001'
movwf T1CON

movlb D'12'
movlw B'11100000'
movwf PWM1CON
clrf  PWM1DCL
clrf  PWM1DCH

movlb D'0'
call  DELAY

movlb D'1'
movlw B'11110000'
movwf TRISC
movlb D'13'

movlw D'31'
movwf CWG1DBR
movwf CWG1DBF

clrf  CWG1CON2
movlw B'10100010'
movwf CWG1CON1
bsf  CWG1CON2,G1ASE
bcf  CWG1CON2,G1ARSEN

movlw B'01100001'
movwf CWG1CON0
bsf  CWG1CON0,G1EN

movlb D'1'
movlw B'11000000'
movwf TRISC

HF1
btfss OSCSTAT,PLLRDY
goto  HF1

```

```

movlb D'29'
bcf   UCON,3
movlb D'0'

btfsc PORTA,0
goto  ALLOW_INTER
btfsc PORTA,1
goto  ALLOW_INTER

WT    call  DELAY
      btfss PORTA,0
      goto  WT
      btfss PORTA,1
      goto  WT

      movlb D'2'

      bcf      LATC,0           ; LED2 on
      bcf      LATC,2           ; LED3 on
      bcf      LATB,4           ; LED4 on
      bcf      LATB,6           ; LED5 on
      bcf      LATB,7           ; LED6 on
      movlb D'0'

      movlw D'74'
CHANGED
      movwf PR2
      call   C50
      goto  PWR_SUPP

C50

      incf  PR2,w
      movwf TEMPS
      lsrw  TEMPS,w
      movlb D'12'
      movwf PWM1DCH
      btfss STATUS,C
      goto  CLR7c
      clrf  PWM1DCL
      bsf  PWM1DCL,7
      goto  LSB_DONEc

CLR7c
      clrf      PWM1DCL

LSB_DONEc
      movlb D'0'
      bcf      PIR1,TMR2IF

WAIT_SETc
      btfss PIR1,TMR2IF
      goto  WAIT_SETc
      bcf      PIR1,TMR1IF
      return

```

PWR_SUPP

```
movlb D'2'  
bcf  LATC,1
```

```
bsf  LATC,3  
movlb D'0'
```

```
movlw D'250'  
call  DELX  
movlw D'250'  
call  DELX  
movlw D'250'  
call  DELX  
movlw D'250'  
call  DELX
```

RVR1

```
btfss PORTA,1  
goto  OFFx
```

```
movlb D'13'  
bcf  CWG1CON2,G1ASE  
movlb D'0'
```

```
movlb D'1'  
movlw B'00101100'  
movwf ADCON0  
bsf  ADCON0,ADON  
movlb D'0'  
call ACQUIRE_AD  
movf  TEMPD1,w  
movwf CURRENT
```

```
movlw D'250'  
subwf CURRENT,w  
btfss STATUS,C  
goto  UNDER_I
```

```
movlb D'13'  
bsf  CWG1CON2,G1ASE
```

```
movlb D'2'  
bcf  LATC,0  
bsf  LATC,2  
bcf  LATB,4  
bsf  LATB,6  
bcf  LATB,7  
movlb D'0'
```

```
movlw D'250'  
call  DELX  
movlw D'250'  
call  DELX
```

```

        goto READ_TEST

UNDER_I

        movlb D'2'
        bcf   LATC,0
        bcf   LATC,2
        bcf   LATB,4
        bcf   LATB,6
        bcf   LATB,7
        movlb D'0'

READ_TEST

        movlb D'1'
        movlw B'00100100'
        movwf ADCON0
        bsf   ADCON0,ADON
        movlb D'0'
        call ACQUIRE_AD
        comf  TEMPD1,w
        movwf OSC_TUNE
        call CONVERT

        movf  OSC_TUNE,w
        btfsc STATUS,Z
        goto LESS_PR2
        xorlw H'FF'
        btfss STATUS,Z
        goto RVR1

