

МОДЕЛИРАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА УЛТРАЗВУКОВА ВАНА

ULTRASONIC BATH MODELING AND INVESTIGATION

Доброслав Данков

Технически университет-Габрово
Катедра Електроника

Abstract

A novel cost-effective and high-efficiency simulation piezoelectric ceramic transducer (PCT) model for an ultrasonic cleaner is proposed. The inverter circuit topology is a Class DE resonant inverter for driving a sandwich PCT at its resonance frequency. With tactfully designed circuit parameters, the Class DE resonant inverter is operated at the sub-optimum mode to minimize switching losses of the active switch, leading to a high circuit efficiency. The active switch is controlled by pulse-width modulation at a fixed switching frequency and constant duty ratio to adjust the output power of the PCT. The operation modes, P-SPICE model of transducer and steps for the parameters extraction are proposed. A prototype circuit designed for a 42-W ultrasonic cleaner was built and tested to verify the model. Satisfactory performances are obtained from the experimental results.

Keywords: ultrasonic transducer, half-bridge inverter, Power MOSFET, P-Spice

ВЪВЕДЕНИЕ

Ултразвуковата енергия се използва най-широко за ултразвуково почистване. Почистват се външни и вътрешни повърхности на части, които са замърсени от различни мазнини, пасти за полиране, соли за закаляване, стружки и др.

При повечето детайли от металообработващата, електронната и оптичната промишленост и от уредостроенето без ултразвуково почистване не могат да се гарантират изискваните качества на повърхността. Детайлите се обработват във вибриращи вани с обем от 0,5 до 100 литра и повече. Ултразвуковите преобразователи /трансдюсери/ се закрепват към ваните или се потопяват в тях. Те се захранват с ултразвукови генератори с мощност от няколко стотин W до няколко kW и работят с честота обикновено от 20 до 44 kHz. Необходимите плътности на мощността при малките вани са около 20 W/l, а при големите от 5 до 10 W/l. Обикновено времената за почистване са от 0,5 минути до 1 час. Те зависят силно от вида и степента на замърсяването.

Съвременните ултразвукови преобразователи са електро-стрикционните, наречени

още пиезопреобразуватели или трансдюсери.

Те са основани на базата на обратния пиезоелектричен ефект на някой материали - поява на механическо напрежение в пиезоелектрическия кристал при поляризация на последния, при това големината на механическото напрежение е пропорционална на поляризиращото поле. Състоят се от пиезоелектрична пластина изрязана по определен начин. В ултразвуковите преобразователи за тази цел се използват синтетични керамични материали - например бариев титанат и оловен цирконат титанат. На двете повърхности на пластинката има нанесени електроди. Ако въздействаме на електродите с ултразвуков генератор с променливо електрично поле, пластинката започва да трепти с честота равна на честотата на променливия сигнал подаден от генератора. Излъчващата способност е особено голяма, ако честотата на променливото електрично поле съвпадне с механичната резонансна честота на пластинката.

Устройството на пиезоелектрически излъчвател е показано на фиг.1:



Фиг. 1. Устройство на трансдюсер.

Както се вижда самия ултразвуков преобразувател – трансдюсер за ултразвуково озвучаване на течности в ултразвуковите вани представлява една механично - електрическа система, която не може да се причисли към съществуващите пасивни и активни елементи. Поради това не съществуват адекватни модели в SPICE системите за симулиране работата на електронните схеми. Целта на настоящия доклад е да се предложи подходящ модел на ултразвуков преобразувател – трансдюсер и да се симулира работата на ултразвукова вана, като се потърси верификацията на модела.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Основните характеристики и параметри на пиезокерамиката определящи нейното използване за ултразвукови излъчватели са: диелектрическа проницаемост ϵ , модул на Юнг E , тангенс на ъгъла на диелектричните загуби $\tan \delta$, пиезомодул d_{33} , зависимост на ϵ , $\tan \delta$ и d_{33} от температурата[3].

