

АКУСТИЧЕН МЕТОД ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА РАЗСТОЯНИЕ С ПИЕЗОЕЛЕКТРИЧНИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Райчо Иларионов, Петър Иванов, Иван Симеонов, Христо Килифарев,
Красимир Орманджиев

Представен е един подход за измерване на разстояние до неподвижни обекти чрез ултразвукови вълни, генерирани от пиезоелектричен преобразувател. Използван е звуков ехолокационен принцип. Теоретично е изследвано поведението на пиезоелектричен преобразувател с форма на диск на базата на създадените модели. С помощта на продукта Matlab Simulink е симулирана работата на пиезоелектричния преобразувател в разглежданата система. Вследствие на симулацията са получени и графично представени динамичните процеси, протичащи в системата. Направен е анализ на получените резултати и изводи, които са основа за разработване на функционален модел на цифрово устройство за измерване на разстояние до неподвижни обекти във въздушна среда.

УВОД

В много практически случаи се налага да се измерват неголеми разстояния от една точка до неподвижни обекти. За целите на проектирането такива измервания могат да послужат и за определяне координатите на обект в равнината (2D) или в пространството (3D). За това могат да се използват непосредствени (преки) и посредствени (косвени) методи [1]. За да се избегне субективността и за да се автоматизира измерването, за предпочитане са косвените методи. При тях се отчитат други величини, които се преобразуват и въз основа на установената връзка между тях се определя измерваното разстояние. Тези методи се базират на разпространението на ултразвукови, инфрачервени светлинни или електромагнитни вълни във въздушна среда.

Основна цел на доклада е теоретично изследване поведението на пиезоелектричен преобразувател и възможността за използването му в система за измерване на разстояние до неподвижни обекти във въздушна среда.

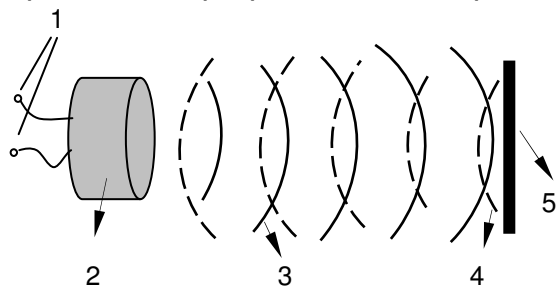
За постигането на целта са формулирани и решени следните задачи:

- Създаване на модел на пиезоелектричен преобразувател за електроакустично преобразуване;
- Представяне на модел на системата за измерване на разстояние до неподвижни обекти;
- Разработване на аналогов модел за симулиране поведението на системата при измерване;
- Симулиране на динамичните характеристики за работата на системата и графичното им представяне чрез продукта Matlab Simulink;
- Анализ на получените резултати и изводи.

МЕТОД

Избраният метод за измерване на разстояние се основава на разпространение на ултразвукови вълни във въздушна среда и е базиран на ефекта на отражение. На фиг. 1 е показан пиезоелемент,

който може да работи в един от двата режима - на излъчване или на приемане. Преградата е повърхността на обекта, до който се измерва разстоянието от дадена точка. Използва се прав и обратен пиезоефект.



Фиг. 1. Излъчване и приемане на ултразвукова вълна
1-Електрически изводи; 2-Ултразвуков преобразувател; 3-Излъчен сигнал; 4-Отразен ехо-сигнал; 5-Преграда

Fig. 1. Transmitting and receiving of ultrasound wave
1-Electrical leads; 2-Ultrasound transducer; 3-Transmitted signal; 4-Reflected echo-signal; 5-Barrier

За прилагането на избраният метод са използвани два пиезоелектрични преобразувателя с форма на диск - *излъчвател* и *приемник*. При измерване, само едната повърхност на излъчвателя и приемника контактува с работната въздушна среда. Другата повърхност може да остане свободна или да се натовари с демпфер. Акустичният контакт на пиезоелектричния елемент с работната среда и демпфера,

може да се осъществи непосредствено или чрез преходни слоеве.