MORE_PR2
        btfsc PORTA,0
        goto RVR1

        incf  PR2,w
        sublw D'85'
        btfss STATUS,C
        goto BY1
        incf  PR2,f
        call C50
BY1     call DELAY

        btfss PORTA,0
        goto BY1
        goto RVR1

LESS_PR2

        btfsc PORTA,0
        goto RVR1

        decf  PR2,w
        sublw D'65'
        btfsc STATUS,C
        goto BY1
        decf  PR2,f
        call C50

```

```

        goto    BY1

OFFx
    movlb D'1'
    bsf    PIE1,TMR1IE
    movlb D'0'
    bcf    PIR1,TMR1IF
    bsf    INTCON,PEIE
    goto   OFF

ALLOW_INTER
    movlb D'1'
    bsf    PIE1,TMR1IE
    movlb D'0'
    bcf    PIR1,TMR1IF
    bsf    INTCON,PEIE

SWITCHES
    btfss RUN,0
    goto  SWITCHES_ALL
    btfss PORTA,1
    goto  OFF

    btfsc PORTA,0
    goto  LOOP1
    movlb D'13'
    bsf    CWG1CON2,G1ASE
    movlb D'0'
    goto  POWER_SET

SWITCHES_ALL
    btfss PORTA,0
    goto  ON
    btfsc PORTA,1
    goto  SWITCHES

OFF
    btfss PORTC,3
    goto  WAIT_STOP

OFF1
    bcf          INTCON,GIE
    clrf        RUN

    movlb D'2'
    bcf          LATC,3
    bsf          LATC,0
    bsf          LATC,2
    bsf          LATB,4
    bsf          LATB,6
    bsf          LATB,7

```

```

        bcf          LATC,1

        movlb D'13'
        bsf   CWG1CON2,G1ASE
        movlb D'0'

WAIT_STOP
        call          DELAY
        btfss PORTA,1
        goto  WAIT_STOP1
        call  DELAY
        btfss PORTA,1
        goto  WAIT_STOP
        goto  SWITCHES
WAIT_STOP1

        btfsc PORTA,0
        goto  WAIT_STOP

        movlb D'2'
        bcf          LATC,0
        bcf          LATC,2
        bcf          LATB,4
        bcf          LATB,6
        bcf          LATB,7
        movlb D'0'

WAIT_OP
        call  DELAY
        btfss PORTA,1
        goto  WAIT_OP
        call  DELAY
        btfss PORTA,0
        goto  WAIT_OP

        movlb D'2'
        bsf   LATC,0
        bsf   LATC,2
        bsf   LATB,4
        bsf   LATB,6
        bsf   LATB,7
        movlb D'0'

        clrf  FIRST
        movlw H'7F'
        movwf OSC_TUNE
        movlb D'1'
        clrf  OSC_TUNE
        movlb D'0'
        goto ON1

ON

        movlw H'07'
        movwf READADDMS

```

```

movlw H'01'
movwf READADDLS
call READ
xorlw D'65'
btfss STATUS,Z
goto SET_FIRST

```

```

clrf FIRST
movlw H'7F'
movwf OSC_TUNE
movlb D'1'
clrf OSCTUNE
movlb D'0'
goto ON1

```

SET_FIRST

```

bsf FIRST,0
movlw H'00'
movwf OSC_TUNE
movlb D'1'
movlw H'3F'
movwf OSCTUNE
movlb D'0'

```

ON1

