

ЕДНОМЕРЕН МОДЕЛ НА ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧНИТЕ ПРОЦЕСИ В СЕГНЕТОПИЕЗОЕЛЕКТРИЧЕН МАТРИЧЕН СЕНЗОР

В. Тодорова

Технически Университет - Габрово

Abstract. An one-dimensional model of the electromechanical processes in a ferropiezoelectrical tactile array sensor with a running bulk acoustic wave is presented in this paper. The model is the base of the mathematical simulation of the tactile array. It provides a possibility for researching the parameters of the output information signal of the array sensor depending on the parameters of the piezoceramic material of the active substrate, the design and technological parameters of the array and the parameters of the excitation pulse.

Във функционалния матричен сензор на основата на нерезонансен пиезомеханически трансформатор [1] възбудената бягща обемна акустична вълна (БОАВ) играе ролята на носител на тактилна информация. Динамичният характер на този носител позволява лесно да се реализира операцията „управляемо закъснение на сигнала по време“:

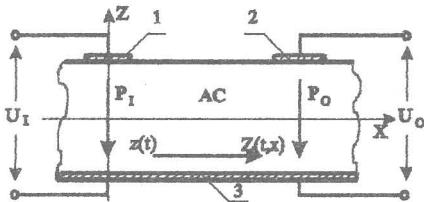
$$t = x_{e-g} / v_{ac}, \quad (1)$$

x_{e-g} - разстояние между електродите на възбудителната секция и коя да е чувствителна точка на матричното поле; v_{ac} - скорост на разпространение на фронта на БОАВ, постоянна за даден пиезомеханически материал. Това явление може да се използува за разпознаване на координатите на тактилни образи, ако се проектира подходяща конструкция на матричен сензор при определена организация на полето чувствителни точки.

Описанието на електромеханичните процеси в нерезонансния пиезотрансформатор с достатъчна точност може да се извърши с помощта на единомерен математически модел, базиран на основното уравнение за възбудяване на напречни механични трептения в пиезопластина под действие на импулс на електрическото напрежение върху възбудителния електрод за сметка на обратния пиезоэффект [2].

Поради особеностите на нерезонансния пиезомеханически трансформатор с бягща обемна акустична вълна, формирането на изходния сигнал може да се раздели условно на три процеса: 1) възбудяване и формиране на бягашата обемна акустична вълна в областта на пиезоматериала под възбудителните електроди 1; 2) разпространение на БОАВ в акустичната среда на пиезотрансформатора; 3) формиране на електрическия сигнал на изходния електрод 2 с отчитане на закъснението му спрямо възбуджащия БОАВ сигнал.

На фиг. 1 е представен нерезонансен пиеzотрансформатор (НПТ) с възбуджащ електрод 1 и генераторен електрод 2, който се явява основна схемотехническа единица от тактилната пиеzоматрица. Той представлява сегнето-пиеzокерамична пластини с възбудителен (1), генераторен (2) и общ (3) електроди с определена конфигурация, нарисети върху повърхностите ѝ. Обемът на сегнетоелектрика под възбудителния и генераторния електроди е предварително поляризиран до определена стойност на поляризацията P .



Фиг. 1. Нерезонансен пиеzотрансформатор с БОАВ

Възбудждане и формиране на БОАВ. Процесът на възбудждане и формиране на БОАВ е съсредоточен в зоната на входното преобразуване на активната сегнетопиеzоелектрична среда на нерезонансния пиеzотрансформатор (НПТ). С импулс на електрическото напрежение под възбудителния електрод 1 се възбудждаат дебелинни трептения $z(t)$ за сметка на обратния пиезоэффект, който се описват с диференциално уравнение от вида [2]:

$$\ddot{z}(t) + 2n\dot{z}(t) + \omega_0^2(z + \gamma z^3) = F_l(t) / m, \quad (2)$$

z - амплитуда на механичните трептения;

n - коефициент на вътрешно трение;