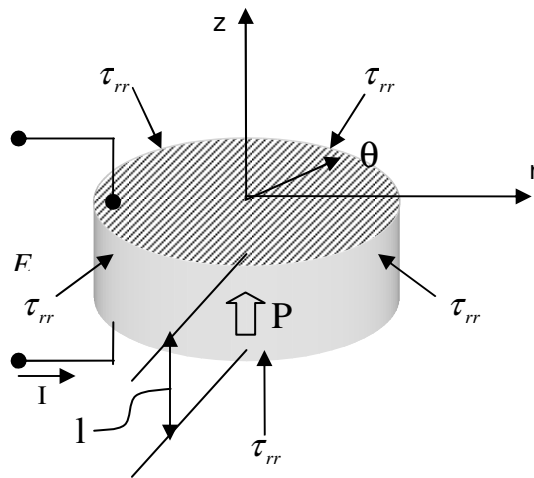
Излъчващият и приемащият пиезоелемент, заедно с преходните слоеве, демпфериращата и работната среда с преградата се разглеждат, като една система за електроакустично преобразуване. С помощта на тази система е възможно да се излъчи акустична вълна и да се приеме същата след отражението ѝ. Интервалът от време между излъчването и приемането на акустичната вълна е мярка за разстоянието от излъчвателя до приемника [2].

Избраният подход може да има и редица други приложения. В зависимост от честотата на колебанията на възбуждащия електрически сигнал могат и да се моделират пространствените характеристики на акустичната вълна. По посока на разпространението на акустичната вълна се модифицират характеристикните ѝ параметри. По този начин отразения ултразвуков сигнал носи информация за характеристиките на средата между излъчвателя и приемника, както и за самата отразяваща среда. Интелигентна сензорна система може да извлече тази информация за различни цели. За да се постигне това, сигналите се обработват, демодулират и оценяват от съответния хардуер и софтуер. При следващата стъпка се използват алгоритми за изчисляване на параметрите, които представляват интерес. Те се базират на законите за разпространението на вълните и включват взаимодействието на акустичните вълни с изследваната среда. Познаването на тези взаимовръзки е необходимо за разработването на нови приложения на ултразвуковите сензори, например в управлението на процеси, за специални измервания на разстояние и др. [3].

МОДЕЛИРАНЕ

За да се представи физичната проблематика на измерването на разстояние е необходимо да се създаде модел на пиезоелектричен преобразувател и да се изследват процесите в него. Материалът, от

който е изработен преобразувателя е пиезокерамика. За целта се разглежда пиезоелектричен преобразувател с форма на диск, показан на



Фиг. 2. Пиезоелектричен преобразувател с форма на вибратора - диск

Fig. 2. Piezoelectric transducer with cylindrical shape of the vibrator - discus

фиг. 2. Уравненията за колебанията му са записани в цилиндрични координати r, θ, z . Приема се, че оста z съвпада с посоката на поляризация P и че пиезопластината е достатъчно тънка, от което следва, че могат да се пренебрегнат механичните напрежения по направление на оста z , а така също да се приеме напрежението на повърхността за равно на нула. Механичните напрежения определящи се от направлението на колебанията $\tau_{zz} = \tau_{rz} = \tau_{r\theta} = 0$ и поляризиациите $P_r = P_\theta = 0$.

При тези приемания уравнението за движението на

кръгла пиезокерамична пластина в цилиндрични координати добива вида (1) [4]:

$$(1) \quad \frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2} = \frac{A}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_r}{r^2} \right),$$

където: u_r - преместване на частиците на пиезоелемента, ρ - плътност на пиезокерамиката, E_G - модул на Юнг на пиезокерамиката, σ_G - коефициент на Пуасон.