```

clrf OVERC

bsf RUN,0

movlb D'2'
bcf LATC,1
bsf LATC,3
movlb D'0'
movlw D'250'
call DELX
movlw D'250'
call DELX

movlb D'2'
bcf LATC,3
movlb D'0'

movlw D'250'
call DELX

movlb D'1'
movlw B'00100000'
movwf ADCON0
bsf ADCON0,ADON
movlb D'0'
call ACQUIRE_AD

clrf ERR_FLAG

movlw D'152'
subwf TEMPD1,w
btfss STATUS,C

```

```

        goto ERRORX

POWER_SET
    movlb D'2'
    bsf LATC,3
    movlb D'0'

    movf FIRST,w
    btfsc STATUS,Z
    goto READ_VR1

    btfsc PORTA,0
    goto READ_VR1

    movlw H'07'
    movwf READADDMS
    movlw H'02'
    movwf READADDLS
    call READ
    movwf POWER
    call PWR_DSP

    btfsc PWR_UP_DN,0
    goto LOOP_DN

LOOP_UP
    clrf PWR_UP_DN

    movf POWER,w
    sublw D'213'
    btfss STATUS,C
    goto LOOP_DN
    movlw D'24'
    addwf POWER,w
    movwf TEMPS
    sublw D'214'
    movf TEMPS,w
    btfss STATUS,C
    movlw D'214'
    movwf POWER
    call PWR_DSP

    movlw D'255'
    call DELX
    movlw D'255'
    call DELX
    btfsc PORTA,0
    goto STORE_PWR
    goto LOOP_UP

LOOP_DN
    bsf PWR_UP_DN,0

    movf POWER,w
    btfsc STATUS,Z

```

```

goto LOOP_UP
movlw D'24'
subwf POWER,w
btfss STATUS,C
movlw D'0'
movwf POWER
call          PWR_DSP

movlw D'255'
call DELX
movlw D'255'
call DELX
btfss PORTA,0
goto LOOP_DN

STORE_PWR
call PWR_DSP
goto LOAD

btfss PWR_UP_DN,0
goto SET_UP_DN
clrf PWR_UP_DN
goto LOAD

SET_UP_DN
bsf          PWR_UP_DN,0

LOAD
movlb D'0'
movf  OSC_TUNE,w
movlb D'0'
movwf OSC2
movf  PR2_VAL,w
movwf PR2x
movf  POWER,w
movwf POWER2
call WRITE1

READ_VR1

movlb D'1'
movlw B'00100100'
movwf ADCON0
bsf  ADCON0,ADON
movlb D'0'
call ACQUIRE_AD

movf  TEMPD1,w
movwf TIMEOUT1

movf  TIMEOUT1,w
btfsc STATUS,Z
incf          TIMEOUT1,f

clrf          TIMECNT1
clrf          TIMECNT2

bsf          INTCON,GIE

```

```

movlw H'07'
movwf READADDMS
movlw H'02'
movwf READADDLS
call READ
movwf POWER

clrf DIRECTION
movlw H'07'
movwf READADDMS
movlw H'01'
movwf READADDLS
call READ
movwf PR2
movwf PR2_VAL

incf PR2,w
movwf TEMPS
lshf TEMPS,w
movlb D'12'
movwf PWM1DCH
btfss STATUS,C
goto CLR7
clrf PWM1DCL
bsf PWM1DCL,7
goto LSB_DONE
CLR7
clrf PWM1DCL
LSB_DONE
movlb D'0'
bcf PIR1,TMR2IF

WAIT_SET
btfss PIR1,TMR2IF
goto WAIT_SET
bcf PIR1,TMR1IF

movlb D'13'
bcf CWG1CON2,G1ASE
movlb D'0'

call PWR_DSP

movlb D'2'
bsf LATC,1
movlb D'0'

clrf CYCLE

call POWER_CALC

LOOP1

```

```

movlb D'1'
movlw B'00100100'
movwf ADCON0
bsf  ADCON0,ADON
movlb D'0'
call  ACQUIRE_AD

```

```

movf  TEMPD1,w
movwf TIMEOUT1
movf  TIMEOUT1,w
btfsc STATUS,Z
incf  TIMEOUT1,f

```

```

movf  TIMEOUT1,w
subwf TIMECNT1,w
btfsc STATUS,C
goto  OFF

```

```

movlw D'10'
call  DELX

```

```

movlb D'1'
movlw B'00101100'
movwf ADCON0
bsf  ADCON0,ADON
movlb D'0'
call  ACQUIRE_AD
movf  TEMPD1,w
movwf CURRENT

```

OVER_CK