Условието за резонанс в пиезоелектрическия излъчвател се изразява с формулата:

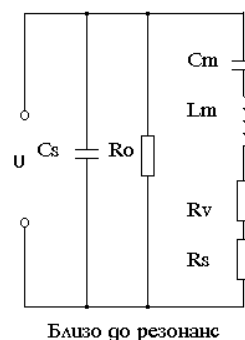
$$\operatorname{tg} k \cdot d = \frac{2}{k \cdot D_1} \quad (1)$$

d - дебелина на пластината

D_1 - приведена дебелина на пластината, към площта и

Ултразвуковите преобразуватели излъчват преди всичко в една посока.

Заместващата схема на такъв пиезоелектрически преобразувател, който преобразува механичните параметри в електрически има вида (фиг.2),където:



Фиг. 2. Пълна заместваща схема на трансдюсер.

C_s - електрически капацитет на пиезовибратора

L_m - еквивалентна, индуктивност на преобразувателя

C_m - последователен, сериен капацитет

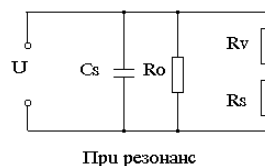
R_v - активно съпротивление на механичните загуби

R_s - съпротивление на излъчване

R_0 - отчита електрическите загуби в проводниците

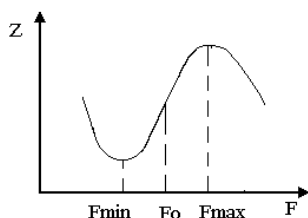
R_v се обуславя от вътрешното триене на частиците на материала при колебания. Силата на триене е пропорционална на скоростта на колебанията. Съпротивлението R_s се определя от параметрите на излъчвателя.

При резонанс пълното съпротивление на контура е равно на нула и заместващата схема е удобно да се представи в следния вид -фиг.3[4].



Фиг. 3. Заместваща схема на трансдюсер при резонанс.

Пиезоелектрическите преобразуватели, използвани в ултразвуковите схеми, се явяват резонансни системи работещи на резонансна честота или на честота на нечетен хармоник.



Фиг. 4. Резонансна характеристика на трансдюсер.

На фиг.4 е показана зависимостта на пълното съпротивление от честотата-резонансна характеристика. Характеристиката има минимум и максимум. При ниски честоти съпротивлението намалява, което се обуславя с последователния резонанс в L_m и C_m . С повишаване на честотата се появява максимално съпротивление, получено в резултат на паралелния резонанс на C с контура L_m C_m , имащ индуктивен характер при ВЧ.

Електромеханическият КПД се определя по формулата:

$$\eta_{\text{м.е.}} = \frac{R_0}{R_0 + R_s} \quad (2)$$

Механико-акустичният КПД $\eta_{\text{м.а}}$ зависи от загубите на вътрешното триене в материала, а също така и от на вълновото съпротивление и средата.

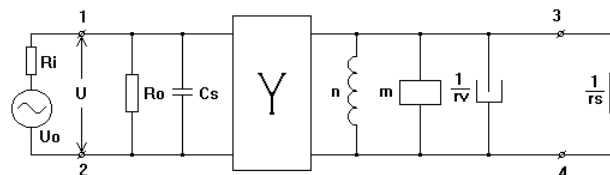
За захранването на пиезокерамичните излъчватели се използват ултразвукови генератори, които преобразуват ток с промишлена честота в ток с висока честота. Тези генератори са разчетени за работа с различни технологични устройства. Те позволяват широк диапазон на изходни параметри (мощност, честота, напрежение и др.) при условие на съгласуване с товар и са предназначени както за използване в лаборатории при опитни производства, така също и за захранване на различни устройства.

Пиезокерамиката има значителна диелектрична проникваемост, малка влагоустойчивост, сравнително голяма механична и електрическа якост и ниска цена, както и опростена технология за изработването и. Тези предимства обуславят използването на пиезокерамиката за изработване на ултразвукови преобразуватели, които имат малко входно съпротивление. Това предполага ниско работно напрежение, което представлява удобство от гледна точка на експлоа-

тацията на ултразвуковия генератор, който служи за захранването им.