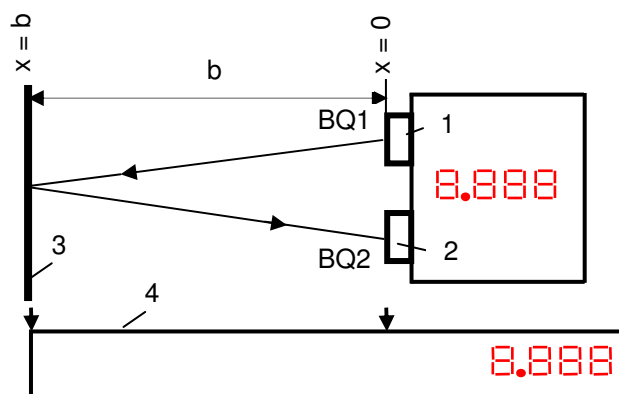
Вибраторът (фиг. 2) се деформира в зависимост от динамиката на сигнала, вследствие на обратния пиезоэффект при въздействие с електрическо напрежение E . Тъй като пиезокерамичният елемент представлява електроакустична система, тя от своя страна създава звукова вълна, която започва да се разпространява към обекта за измерване. Вибраторът излъчва ултразвукови вълни с колебателна скорост $u(t,r)$, които се разпространяват във флуидна среда и достигат до повърхността, до която се измерва разстоянието. Колебателната скорост е най-голяма при $r = 0$.

След като се отрази от преградата (граничната повърхност на двете хомогенни среди), същата вълна се връща като ехо и започва акустически да въздейства на сензора, който вече е превключен в режим на приемане. При използването на правия пиезоэффект попадналите на повърхността на пиезоелемента механични колебания се преобразуват в електрически сигнал.

При разпространение на ултразвуковите вълни трябва да се има предвид, че еластичната работна среда (въздух), в която се извършват колебанията, притежава вискозитет, т. е. в средата има определени загуби на енергия на колебаещите се частици. За отчитане на поглъщането се разглежда уравнението за разпространение на вълните (2) [5]:

$$(2) \quad \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = c_1^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{4}{3} v \frac{\partial^3 \varphi}{\partial x^2 \partial t},$$

където $v = \eta / \rho$ - коефициент на кинематичен вискозитет; η - коефициент на динамичен вискозитет; φ - потенциал на скоростта; c_1 - скорост на разпространение на звука във флуида (в случая въздух); b – измервано разстояние от излъчвателя



Фиг. 3. Принципно представяне на системата за измерване на разстояние до неподвижни обекти

1-Излъчвател; 2-Приемник; 3-Обект; 4-Инкрементална линия с точност 20 μ m

Fig. 3. Principal presentation of the system for measurement of distance to immobile objects
1-Transmitter; 2-Receiver; 3-Object; 4-Incremental line with 20 μ m accuracy

разстояние от излъчвателя BQ1 (фиг. 3) до обекта (база за прозвучаване); x - линейна координата, ($0 \leq x \leq b$). При $x = 2b$ отразената от обекта акустична вълна попада върху пиезоелемента BQ2, който е в режим на приемане. Това е скоростта, с която се връща ехосигналът.

За разработване на модела за измерване на разстояние на базата на разпространение на ултразвукови вълни във въздушна среда са решени съвместно уравнения (1) и (2). При гранични условия $x = 0$ и $x = b$, фиг. 3) е получено решението във времевата

област:

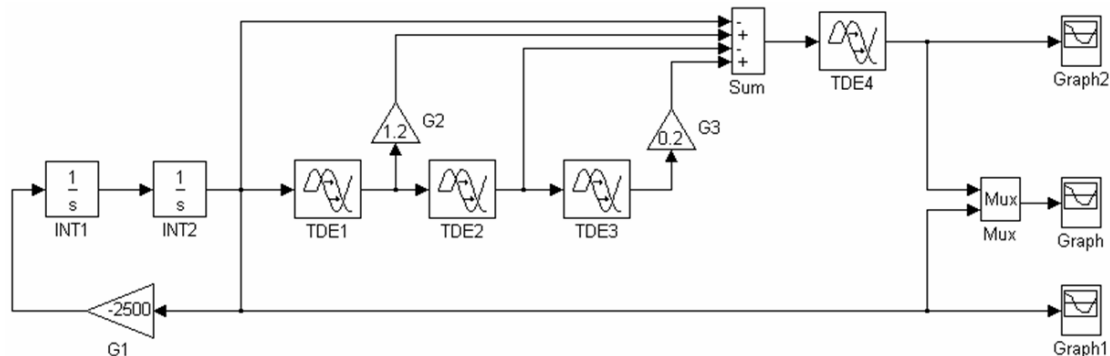
$$(3) \quad \varphi(2b, t) = (m+1)\varphi_0(t) + m\varphi_0(t-2\tau) - \varphi_0(t+\tau) - \varphi_0(t-\tau)$$