```

movlw D'250'
subwf CURRENT,w
btfss STATUS,C
goto  ADJUST_POWER

```

```

bsf          STATUS,C
rlf          OVERC,f

```

```

incfsz      OVERC,w
goto  ADJUST_POWER

```

```

movlb D'13'
bsf  CWG1CON2,G1ASE
movlb D'0'
bsf  ERR_FLAG,1
goto  ERRORX

```

ADJUST_POWER

```

btfsc PORTC,1
goto  COMPARE

```

```

btfss OFF_FLAG,0
goto  COMPARE

```

```

clrf          OFF_FLAG

```

```

    movlb D'2'
    bsf     LATC,1
    movlb D'0'

    movf   OSC_TUNE,w
    movwf  TUNESTO
    btfsc  STATUS,Z
    goto   P_CALC
    bcf    DN_UP,0

CYC_DN_UP
    btfsc  DN_UP,0
    goto   UPx
    decfsz OSC_TUNE,f
    goto   DNx
    bsf    DN_UP,0
    goto   DNx

UPx
    incf   OSC_TUNE,w
    xorwf  TUNESTO,w
    btfsc  STATUS,Z
    goto   COMPARE
    incf   OSC_TUNE,f

DNx
    call   CONVERT

    movlw  D'1'
    call   DELX
    goto   CYC_DN_UP

P_CALC
    call   POWER_CALC
    goto   COMPARE

CONVERT
    movf   OSC_TUNE,w
    movwf  TEMPS
    lsr    TEMPS,f
    btfss  TEMPS,6
    goto   REVx
    comf   TEMPS,f
    bcf    TEMPS,7
    bsf    TEMPS,6
    goto   STRAIGHTx

REVx
    comf   TEMPS,f
    bcf    TEMPS,7
    bcf    TEMPS,6

STRAIGHTx
    movf   TEMPS,w
    movlb  D'1'
    movwf  OSC_TUNE
    movlb  D'0'
    return

```

```

COMPARE
    btfss FIRST,0
    goto RUN_START

    movlw D'4'
    subwf CURRENT,w
    btfss STATUS,C
    goto CK0

    movlw D'1'
    subwf CURRENT,w
    btfsc STATUS,Z
    goto PREP_SWITCH
    movlw D'1'
    addwf CURRENT,w
    btfsc STATUS,Z
    goto PREP_SWITCH

CK0
    movf CURRENT,w
    subwf PWR_COMP,w
    btfsc STATUS,Z
    goto PREP_SWITCH
    btfss STATUS,C
    goto SET_TRANS1
    incfsz OSC_TUNE,f
    goto TRANSF
    goto DEC

SET_TRANS1
    decfsz OSC_TUNE,f
    goto TRANSF
    goto INC

TRANSF
    movf OSC_TUNE,w
    movwf TEMPS
    lsrwf TEMPS,f
    btfss TEMPS,6
    goto REV
    comf TEMPS,f
    bcf TEMPS,7
    bsf TEMPS,6
    goto STRAIGHT

REV
    comf TEMPS,f
    bcf TEMPS,7
    bcf TEMPS,6

STRAIGHT
    movf TEMPS,w
    movlb D'1'
    movwf OSC_TUNE
    movlb D'0'

    goto SWITCHES

PREP_SWITCH
    btfss PORTC,1
    goto SWITCHES

```

```

movlb D'2'
bcf  LATC,1
movlb D'0'
goto SWITCHES

```

CYCLING

```

movlb D'2'
bsf  LATC,1
movlb D'0'

movlw D'2'
subwf CYCLE,w
btfss STATUS,C
goto SWITCHES

btfss DIRECTION,0
goto INC_POWER

clrf  CYCLE
movf  POWER,w
btfsc STATUS,Z
goto SWITCHES
movlw D'24'
subwf POWER,w
btfss STATUS,C
movlw D'0'
goto LD_PWR

```

INC_POWER