P-Spice модел на пиезо-електричен преобразувател.

Електрическата еквивалентна схема на пиезокерамичен излъчвател, с известни допускания в режим на едностранно излъчване, може приблизително да бъде представена с помощта на четириполусника от фиг.5[1].



Фиг. 5. Еквивалентна схема на пиезокерамичен излъчвател в режим на едностранно излъчване.

В правоъгълника със знак Y е обозначен идеален електромеханичен трансформатор с коефициент на трансформация Y . От ляво на него са включени електрическите елементи: съпротивлението R_0 , отчитащо електрическите загуби в проводниците и електрическият капацитет на пиезовибратора C_s . Към клемите 1 и 2 е включен високочестотен ултразвуков генератор, явяващ се източник на напрежение U_0 с вътрешно съпротивление R_i . От дясно на този трансформатор са включени еквивалентните механични елементи на vibratora: гъвкавост(податливост) n , маса m и съпротивлението на загубите r_v . Клемите 3 и 4 служат за свързване на късо на съпротивлението на излъчване r_s .

Както беше отбелязано за напрежението на пиезокерамичен излъчвател се използват титанати на бария и калция и цирконий титанат олово(ЦТО). Високи качествени показатели имат твърдите разтвори на ЦТО в сравнение с титан бариевите, а именно: висока точка на Кюри; висок пиезомодул, който превишава няколко пъти този на титан бария; малки диелектрични загуби в силни полета; по-стабилни характеристики при изменение на напрежението. Скоростта на звука и резонансната честота се изменят незначително при изменение на температурата. Избраният за моделиране ултразвуков излъчвател е с пиезопластици от оловно циркониев титанат на VERNITRON със следните каталожни данни[2]:

$d=6,35 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ -дебелина на пластината;
 $D_1=50 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ -външен диаметър;
 $D_2=10 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ -вътрешен диаметър;
 $d_{33}=289 \cdot 10^{-12} \text{ m/V}$ -пиезоелектричен мо-
 дул;

$e_{33}=15,1 \text{ C/m}$; -пиезоелектрична кон-
 станта;

$g_{33}=26,1 \cdot 10^{-3} \text{ V.m/N}$ -пиезоелектрична
 константа;

$C_{33}^E=11,5 \cdot 10^{10} \text{ N/m}$ -модул на еластич-
 ност;

$\rho=7,5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}$ -плътност на пиезокера-
 миката;

$k_{33}=0,7$ -коефициент на електромеханич-
 на връзка;

$\epsilon_{33}^s/\epsilon_0=635$ -диелектрична прониктаемост
 в натоварено състояние;

$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0=1300$ -диелектрична прониктаемост
 в ненаоварено състояние;

$Q_m=500$ -механичен качествен фактор;

$T_{\max}=200^\circ\text{C}$ -температура.

Използва се известна методика за проек-
 тиране на пиезокерамичен излъчвател [7],
 като са направени следните изчисления.

- *изчисляване на излъчващата повърх-
 ност на пластината;*

$$F = \pi \left(\frac{D_1^2}{4} - \frac{D_2^2}{4} \right) = 0,001883 \text{ m}^2 \quad (3)$$

- *изчисляване коефициента на транс-
 формация;*

$$Y = \frac{d}{2 \cdot F \cdot e_{33}} = 0,044 \quad (4)$$

- *изчисляване на механичните парамет-
 ри n, m, r_s ;*

$$m = \frac{\rho \cdot d \cdot F}{2} = 0,045 \text{ kg} \quad (5)$$

$$n = 2 \cdot \frac{1 - k^2}{\pi^2 (1 - 0,8k^2)} \cdot \frac{d}{C e_{33} \cdot F} = 4,979 \cdot 10^{-12} \quad (6)$$

$$r_s = Z_0 \cdot F = 2,827 \cdot 10^3 \Omega \quad (7)$$

където Z_0 -вълново съпротивление на
 средата, в която се извършва излъчването и
 се определя:

$$Z_0 = \rho \cdot c = 1,5 \cdot 10^6 \text{ kg/m.s} \quad (8)$$

където ρ -плътност на средата(вода), c -
 скорост на звука

- *изчисляване на капацитета на излъч-
 вателя;*

$$C_s = \epsilon_t \cdot \epsilon_0 (1 - k^2) \cdot \frac{F}{d} = 1,742 \cdot 10^{-9} \text{ F} \quad (9)$$

$\epsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ -диелектрична константа
 на вакуума.

