

УДК 623.407

**О. Шкодзінський, канд. техн. наук; І. Белякова;  
В. Пісьціо; В. Медвідь, канд. техн. наук**

*Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК П'ЄЗОТРАНСФОРМАТОРА СТРУМУ

*У статті досліджуються експериментальні характеристики п'єзотрансформатора струму, навантаженого на активний опір та люмінесцентну лампу. Наведено найбільш важливі залежності, що характеризують параметри п'єзотрансформатора, від температури середовища, вхідної напруги, частоти вхідної напруги, величини та характеру опору навантаження, коефіцієнта трансформації п'єзотрансформатора в режимі холостого ходу та інших факторів, від яких суттєво залежать параметри п'єзотрансформатора. Запропоновано апроксимацію отриманих залежностей поліномами 3...5 ступеня з метою створення математичної моделі комплекта п'єзотрансформатор – люмінесцентна лампа.*

**O. Shkodzinsky, I. Belyakova, V. Piscio, V. Medvid**

## THE RESEARCH EXPERIMENTAL CHARACTERISTICS OF CURRENT PIEZOTRANSFORMER

*The article explores the characteristics of experimental piezoelectric transformer, loaded on the active resistance or fluorescent lamps. The authors were given the most important dependence that characterize the parameters of piezoelectric transformer, including the parameters depending on the temperature environment, input voltage, frequency input voltage, the load and other factors, depend on the parameters of piezoelectric transformer. The authors proposed pilot dependencies polynomial approximation of the third - the fifth degree in order to create a mathematical model of the complex piezoelectric transformer - fluorescent lamp.*

При побудові нової радіотехнічної апаратури виникає проблема зменшення вартості за рахунок зменшення матеріаломісткості її елементів. Це може бути досягнуто за допомогою використання п'єзоелектричних приладів, в першу чергу, п'єзотрансформаторів. Такі елементи мають компактну і монолітну конструкцію та характеризуються високою надійністю. Для їх виробництва не потрібно унікального обладнання. На основі єдиного технологічного процесу можна забезпечити випуск великих партій п'єзоелементів з різними електричними параметрами.

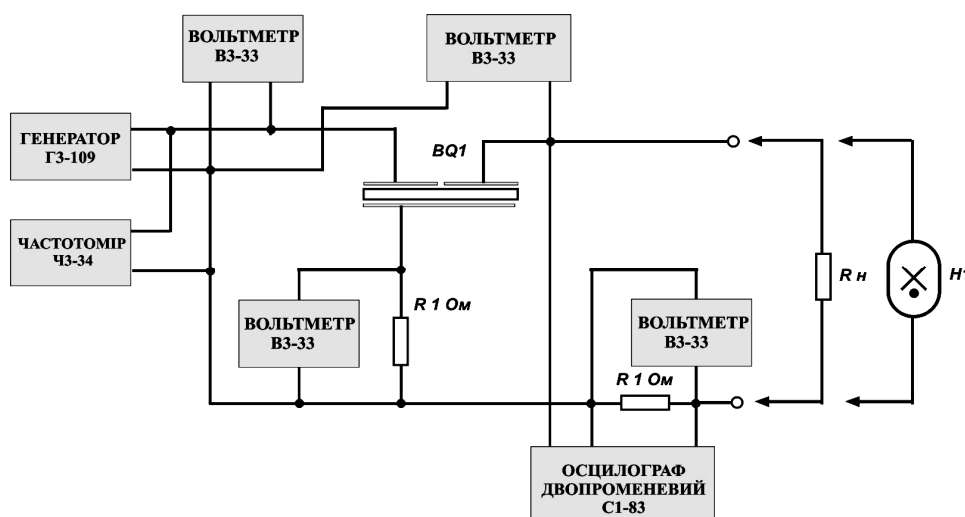


Рисунок 1- Схема вимірювання характеристик ПТ

Метою дослідження є визначення основних характеристик п'єзотрансформатора струму (ПТ) від зовнішніх впливів, такі як опір навантаження, вхідна напруга, частота вхідної напруги, температура середовища та характер навантаження, для створення моделі комплекта ПТ-ЛЛ (люмінесцентна лампа).