```

clrf  CYCLE
movf  POWER,w
sublw D'216'
btfss STATUS,C
goto SWITCHES
movlw D'24'
addwf POWER,w
movwf TEMPS
sublw D'216'
movf  TEMPS,w
btfss STATUS,C
movlw D'216'

```

LD_PWR

```

movwf POWER
call  PWR_DSP
call  POWER_CALC

movlb D'0'
movf  OSC_TUNE,w
movlb D'0'
movwf OSC2
movf  PR2,w
movwf PR2x
movf  POWER,w
movwf POWER2
call  WRITE1

```

```

        bsf    INTCON,GIE
        goto  SWITCHES

DEC
        incf  CYCLE,f
        bsf   DIRECTION,0
        goto  CYCLING

INC
        incf  CYCLE,f
        bcf   DIRECTION,0
        goto  CYCLING

RUN_START
        movf  CURRENT,w
        sublw D'50'
        btfss STATUS,C
        goto  SET_TRANSF11
        incf  PR2_VAL,f
        movf  PR2_VAL,w
        sublw D'85'
        btfsc STATUS,C
        goto  TRANSF1

        movlb D'2'
        bcf   LATC,1
        movlb D'0'
        goto  OFF

SET_TRANSF11
        decf  PR2_VAL,f
        bsf   FIRST,0

        movlb D'2'
        bsf   LATC,1
        movlb D'0'

        movlw H'00'
        movwf OSC_TUNE
        movlb D'1'
        movlw H'3F'
        movwf OSC_TUNE
        movlb D'0'

        movlb D'0'
        movf  OSC_TUNE,w
        movlb D'0'
        movwf OSC2
        movf  PR2_VAL,w
        movwf PR2x
        movf  POWER,w
        movwf POWER2
        call  WRITE1

        bsf   INTCON,GIE

```

```
TRANSF1
```

```

        bcf    PIR1,TMR2IF
WAIT_SET11
        btfss PIR1,TMR2IF
        goto  WAIT_SET11
        bcf    PIR1,TMR2IF
        movf  PR2_VAL,w
        movwf PR2

```

```

        incf  PR2,w
        movwf TEMPS
        lsr   TEMPS,w
        movlb D'12'
        movwf PWM1DCH
        btfss STATUS,C
        goto  CLR_7
        clrf  PWM1DCL
        bsf   PWM1DCL,7
        goto  LSB_DONE1
CLR_7
        clrf  PWM1DCL
LSB_DONE1
        movlb D'0'
        goto  SWITCHES

```

```

PWR_DSP
        movlb D'2'
        movlw D'200'
        subwf POWER,w
        btfsc STATUS,C
        goto  LED6

        movlw D'176'
        subwf POWER,w
        btfsc STATUS,C
        goto  LED5_6

        movlw D'152'
        subwf POWER,w
        btfsc STATUS,C
        goto  LED5

        movlw D'128'
        subwf POWER,w
        btfsc STATUS,C
        goto  LED4_5

        movlw D'104'
        subwf POWER,w
        btfsc STATUS,C
        goto  LED4

        movlw D'80'
        subwf POWER,w
        btfsc STATUS,C
        goto  LED3_4

```

```

    movlw D'56'
    subwf POWER,w
    btfsc STATUS,C
    goto LED3

    movlw D'32'
    subwf POWER,w
    btfsc STATUS,C
    goto LED2_3

LED2
    bcf LATC,0
    bsf LATC,2
    bsf LATB,4
    bsf LATB,6
    bsf LATB,7
    goto ADJ_PWR

LED2_3
    bcf LATC,0
    bcf LATC,2
    bsf LATB,4
    bsf LATB,6
    bsf LATB,7
    goto ADJ_PWR

LED3
    bsf LATC,0
    bcf LATC,2
    bsf LATB,4
    bsf LATB,6
    bsf LATB,7
    goto ADJ_PWR