- *изчисляване на КПД.*

Ако се пренебрегнат загубите в свърз-
 ващите проводници $R_0=\infty$ (т.е. електромеханичния КПД $\eta_{\dot{a}i} = 1$), то общия КПД на преобразувателя η ще бъде равен на механико-акустичния η_{ma} , който трябва да бъде голям и затова се избира [7] $\eta=0,9$.

За получаването на електрическия еквивалент на разглежданата пиезопластина трябва да се пренесат механичните елементи с помощта на електромеханичния трансформатор на електрическата страна на четириполусника. При пренасянето, паралелно съединените механични елементи се представят като последователно съединени (фиг.2,фиг.3), като се отчита коефициента на трансформация Y .

$$C_m = \frac{1}{Y^2} \cdot n = 2.563 \cdot 10^{-10} \text{ F} \quad (10)$$

$$L_m = Y^2 \cdot m = 0,87 \cdot 10^{-6} \text{ H} \quad (11)$$

$$R_s = Y^2 \cdot r_s = 5,49 \Omega \quad (12)$$

Съпротивлението на загубите се определя от: вътрешното триене, загубите при закрепване, механичен хистерезис и няколко други ефекта зависещи от трудно отчитателни фактори (чистота на изходните суровини, технология на изработване на пиезокерамиката и нейната следваща обработка). Поради тези причини практически R_v се определя трудно.

$$R_v = \frac{R_s}{\eta} - R_s = 0,61 \Omega \quad (13)$$

Съпротивлението на излъчване и на загубите R_s и R_v , можем да изчислим:

$$R_m = R_v + R_s = 6,104 \Omega \quad (14)$$

- *изчисляване напрежението на преоб-
 разувателя*

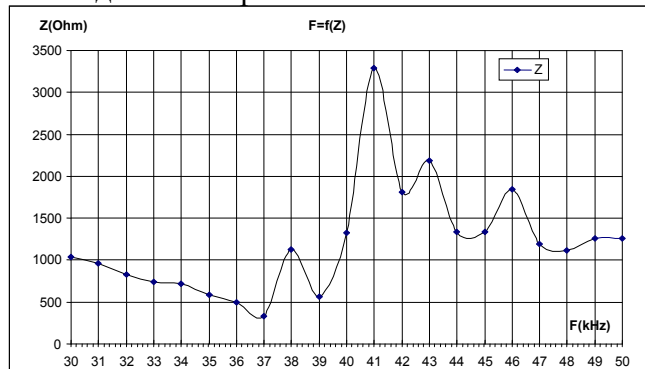
$$U = \frac{R_m}{R_s} \cdot \frac{d}{e_{33}} \sqrt{J \cdot Z_0} = 1808 \text{ V} \quad (15)$$

където $J=10 \text{ W/m}^2$ -интензивност на излъч-
 ване.

Експериментална резонансна характеристика.

За определяне на резонансната характеристика $/PX/$ с помощта на лампов синусоидален генератор и цифров осцилоскоп са заснети стойности на пълното съпротивле-

ние в диапазона 30-50 kHz, за реален преобразувател за ултразвукова вана. От фиг.6 се вижда резонансната характеристика на вана с товар и резонансната честота се получава между f и f , където f е честотата при максимална амплитуда на съпротивлението, а f е честота при минимална амплитуда на съпротивлението. На долната характеристика виждаме ясно изразен минимум на кривата някъде около 36,8 kHz (f) /паралелен резонанс/, а при 41,6 kHz (f) виждаме силно изразения максимум /последователен резонанс/.