$\omega_0^2(z + \gamma z^3)$ - симетрична еластична характеристика за анизотропно твърдо тяло, каквото представлява поляризираната под възбудителните и генераторните електроди сегнетокерамика;

ω_0 - честота на собствените трептения на пластината, т.е. честота на дебелинните трептения за дадения случай;

γ - постоянен коефициент, зависещ от пиеzоматериала ($\gamma=0$ за изотропно твърдо тяло; $\gamma = \beta / \omega_0^2$, където β е коефициент, характеризиращ трептящата система (за твърд сегнетоматериал $\beta > 0$, а за мек- $\beta < 0$);

m - приведена маса на трептящата система; $m = M_{\text{пл}} / A_{\text{пл}}$, където $M_{\text{пл}}$ - масата на цялата пластини; $A_{\text{пл}}$ - площ на горната повърхност на пиеzопластината. Ако размерите на горната повърхност на пластината са много по-големи от тези на възбудждащия и генераторния електроди, то $m = \rho \cdot h \cdot A_l$, където ρ - плътност на пиеzоматериала; h - дебелина на пиеzокерамичната пластини; $A_l = a_l \cdot b_l$ - площ на възбудителния електрод; a_l , b_l - дължина и ширина на възбудителния електрод, съответно;

$F_I(t) = T_I(t) \cdot A_I$ - силата, действуваща между електроди 1 и 3 в резултат на обратния пьезоэффект; $T_I(t) = S_I(t) \cdot Y_{11}$ - механичното напрежение в активната среда на пьезоелектрика под възбудителния електрод, възникващо в резултат на обратния пьезоэффект; $S_I(t) = p_I \cdot d_{31} \cdot E_I(t) = p_I \cdot d_{31} \cdot U_I(t)/h$ - деформацията на сегнетопьезоелектрика в резултат на обратния пьезоэффект, където $E_I(t)$ - интензитет на електрическото поле, създавано в междуелектродното пространство (1 - 3) в резултат на приложен към възбудителния електрод импулс на електрическото напрежение $U_I(t)$. Тогава $F_I(t) = p_I \cdot d_{31} \cdot A_I \cdot Y_{11} \cdot U_I(t)/h$, където: $p_I = P_I/P_{max}$ - коефициент на поляризация на сегнетопьезоелектрика между електроди 1 и 3 (P_I - стойността на поляризацията между електроди 1 и 3; P_{max} - поляризация на насищане на пьезоматериала); d_{31} - пьезоелектричен модул на активната пьезосреда; Y_{11} - модул на Юнг, определящ еластичните свойства на пьезоелектричната среда.

Разпространение на БОАВ. Дебелинните механически трептения на активната среда, възбудени в обема на пьезопластицата между електроди 1 и 3, се предават в еластичната среда на сегнетопьезоелектрика от бягящата обемна акустична вълна с изменение на амплитудата на механичните трептения в резултат на известно разсейване на енергията на вълната:

$$Z(t, x) = z(t) \cdot e^{-\mu x} \quad , \quad (3)$$

μ - коефициент на погълтане на енергията на БОАВ, зависещ от свойствата на пьезокерамиката и определен по опитен път.

Анализът на процесите на възбудждане, формиране и разпространение на БОАВ в НПТ дотук беше направен само за сечение XZ на пьезопластицата. Но тъй като последната е еднородна във всички направления, то БОАВ ще се разпространява и в посока Y като радиална, а фронтът ѝ ще бъде с радиус $R = \sqrt{x^2 + y^2}$. При определени ограничителни условия по отношение на размерите на възбудителните и генераторните електроди на НПТ, обаче, може да се приеме, че БОАВ се разпространява само в посока X или само в посока Y [1]. Тези ограничителни условия са по отношение на ширината на възбудителния и генераторния електроди (b_I и b_O , съответно):

$$\left. \frac{b_I}{b_O} \right\} \leq \frac{\lambda_0}{2} \quad , \quad (4)$$

където $\lambda_0 = v_{ac}/f_0$ - дължина на БОАВ; v_{ac} - скорост на разпространение на БОАВ; f_0 - собствената честота на дебелинните трептения на пьезопластицата.