LED3_4
    bsf LATC,0
    bcf LATC,2
    bcf LATB,4
    bsf LATB,6
    bsf LATB,7
    goto ADJ_PWR

LED4
    bsf LATC,0
    bsf LATC,2
    bcf LATB,4
    bsf LATB,6
    bsf LATB,7
    goto ADJ_PWR

LED4_5
    bsf LATC,0
    bsf LATC,2
    bcf LATB,4
    bcf LATB,6
    bsf LATB,7
    goto ADJ_PWR

```

```

LED5
    bsf      LATC,0
    bsf      LATC,2
    bsf      LATB,4
    bcf      LATB,6
    bsf      LATB,7
    goto    ADJ_PWR

```

```

LED5_6
    bsf      LATC,0
    bsf      LATC,2
    bsf      LATB,4
    bcf      LATB,6
    bcf      LATB,7
    goto    ADJ_PWR

```

```

LED6
    bsf      LATC,0
    bsf      LATC,2
    bsf      LATB,4
    bsf      LATB,6
    bcf      LATB,7

```

```

ADJ_PWR
    movlb D'0'
    return

```

```

ERRORX
    movlb D'2'
    bsf      LATC,1
    bcf      LATC,3

```

```

FLASH_ERROR
    movf    ERR_FLAG,w
    btfss  STATUS,Z
    goto   ERR2
    bcf    LATC,0
    bcf    LATC,2
    bcf    LATB,4
    bcf    LATB,6
    bcf    LATB,7
    goto   WAITX

```

```

ERR2
    bcf    LATC,0
    bcf    LATB,4
    bcf    LATB,7

```

```

WAITX
    movlb D'0'

    btfss PORTA,1
    goto  OFF1
    movlw D'250'
    call DELX
    btfss PORTA,1

```

```

goto OFF1
movlw D'250'
call DELX

movlb D'2'

bsf      LATC,0
bsf      LATC,2
bsf      LATB,4
bsf      LATB,6
bsf      LATB,7

movlb D'0'

btfss PORTA,1
goto OFF1
movlw D'250'
call DELX
btfss PORTA,1
goto OFF1
movlw D'250'
call DELX

movlb D'2'
goto FLASH_ERROR

DELAY      movlw D'100'
DELX      movwf VALUE_3
DELT_1    movlw D'16'
           movwf VALUE_1
           movlw D'250'
LP_1      movwf VALUE_2
LP_2      decfsz VALUE_2,f
           goto LP_2
           decfsz VALUE_1,f
           goto LP_1
           decfsz VALUE_3,f
           goto DELT_1
           return

ACQUIRE_AD

movlw D'50'
movwf STORE3
WAIT2C1   decfsz STORE3,f
           goto WAIT2C1
           movlb D'1'
           bsf ADCON0,1
WAIT_CONV btfsc ADCON0,1
           goto WAIT_CONV
           movf ADRESH,w
           movwf TEMPD1
           movlb D'0'

```

```
return
```

```
READ; 'w' has read data
movlb D'3'
movf  READADDMS,w
movwf          PMADRH
movf  READADDLS,w
movwf          PMADRL
bcf   PMCON1,CFGs
bsf   PMCON1,RD
nop
nop

movf  PMDATH,w
movf  PMDATL,w
movlb D'0'
return
```

```
WRITE1
```

```
bcf   INTCON,GIE
movlb D'03'
movlw D'07'
movwf PMADRH
movlw D'00'
movwf PMADRL

bcf   PMCON1,CFGs
bsf   PMCON1,FREE
bsf   PMCON1,WREN

movlw H'55'
movwf PMCON2
movlw H'AA'
movwf PMCON2
bsf   PMCON1,WR
nop
nop
bcf   PMCON1,WREN

movlw D'07'
movwf PMADRH
movlw D'00'
movwf PMADRL

bcf   PMCON1,CFGs
bsf   PMCON1,WREN
bsf   PMCON1,LWLO

movf  OSC1,w
movwf PMDATH
movf  OSC2,w
movwf PMDATL

movlw H'55'
movwf PMCON2
movlw H'AA'
movwf PMCON2
```

```
bsf    PMCON1,WR
nop
nop
incf   PMADRL,f
```

```
movf   PR1,w
movwf  PMDATH
movf   PR2x,w
movwf  PMDATL
```

```
movlw  H'55'
movwf  PMCON2
movlw  H'AA'
movwf  PMCON2
bsf    PMCON1,WR
nop
nop
incf   PMADRL,f
```