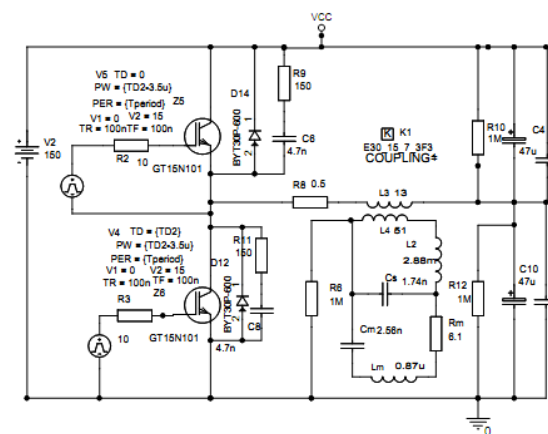
Фиг. 6. Резонансна характеристика на вана с товар.

P-Spice симулация работата на ултразвукова вана.

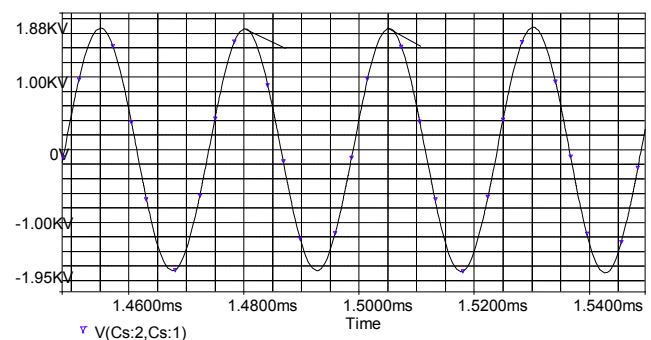
Този модел е представен на фиг.7. Той представлява резонансна система (нискоомен товар с капацитивен характер), която се захранва от ултразвуковия генератор на базата на полумостов клас DE инвертор. При подаване на напрежение в излъчвателя се развива резонансен процес (фиг.8), като честота му съвпада с честотата на генератора, която е приблизително 41000 Hz (фиг.9). Необходимата амплитуда на захранващото напрежение за захранване на пиезокерамичения излъчвател е 1.66 kV. В таблица 2 са обобщени еквивалентните елементи от модела съгласно схемата на фиг.2, които са използване за симулиране работата на ултразвуковата вана. За верификация на резултатите от симулацията на ултразвуковата вана с предложени модел на ултразвуков излъчвател е построен експериментален модел съгласно схемата на фиг.7. В таблица 1 са обобщени стойностите на еквивалентните елементи от модела на трансдюсера и някои величини вследствие на получените времедиаграми, показани на фиг.8-9.

Таблица 1

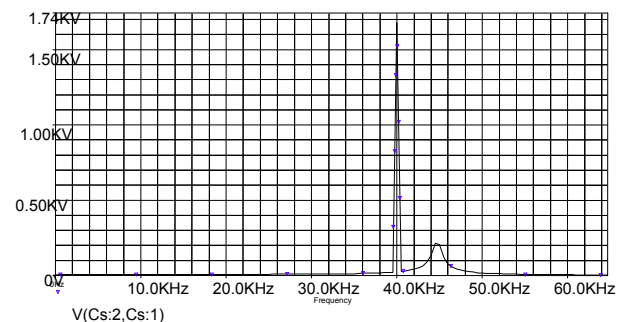
елемент	C_s, F	C_m, F	R_m, Ω	L_m, H
стойност	$2,563 \cdot 10^{-9}$	$1,742 \cdot 10^{-9}$	6,104	$0,87 \cdot 10^{-6}$
елемент	U_{L4}, V	U_{Z6}, V	I_{Z6}, A	P_{Z6}, W
стойност	1667	151	5.94	7.8



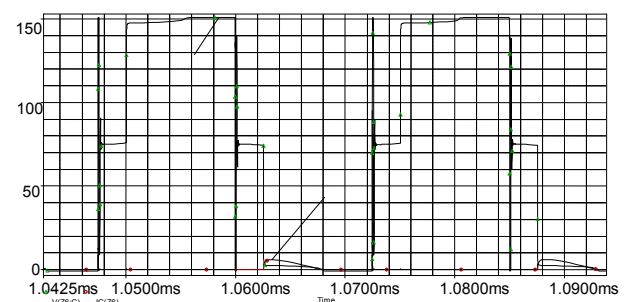
Фиг. 7. Симулационна схема на ултразвукова вана с предложени модел на пиезоизлъчвател.