При това условие за произволна точка $r(x, y)$ амплитудата на механичните трептения, пренесени от БОАВ, е:

$$\left. \begin{aligned} Z(t, x) &= z(t) \cdot e^{-\mu x} \\ Z(t, y) &= z(t) \cdot e^{-\mu y} \end{aligned} \right| \quad (5)$$

Формиране на изходния електрически сигнал. При достигане на елементарен обем $r(x, y, z)$ от пиеzoактивната среда, формиран между изходния (генераторния) 2 и общия 3 електроди, механичните трептения $Z(t, x)$ и $Z(t, y)$, пренесени от БОАВ, предизвикват във всяка точка от повърхността на пиезопластината деформация:

$$\left. \begin{aligned} S(t, x) &= Z(t, x) / h \\ S(t, y) &= Z(t, y) / h \end{aligned} \right|$$

Съответстващото ѝ механично напрежение

$$\left. \begin{aligned} T(t, x) &= S(t, x) \cdot Y_{11} = Z(t, x) \cdot Y_{11} / h \\ T(t, y) &= S(t, y) \cdot Y_{11} = Z(t, y) \cdot Y_{11} / h \end{aligned} \right|$$

предизвиква за сметка на правия пиезоэффект изменение на електрическата индукция на диелектрика

$$\left. \begin{aligned} D(t, x) &= d_{31} \cdot p_0 \cdot T(t, x) = d_{31} \cdot p_0 \cdot Y_{11} \cdot Z(t, x) / h \\ D(t, y) &= d_{31} \cdot p_0 \cdot T(t, y) = d_{31} \cdot p_0 \cdot Y_{11} \cdot Z(t, y) / h \end{aligned} \right| ,$$

където: $p_0 = P_0 / P_{max}$ - коефициент на поляризация на сегнетоелектрика под изходния електрод.

Изменението на индукцията D води до изменение на заряда Q на изходния електрод 2:

$$\left. \begin{aligned} Q(t, x) &= A_0 \cdot D(t, x) \\ Q(t, y) &= A_0 \cdot D(t, y) \end{aligned} \right| ,$$

където $A_0 = a_0 \cdot b_0$ - площ на изходния електрод; a_0 , b_0 - дължина и ширина на изходния генераторен електрод на чувствителния елемент на матрицата, съответно.

От своя страна, изменението на заряда на изходния електрод предизвиква съответното изменение на изходното напрежение U_0 :

$$\left. \begin{aligned} U_0(t, x) &= Q(t, x) / C = Q(t, x) \cdot h / \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A_0 \\ U_0(t, y) &= Q(t, y) / C = Q(t, y) \cdot h / \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A_0 \end{aligned} \right| ,$$

където $C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A_0$ - капацитет на електрическия кондензатор, образуван между изходния 2 и общия 3 електроди; ϵ_0 - относителна диелектрична проницаемост; ϵ_r - диелектрическата проницаемост на сегнетоелектрика.