```
movf   POWER1,w
movwf  PMDATH
movf   POWER2,w
movwf  PMDATL
```

```
movlw  H'55'
movwf  PMCON2
movlw  H'AA'
movwf  PMCON2
bsf    PMCON1,WR
nop
nop
```

START_WRITE

```
bcf    PMCON1,LWLO
```

```
movlw  H'55'
movwf  PMCON2
movlw  H'AA'
movwf  PMCON2
bsf    PMCON1,WR
nop
nop
bcf    PMCON1,WREN
movlb  D'0'
return
```

POWER_CALC

```
movlb  D'1'
movlw  B'00100000'
movwf  ADCON0
bsf    ADCON0,ADON
movlb  D'0'
call   ACQUIRE_AD
```

```

    clrf BARGB1
    clrf AARGB1
    movlw D'204'
    movwf AARGB0
    movf POWER,w
    movwf BARGB0
    call FXM88U

    movf TEMPD1,w
    movwf BARGB0

    call DIV16_8

    movf AARGB1,w
    movwf PWR_COMP
    return

```

FXM88U

```

    MOVLW    H'08'
    MOVWF    LOOPCOUNT
    MOVF     AARGB0,W

```

LOOPUM0808A

```

    RRF     BARGB0, F
    BTFSC   STATUS,C
    GOTO    LUM0808NAP
    DECFSZ  LOOPCOUNT, F
    GOTO    LOOPUM0808A

    CLRF    AARGB0
    RETLW   H'00'

```

LUM0808NAP

```

    BCF     STATUS,C
    GOTO    LUM0808NA

```

LOOPUM0808

```

    RRF     BARGB0, F
    BTFSC   STATUS,C
    ADDWF   AARGB0, F

```

LUM0808NA

```

    RRF     AARGB0, F
    RRF     AARGB1, F
    DECFSZ  LOOPCOUNT, F
    GOTO    LOOPUM0808

    return

```

DIV16_8

```

    CLRF    REMB0
    MOVLW   H'08'
    MOVWF   LOOPCOUNT

```

LOOPU1608A

```

    RLF     AARGB0,W
    RLF     REMB0, F

```

```

                MOVF          BARG0,W
                SUBWF        REMB0, F

                BTFSC        STATUS,C
                GOTO         UOK68A
                ADDWF        REMB0, F
                BCF          STATUS,C

UOK68A          RLF          AARGB0, F

                DECFSZ       LOOPCOUNT, F
                GOTO         LOOPU1608A

                CLRF        TEMP1

                MOVLW        H'08'
                MOVWF        LOOPCOUNT

LOOPU1608B     RLF          AARGB1,W

                RLF          REMB0, F
                RLF          TEMP1, F
                MOVF        BARG0,W
                SUBWF        REMB0, F
                CLRF        TEMP2
                CLRW
                BTFSS        STATUS,C
                INCFSZ       TEMP2,W
                SUBWF        TEMP1, F

                BTFSC        STATUS,C
                GOTO         UOK68B
                MOVF        BARG0,W
                ADDWF        REMB0, F
                CLRF        TEMP2
                CLRW
                BTFSC        STATUS,C
                INCFSZ       TEMP2,W
                ADDWF        TEMP1, F

                BCF          STATUS,C

UOK68B          RLF          AARGB1, F

                DECFSZ       LOOPCOUNT, F
                GOTO         LOOPU1608B
return

```

end