Аналіз поданих в [1,2] характеристик ПТ показує, що при дії одного з сильних впливів (вхідного струму) в ПТ має місце дрейф його АЧХ: з різким збільшенням навантаження (режим, близький до короткого замикання) АЧХ ПТ зсувається вліво по частоті  $f_p$ , що зменшує резонансну частоту ПТ приблизно на 5...8% від номінального значення  $f_{p0}$  [3] та зменшує  $U_{вих\ max}$  на резонансній частоті в 20...50 разів в порівнянні з напругою  $U_{вих\ max}$  на частоті  $f_{p0}$ .

При цьому АЧХ ПТ характеризуються при різних струмах навантаження електромеханічною добротністю  $Q_{ем}$ , що зменшується із зростанням  $I_n$ , а АЧХ з вузькорезонансних стають більш широкополосними. Зміна  $Q_{ем}$  відбувається в декілька разів (4...5) при зміні струму в межах зміни навантаження від режиму короткого замикання до режиму холостого ходу.

Зміна амплітуди  $U_{вх}$  для ПТ також викликає деяку зміну  $f_p$ : із збільшенням фактора  $A_{вх}$ , що обчислюється за формулою:  $A_{вх} = U_{вх}/a$ , (де  $a$ - товщина ПТ) резонансна частота ПТ також дещо зменшується.

Значення допустимих впливів на ПТ визначаються допустимими значеннями напруженості з перегрівання та руйнування ПТ, які залежать від  $I_n$ , а також від міцності матеріалу ПТ на стиснення та розтяг. Руйнування ПТ є його характерною особливістю, яка обумовлена виникненням в тілі напружень та деформацій значної для кераміки амплітуди. Крім того, цей процес супроводжується сильним нагріванням ПТ [4,5].

При значних величинах  $A_{вх}$  з'являються нелінійні ефекти. Нелінійність параметрів ПТ є наслідком виходу з лінійної області залежності між тензором напружень, деформацій та векторами діелектричного зміщення і напруженістю електричного поля в матеріалі. Це проявляється, наприклад, в появі вищих гармонік в кривій струму.

Таким чином, параметри ПТ є незмінними лише в слабких електричних полях при незначних навантаженнях.

Для дослідження параметрів ПТ використовувалась схема вимірювань, що показана на рис.1.

До складу схеми входять: ЧЗ-52 – частотомір електронний, ВЗ-48-мілівольтметр, ГЗ-56/1 - генератор сигналів низькочастотний, RIGOL DS-1022C - осцилограф запам'ятовуючий двопробеневий.

Електричні експериментальні характеристики ПТ визначались за наступною методикою:

1. Навантажувальна характеристика ПТ  $U_{вих} = f(I_n)$  при  $U_{вх} = const$  визначалась вимірюванням напруги на навантаженні ПТ при зміні опору навантаження  $R_n$ , в якості якого використовувався магазин опорів МСР-60.
2. Частота вхідної напруги при зміні навантаження підтримувалась вручну рівною частотою механічного резонансу ПТ по максимуму напруги на навантаженні. Вхідна напруга ПТ підтримувалась постійною. Величина  $I_n$  визначалась розрахунковим шляхом як  $U_{вих}/R_n$ .
3. Залежність  $P_{вих} = f(I_n)$  при  $U_{вх} = const$  отримана розрахунковим шляхом за визначеними експериментально значеннями  $U_{вих}$  та  $R_n$  при  $U_{вх} = const$ .

Визначались характеристики п'єзотрансформатора струму з ЦТС-35 поперечно-поперечного типу, який працює на 2-й моді поперечних коливань з частотою 72 кГц, з наступними характеристиками: довжина ПТ  $l = 105$  мм, ширина  $b = 50$  мм, товщина  $a = 2$  мм.

Результати вимірювань характеристик  $U_{\text{вих}} = f(I_{\text{н}})$  при  $A_{\text{вх}} = \text{const}$  подані в табл.1 ( $I_{\text{н ном}} = 360 \text{ мА}$ ,  $U_{\text{н ном}} = 50 \text{ В}$ , що відповідає номінальному значенню напруги та струму ЛЛ TLD 18/54 на частоті 72 кГц).