където $\varphi_0(t)$ - е функцията, съответстваща на скоростта на колебание на пиезоелемента $u(t, r)$ [2];

τ има смисъл на закъснение по време и се представя с отношението b / c_1 ; m - коефициент на отражение от обекта, до който се измерва разстояние ($0 < m < 1$). Коефициентът на отражение е дефиниран като отношение на амплитудите на приетия и излъчения сигнал. Разглежданията са направени за скоростта $u(t, 0)$. Аналогични разсъждения могат да се направят за всяко $u(t, r)$. $\varphi_0(t)$ се отъждествява с колебателната скорост на вибратора $u(t)$.

Израз (3) е решението за скоростта на вълната върху приемната повърхност на пиезопреобразувателя BQ2 във функция от времето t и представя **модела за измерване на разстояние** на базата на разпространение на ултразвукови вълни във въздушна среда. Разработването на модела по-подробно е показано в [2]. За получаването на (3) е прието, че *Излъчвателят* и *Приемникът* са един и същ елемент, който се превключва.

На базата на полученото решение на разработения модел (3) е създаден **аналогов модел** (фиг. 4) на системата (пиезоелемент BQ1 - работна среда - отразяваща среда - работна среда – пиезоелемент BQ2, фиг. 3). Системата, която принципно е представена на фиг. 3, може да се



Фиг. 4. Аналогов модел на системата

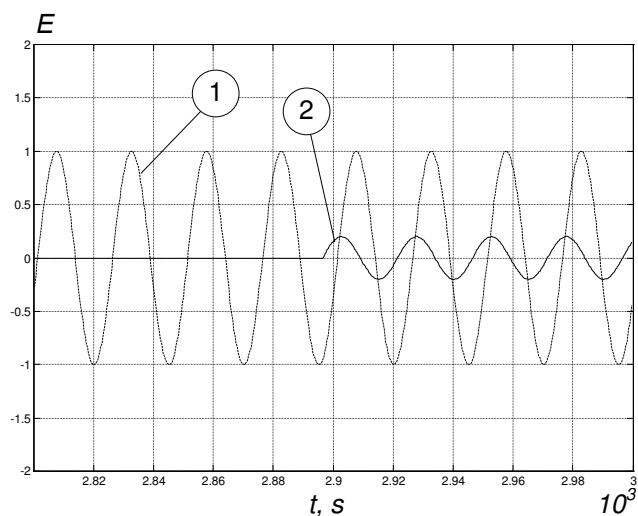
Fig. 4. Analogue model of the system

вземе предвид при разработката на цифрово устройство за измерване на разстояние.

За тази система са използвани два отделни елемента - Излъчвател и Приемник. По този начин се избягва превключването на пиезопреобразувателя и свързаните с това преходни процеси. С помощта на продукта Matlab Simulink (ver 4.2) са получени и графично представени динамичните процеси, протичащи в системата (фиг. 5).

Исходната величина на пиезоелемента – скоростта на излъчване $\varphi_0(t)$ се получава от генератора на хармоничен сигнал във вида

$$(4) \quad \varphi_0(t) = A_0 \sin \omega t .$$



Фиг. 5. Динамични характеристики за работата на пиезоелемента

Fig. 5. Dynamical characteristics for the work of the piezoelement

Моделирането на генератора на честота е реализирано чрез съответните блокове за интегриране, сумиране и умножение (фиг. 4).

За получаване на изходната величина са използвани блокове за закъснение и блок за сумиране на сигнали.

РЕЗУЛТАТИ

Работната среда за системата е въздух.