Фиг. 8. Напрежение на ултразвуковия излъчвател на ваната от симулациите.

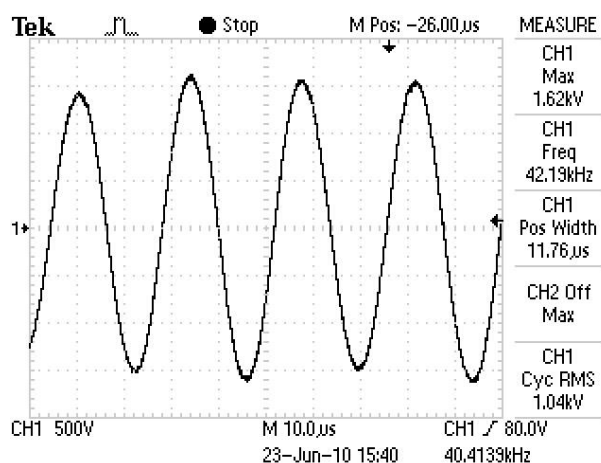


Фиг. 9. Спектрален анализ на напрежението на излъчвателя.



Фиг. 10. Ток и напрежение на транзистора Z6.

Заснети са осцилограми на напрежението върху ултразвуковия излъчвател – фиг.10. Максималната стойност на полученото напрежение от трансдюсер от експерименталните резултати е 1620 V.



Фиг. 11. Напрежение на ултразвуковия излъчвател на ваната от реални изследвания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методът, който се използва за изчисляване на еквивалентните параметри, а именно чрез превеждане на механичните параметри към електрическите е приложим за моделиране на електромагнитните процеси.

Получените математични формули позволяват автоматизация на процеса за изчисление на еквивалентните параметри на даден вид пиезоелемент. Предложени са два P-Spice - модела на пиезокерамични елементи, като първата схема се използва само при резонансна честота, а втората за целия честотен обхват.

Създадени са модели на пиезоелемент за P-Spice, които позволяват цялостно изследване на ултразвуков генератор за различни технологични цели. Това позволява да се определи съгласуването между генератора и товара. За нормалната работа на пиезокерамичния излъчвател трябва да се спазят някои изисквания отнасящи се към ултразвуковите генератори, които определят и избора на неговата схема:

- съгласуване на излъчвателя с генератора с цел предаването в товара на неговите мощности
- стабилност на работа на схемата при фиксирана резонансна честота на излъчвателя
- лесна настройка на схемата.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Донской А.В., О.К. Келлер, Г.С.Кратыш, Ультразвуковые электротехнологические установки, ЭНЕРГОИЗДАТ, Ленинград, 1982.
- [2] Cheng Hung-Liang, Chun-An Cheng, Chun-Chieh Fang and Hau-Chen Yen, Single-switch high power factor inverter driving piezoelectric ceramic transducer for ultrasonic cleaner, IEEE Transaction on Industrial Engineering, vol.8,pp.10-0224-10-0230.
- [3] Kauczor C., N. Fruhleke, Inverter topologies for ultrasonic piezoelectric transducers with high mechanical Q-factor, 35th Annual IEEE Power Electronics Specialis Conference, Aachen, Germany, 2004.
- [4] Kifune H. and Y.Hatanakm, A method of circuit design based on the experimental analysis of high-intensity ultrasonic transducer and the numerical analysis of zero current soft switching inverter using current overlapping commutation, PCC-Osaka 2002