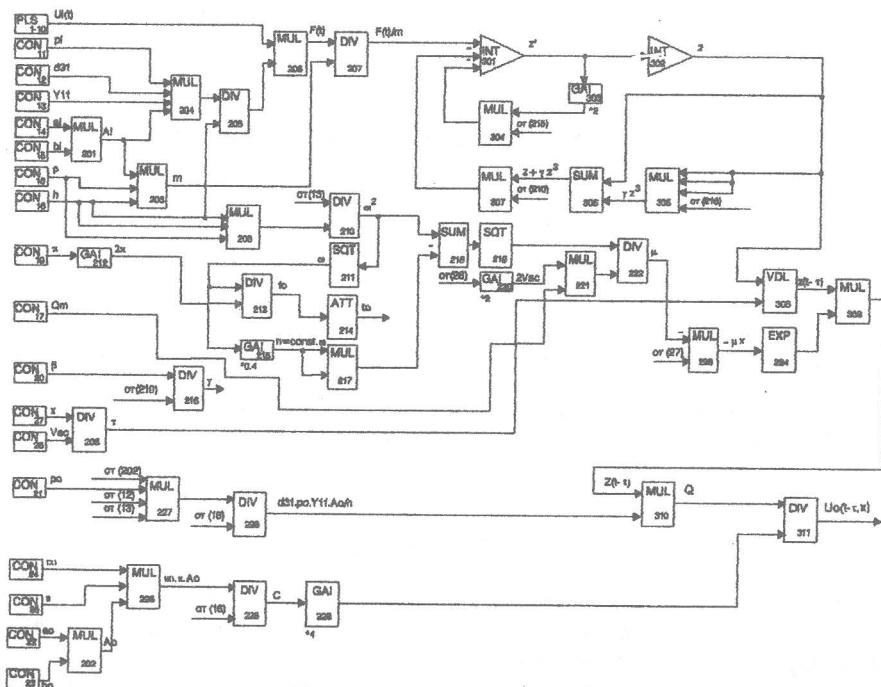
След елементарни преобразования, за изходното електрическо напрежение може да бъде записан следния израз:

$$\begin{aligned} U_O(t, x) &= d_{31} \cdot p_0 \cdot Y_{11} \cdot Z(t, x) / \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \\ U_O(t, y) &= d_{31} \cdot p_0 \cdot Y_{11} \cdot Z(t, y) / \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \end{aligned} \quad | \quad . \quad (6)$$

Ако се създава електрически контакт с изходния електрод, този електрически сигнал може да бъде регистриран като информационен. При това, той се получава с определено закъснение $\tau_{\text{вз}}$ спрямо импулса на възбудителния сигнал. Ако в такава точка е приложено силово въздействие (допир или натиск), то по полученото времезакъснение или по нивото на намалящата по експонента във всеки следващ чувствителен елемент на матрицата амплитудата на изходния сигнал могат да се определят координатите на активираната точка в мястото на тактилното въздействие съгласно принципа на проектиране на ТМ:

$$\begin{aligned} x_i &= v_{ac} \cdot \tau_{xi} \\ y_i &= v_{ac} \cdot \tau_{yi} \end{aligned} \quad | \quad . \quad (7)$$

Основен проблем при решаването на уравнението на електромеханичните трохнестия в пиеопластината (2) е еластичната характеристика на материала, която за анизотропно твърдо тяло има кубичен характер.



Фиг. 2. Симулационен модел на процесите в тактилната матрица

Това налага използването на готов програмен продукт за решаване на диференциални уравнения от този тип ("TUTSIM", "MATLAB" и гр.) за симулация на тези процеси. На базата на уравнения (2 - 7) е разработен симулационния модел с помощта на програмния пакет "TUTSIM" с отчитане особеностите му, представен чрез блок-схемата на фиг. 2. На базата на създадения модел е извършено решение на уравнения (2 - 7).

Някои резултати от моделирането по отношение на амплитудата и времезакъснението на изходния сигнал спрямо възбудителния импулс във функционални сегнетопиезоелектрични тактилни матрици с организация 8x8 и 16x16 чувствителни точки, създадени на НПТ с БОАВ, са показани на фиг. 3 и 4. В модела са заложени параметрите на различни типове керамични сегнетопиезов материали съгласно каталогни материали на фирмите "ПИЕЗОЕЛ"-България, "VERNITRON" - Англия и гр.; разстоянията, на които се регистрира разпространяваната в пиезопластината БОАВ, както и параметрите на възбудителните импулси. Представени са резултатите от моделирането по отношение формата, амплитудата и времезакъсненията на изходния сигнал за различни разстояния възбудителен - генераторен електроид начувствителен елемент на тактилната матрица.