След отчитане на факта, че Излъчвателят и Приемникът са два отделни елемента, са получени

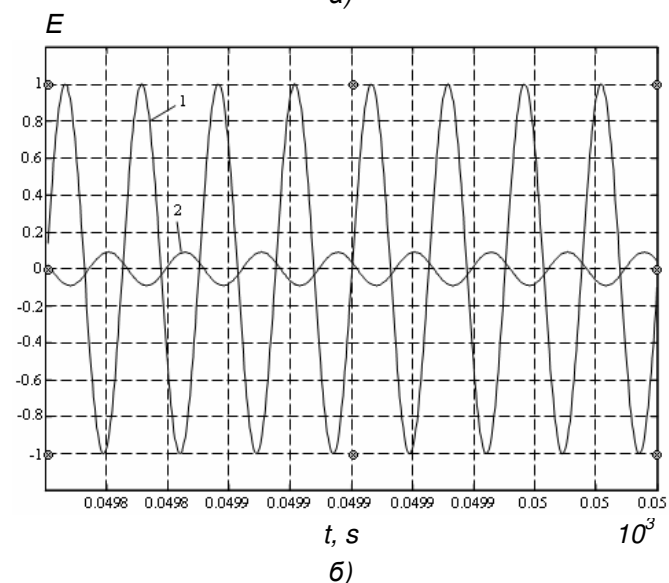
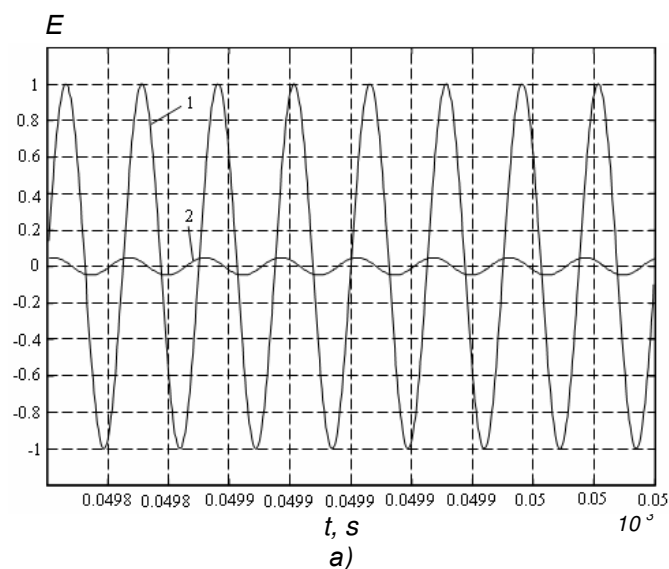
симулирани процеси, които могат да се представят графично и да се анализират. Като резултат на фиг. 5 е показана симулирана динамична характеристика за работата на пиезоелемент с честота $f=40\text{kHz}$; $T=30\text{ }^\circ\text{C}$, $c_1=348,7\text{m/s}$; разстояние $b=0,505\text{m}$ и коефициента на отражение $m = 0,2$.

На фиг. 5 с крива 1 е показан излъчвания от пиезоелемента сигнал, а с крива 2 – отразения. Ясно се вижда разликата в амплитудите на двата сигнала. Този процес е реален, при коефициент на отражение $m = 0,2$.

Закъснението τ , което има смисъл на закъснение по време се определя от зависимостта (5):

$$(5) \quad \tau = \frac{2b}{c_1}.$$

Периодът от време между началото на излъчване на сигнала и момента на приемането му след отражение, е **мярка** за измерваното разстояние.



Фиг. 6. Динамични характеристики на пиезоелемента при $m=0,1$ (а) и $m=0,2$ (б)

Fig. 6. Dynamical characteristics of the piezoelement by $m=0,1$ (a) and $m=0,2$ (b)

На характеристиката се вижда добре правата, която съвпада с абсцисната ос и която продължава до крива 2 (отразеният сигнал). Тази права съответства на частта от времето, необходимо за преминаване на сигнала от Излъчвателя до преградата и обратно до Приемника.

На фиг. 6 са показани динамични характеристики, илюстриращи работата на пиезоелемента с честота $f=40\text{kHz}$, $T=0^\circ\text{C}$ при постоянна отдалеченост $b=1582\text{mm}$. Ясно се вижда формата и амплитудата в относителни единици на излъчените от пиезоелемента ВQ1 ултразвукови акустични вълни (в резултат от приложеното възбуждащо електрическо напрежение E в режим на излъчване, фиг. 2 и фиг. 3) във функция от времето - крива 1. На фиг. 6 графично са представени амплитудите (E е в относителни единици) на скоростта на вълната върху приемната повърхност на пиезоелемента ВQ2 (в режим на приемане) във функция от времето t - крива 2. Тези характеристики са симулирани при закъснение $\tau = 0,00955895\text{ s}$ за две различни стойности на коефициента на отражение m : $m = 0,1$ (фиг. 6а) и $m = 0,2$ (фиг. 6б). Разстоянието b опитно е определено от съображения за максимална амплитуда на отразения сигнал (крива 2), при постоянна

амплитуда на излъчените от пиезоелемента ултразвукови акустични вълни (крива 1), получени вследствие обратен пиезоефект.

Ако се симулират динамичните характеристики за стойности на коефициента на отражение m в границите от $0 \div 1$ и се изчислят отношенията на амплитудите на приетия и излъчения сигнал (A) за всеки отделен случай, може да се получи зависимостта на коефициента на отражение m от напрежението на приетия сигнал $U_{\text{приемане}}$ при постоянно възбуждащо напрежение E ($m = f(A)$).

Установената стойност на амплитудата на отразената акустична вълна е мярка за коефициента на отражение m на съответната контролируема среда. За един и същи коефициент на отражение m , амплитудата на отразената вълна зависи от разстоянието b на излъчвателя BQ1 до отразяващата среда, свързано с коефициента на закъснение τ (5), фиг. 3. За тази цел, в случай на практическо използване, е необходимо предварително да се установи тарировъчната характеристика на устройството за измерване. От известната зависимост на коефициента на отражение m от напрежението на приемане $U_{\text{приемане}}$ при постоянна стойност на възбуждащото пиезоелемента напрежение E , може да се разграничава една от друга контролируема среда (например течности с различен вискозитет).

Получената графика $m = f(A)$ дава възможност от регистрираното вследствие правия пиезоефект напрежение $U_{\text{приемане}}$ да се определи стойността на коефициента на отражение m , при постоянно b .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощта на избрания метод е изследван и анализиран пиезоелектричен преобразувател с форма на диск. Разработен е имитационен модел на системата (пиезоелемент BQ1 - работна среда (въздух) - отразяваща среда - работна среда (въздух) – пиезоелемент BQ2), чието физическо (материално) представяне е показано на фиг. 3.

Както е показано и в [2], от представените графични решения могат да се направят следните изводи:

1. Честотата на излъчения и приетия сигнал съвпадат, като в зависимост от стойността на b се наблюдава известно дефазиране;

2. Вследствие на правия пиезоефект, като се измери $U_{\text{приемане}}$ се определя стойността на коефициента на отражение m , при постоянно b ;

3. За един и същи коефициент на отражение m , амплитудата на отразената вълна зависи от разстоянието b на излъчвателя до отразяващата среда, свързано с времето на закъснение τ .

4. От графично представените динамични характеристики се вижда, че процесите започват със закъснение по време τ , след което протича преходен процес до установяване на колебания с постоянна амплитуда.

Увеличаването на работната (резонансната) честота f на пиезоелемента ще доведе до:

- намаляване продължителността на пакета от импулси за възбуждане;
- увеличаване на мъртвата зона на устройството за измерване на разстояние;

- намаляване на максималното разстояние на прозвучаване, вследствие загубата на енергия на ултразвуковите вълни от вискозитета на средата, в която се разпространяват [3, 5].

Предложеният подход и направените изследвания за поведението на сигнала при разпространението му в работната среда са използвани, като основа за формулиране на функционален модел на цифрово устройство за измерване на разстояние до неподвижни обекти.

Достоверността на измерванията с устройството се потвърждава от сравнението им с тези, получени от инкрементална линия (фиг. 3).