В таблица 1 са показани резултатите от моделирането по отношение на времената на закъснение τ за различните чувствителни точки на моделираните матрици, които са сравнени с резултатите от реално проведен експеримент с конструкция тактилна матрица от паралелно-паралелен тип [3-5].

Таблица 1

РЕЗУЛТАТИ ОТ МАТЕМАТИЧКАТА СИМУЛАЦИЯ							
$I_{B-A, \text{дA}}$	2,00	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00
$\tau_1, \mu\text{s}$	0,625	1,250	1,875	2,5000	3,125	3,750	4,375
ИКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ							
$\tau_1, \mu\text{s}$	0,90	1,20	1,90	2,50	3,50	4,00	4,50
РЕЗУЛТАТИ ОТ МАТЕМАТИЧКАТА СИМУЛАЦИЯ							
$I_{B-A, \text{дA}}$	18,00	20,00	22,00	24,00	26,00	28,00	30,00
$\tau_1, \mu\text{s}$	5,625	6,250	6,875	7,500	8,125	8,750	9,375
ИКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ							
$\tau_1, \mu\text{s}$	5,80	6,40	6,80	7,40	8,00	8,60	9,30

На фиг. 5 са представени възбудителният импулс и изходният информационен сигнал, получен от реален образец тактилна матрица, визуализиран с помощта на осцилоскоп.

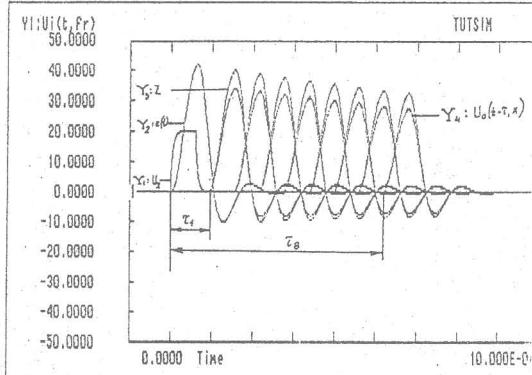
На фиг. 6 са представени върху обща графика резултатите от симулацията, извършена с модел ws11 и въведените във вид на DAT файл данни от осцилоскопа. Получените резултати показват добро съвпадение както по отношение на амплитудата на изходния информационен сигнал, така и по отношение на времезакъсненията му.

TM(5x8) $\ell_{0,r} = (3+7) \text{ mm}$

```

Model File: ws8
Date: 10 / 11 / 1994
Time: 15 : 43
Timing: 10.000E-09 ,DELTA : 10.000E-06 ,RANGE
PlotBlocks and Scales:
Format:
    BlockNo, Plot-Minimum, Plot-Maximum; Comment
Horiz: 0 , 0.0000 , 10.000E-06 ; Time
Y1: 2 , -50.0000 , 50.0000 ; U(t,fr)
Y2: 302 , -10.000E-09 , 10.000E-09 ; Z(t,fr)
Y3: 309 , -10.000E-09 , 10.000E-09 ; U(t-t,x)=z(t-t,x)*exp(-mu*x)
Y4: 311 , -0.50000000 , 0.50000000 ; Uo(t-t,x)

```



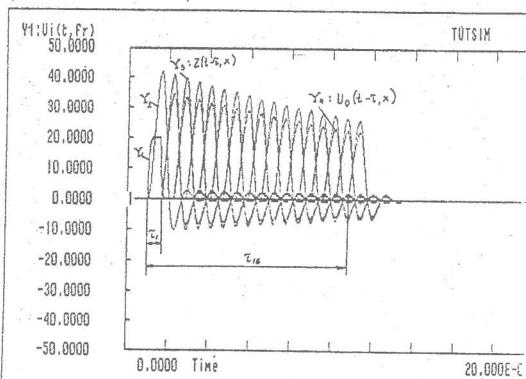
Фиг. 3

TM(16x16) $\ell_{0,r} = 2+32 \text{ mm}$

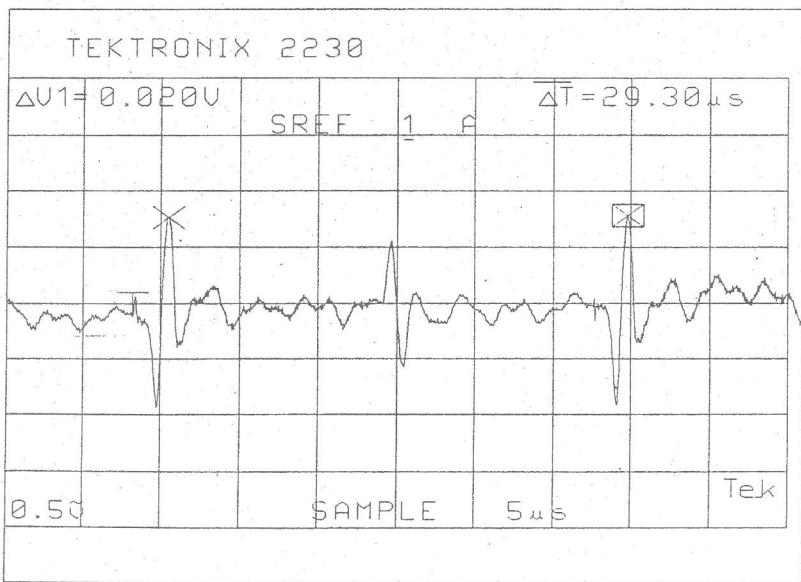
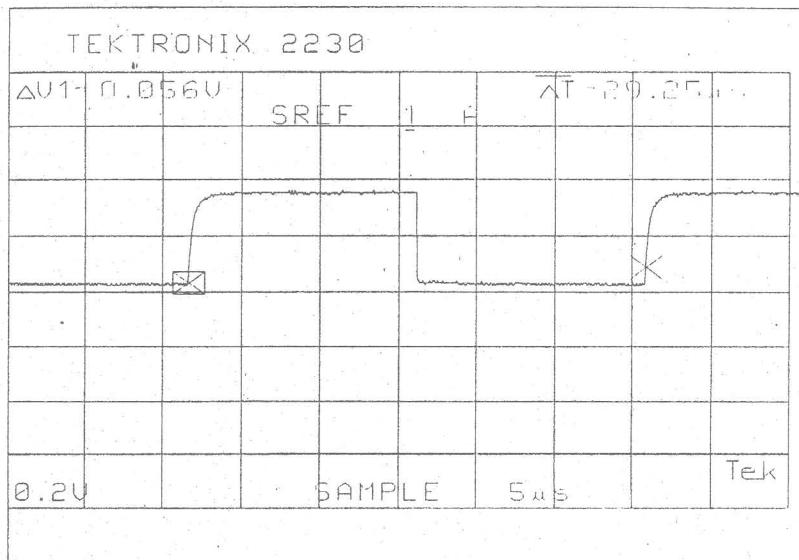
```

Model File: ws8
Date: 10 / 11 / 1994
Time: 15 : 36
Timing: 10.000E-09 ,DELTA : 20.000E-06 ,RANGE
PlotBlocks and Scales:
Format:
    BlockNo, Plot-Minimum, Plot-Maximum; Comment
Horiz: 0 , 0.0000 , 20.000E-06 ; Time
Y1: 2 , -50.0000 , 50.0000 ; U(t,fr)
Y2: 302 , -10.000E-09 , 10.000E-09 ; Z(t,fr)
Y3: 309 , -10.000E-09 , 10.000E-09 ; U(t-t,x)=z(t-t,x)*exp(-mu*x)
Y4: 311 , -0.50000000 , 0.50000000 ; Uo(t-t,x)