Направеното теоретично изследване може да се използва и за други съвременни практически приложения. Решаваща роля за това имат пространствените характеристики на ултразвуковия сигнал и носената от него информация.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стоименова, А. Нивоизмервателни системи. - Инженеринг ревю, 2001, № 4, 61-81.
2. Симеонов, И., П. Иванов, К. Орманджиев. Определяне коефициента на отражение на ултразвукови вълни от граничната повърхност на две хомогенни среди посредством пиезоелектрични елементи. - Техническа Мисъл, 2004, № 4, 22-34.
3. Baltes, H. W. Göpel, J. Hesse. Sensors Update. Volume 3. Sensor Technology-Applications-Markets. Weinheim-Berlin-New York-Chichester-Brisbane-Singapore-Toronto, Wiley-VCH Verlag GmbH, 1998.
4. Кикуичи, Е. Ултразвуковые преобразователи /пер.с англ./. М., Мир, 1972.
5. Бабилов, О., И. Ултразвуковые приборы контроля. Л., Машиностроение, 1985.
6. Karris, S. T. Introduction to Simulink with Engineering Applications. Second Edition. Orchard Publications, 2008.

ACOUSTIC METHOD FOR MEASUREMENT OF DISTANCE WITH PIEZOELECTRIC TRANSDUCERS

Raycho Ilarionov, Petar Ivanov, Ivan Simeonov, Hristo Kilifarev, Krasimir Ormandzhiev

Summary

It is presented an approach for measurement of distance to immobile objects by means of ultrasound waves, generated by piezoelectric transducer. For this purpose a sound echolocation principle is used. A theoretical research is made of the behavior of the piezoelectric transducer with shape of discus on the base of created models. With the help of Matlab Simulink is simulated the work of the piezoelectric transducer in the discussed system. As results from the simulation are obtained and graphically presented the dynamical processes running in the system. An analysis is made over the obtained results and conclusions, which are a base for development of a functional model of digital device for measurement of distance to immobile objects in air medium.

доц. д-р инж. **Райчо Иларионов**
Технически университет – Габрово,
катедра „Компютърни системи и
технологии”,
5300 Габрово, ул. „Х. Димитър” 4
e-mail: ilar@tugab.bg

доц. д-р инж. **Петър Иванов**
Технически университет – Габрово,
катедра „Енергийна техника”,
5300 Габрово, ул. „Х. Димитър” 4
e-mail: psivanov@tugab.bg

д-р инж. **Иван Симеонов**, гл. асистент
Технически университет – Габрово,
катедра „Компютърни системи и
технологии”,
5300 Габрово, ул. „Х. Димитър” 4
e-mail: isim@tugab.bg

инж. **Христо Килифарев**, ст. асистент
Технически университет – Габрово,
катедра „Автоматика, информационна
и управляваща техника”,
5300 Габрово, ул. „Х. Димитър” 4
e-mail: hri_100@abv.bg

инж. **Красимир Орманджиев**, ст.
асистент
Технически университет – Габрово,
катедра „Енергийна техника”,
e-mail: orman@tugab.bg

Raycho Ilarionov, Ph.D., Assoc. Prof.,
Technical University of Gabrovo,
Department of Computer Systems and
Technologys,
5300 Gabrovo, 4, H. Dimitar str.,
e-mail: ilar@tugab.bg

Petar Ivanov, Ph.D., Assoc. Prof.,
Technical University of Gabrovo,
Department of . Power Engineering
5300 Gabrovo, 4, H. Dimitar str.,
e-mail: psivanov@tugab.bg

Ivan Simeonov, Ph. D., Ass. Prof., Eng
Technical University of Gabrovo,
Department of Computer Systems and
Technologys,
5300 Gabrovo, 4, H. Dimitar str.,
e-mail: isim@tugab.bg

Hristo Kilifarev, Ass. Prof., Eng
Technical University of Gabrovo,
Department of Automation, Information And
Control Systems
5300 Gabrovo, 4, H. Dimitar str.,
e-mail: hri_100@abv.bg

Krasimir Ormandzhiev, Ass. Prof., Eng
Technical University of Gabrovo,
Department of Power Engineering
5300 Gabrovo, 4, H. Dimitar str.,
e-mail: orman@tugab.bg