```

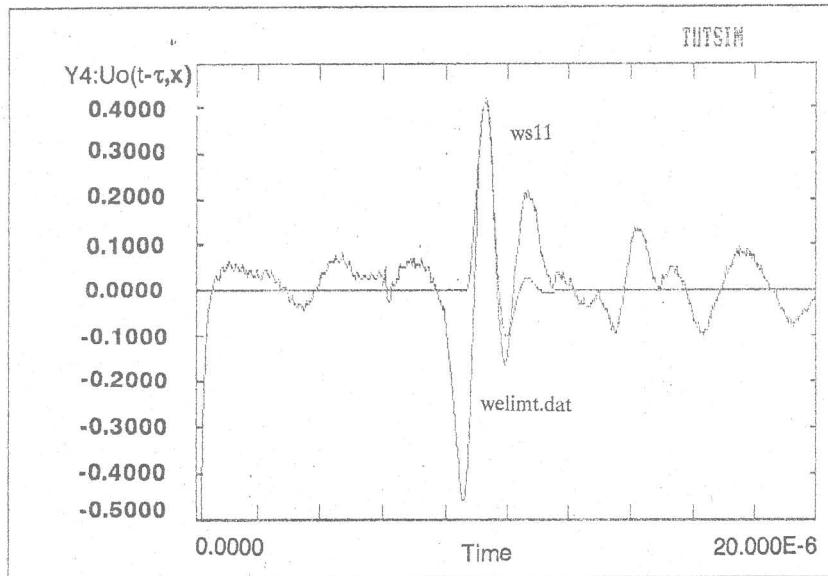


Фиг. 4



Фиг. 5

Model File: ws11
 Date: 11 / 2 / 1996
 Time: 16 : 19
 Timing: 20.000E-09 ,DELTA ; 20.000E-06 ,RANGE
 PlotBlocks and Sectors:
 Format:
 BlockNo, Plot-MINimum, Plot-MAXimum: Comment
 Horz: 0 . 0.0000 , 20.000E-06 : Time
 Y1: 404 , -20.0000 , 30.0000 ; DAF
 Y2: , , ;
 Y3: , , ;
 Y4: 311 , -1.0000 , 1.0000 ; Uo(t-τ,x)



Фиг. 6

З а к л ю ч е н и е

Направеното едномерено физико-математическо описание на електромеханичните процеси на възбудждане, формиране и разпространение БОАВ като носител на тактилна информация в НПГ позволява да се получат достоверни симулационни резултати с помощта на програмен продукт „TUTSIM“, което се потвърждава от проведените експериментални изследвания със реално разработена тактилна матрица.

Разработката е финансирана от Национален фонд „Научни изследвания“ към МОНТ.

Л И Т Е Р А Т У Р А:

1. Todorova V., S.Milchev. *Ferroelectric Tactile Sensor Array. Proceedings of 2nd IFAC Symposium "Intelligent Components and Instruments for Control Application" "SICICA'94", Hungary, Budapest, June 8-10, 1994, pp. 142-145*
2. Голубенко А.В., В.А. Завадский, Ю.П. Згуровский. Электромеханические процессы в перезонансных пьезотрансформаторах с бегущей оболочкой акустической волной. В: Дизлектрическая элементная база и ее применение. Техника, Киев, 1984, с. 16 - 31
- 3.Todorova V.D., S.M. Christov. *A System for Processing of Tactile Information. Proceeding of the Fourth International Symposium on Measurement and Control in Robotics ISMCR'95, Smolensice Castle, Slovakia June 12-16 1995, pp. 81 - 864*
- 4.Todorova V., Milchev S. *Problems of the Primary Processing of Tactile Information from a Ferropiezoelectric Array Sensor. Proceedings of the International Conference on Automation and Informatics, Sofia, Bulgaria, Nov. 7 - 9, 1995, pp. 323 - 327*
5. Todorova V., S. Milchev. *Principles of Primary Processing of Tactile Information depending on the Organization of the Ferropiezoelectric Tactile Array Field. Annual School Lectures of the 18-th International Spring Seminar on Semiconductor and Hybrid Technologies, Vol. 18, No 1, 1995 -1996, Sozopol, Bulgaria, pp. 129 - 131*