Результати вимірювань характеристики  $P_{\text{вих}} = f(I_{\text{н}})$  подані в табл.2 ( $P_{\text{вих ном}} = 18 \text{ Вт}$ ). Результати отримані розрахунковим шляхом за експериментальними значеннями  $U_{\text{вих}}$  та  $I_{\text{н}}$  при постійному значенні  $A_{\text{вх}}$  та змінному навантаженні  $R_{\text{н}}$ .

Таблиця 1 - Залежність вихідної напруги п'єзотрансформатора від параметра А

$A_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}/a = 10 \text{ В/мм} = \text{const}$										
$U_{\text{вих}}, \text{В}$	91	64	42	35,3	26,9	23,5	22,4	20,7	20,2	20,1
$I_{\text{н}}, \text{мА}$	65	72	90	100	162	252	360	432	504	576
$A_{\text{вх}} = 12,5 \text{ В/мм} = \text{const}$										
$U_{\text{вих}}, \text{В}$	145,6	134,4	106,4	75,6	42,6	28,6	26,88	25,8	25,2	23,6
$I_{\text{н}}, \text{мА}$	65	72	90	100	162	252	360	432	504	576
$A_{\text{вх}} = 14 \text{ В/мм} = \text{const}$										
$U_{\text{вих}}, \text{В}$	176,4	165,2	126,6	112	42	33,6	32,5	31,4	29,7	29,2
$I_{\text{н}}, \text{мА}$	65	72	90	100	162	252	360	432	504	576
$A_{\text{вх}} = 24 \text{ В/мм} = \text{const}$										
$U_{\text{вих}}, \text{В}$	182	123,2	55,2	52,8	50,0	48,2	45,2	41,5	36,6	33,2
$I_{\text{н}}, \text{мА}$	130	162	252	288	360	432	504	576	720	828
$A_{\text{вх}} = 27 \text{ В/мм} = \text{const}$										
$U_{\text{вих}}, \text{В}$	232	156,8	72,8	65,5	61,6	56	53,8	52,6	45,3	42
$I_{\text{н}}, \text{мА}$	100	162	252	288	360	432	504	576	720	828

Таблиця 2 - Струм навантаження та передавана потужність п'єзотрансформатора

$A_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}/a = 24 \text{ В/мм} = \text{const}$										
$I_{\text{н}}, \text{мА}$	72	100	162	252	288	360	432	576	720	828
$P_{\text{вих}}, \text{Вт}$	28,4	27,9	21	14	14,5	18	19,9	23,4	29,7	31,6

Результати вимірювань характеристики  $U_{\text{вих}} = f(A_{\text{вх}})$  при  $R_{\text{н}} = \text{const} = 180 \text{ Ом}$  подані в табл. 3 ( $U_{\text{вих ном}} = 50 \text{ В}$ ).

Таблиця 3 - Залежність вихідної напруги п'єзотрансформатора від вхідної при опорі навантаження  $R_{\text{н}} = 180 \text{ Ом}$

$A_{\text{вх}}, \text{В/мм}$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
$U_{\text{вих}}, \text{В}$	0	10,1	21	31,3	40,5	50,1	55,2	60,4	66,6	69,6

Експериментальна залежність коефіцієнта трансформації ПТ в режимі холостого ходу ( $R_{\text{н}} = \infty$ )  $K_{\text{ц0}} = f(A_{\text{вх}})$  при  $T_{\text{с}} = 20^{\circ}\text{C}$ , де  $T_{\text{с}}$ - температура середовища, подана в табл. 4.

Таблиця 4 - Зміна коефіцієнта трансформації від параметра А

$T_{\text{с}} = \text{const} = 20^{\circ}\text{C}$										
$A_{\text{вх}}, \text{В/мм}$	0	2,5	5	10	15	20	25	30	35	40
$K_{\text{ц0}}$	0	24,7	24	15,5	11,5	9,6	7,9	7,3	7,1	6,8

Експериментальна залежність коефіцієнта корисної дії ПТ від струму навантаження  $\eta = f(I_{\text{н}})$  при фіксованих значеннях вхідної напруженості електричного поля  $A_{\text{вх}}$  подана в табл. 5.

Таблиця 5 - Коефіцієнт корисної дії п'єзотрансформатора від струму та напруги

$A_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}/a = 15 \text{ В/мм} = \text{const}$										
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

$I_H, \text{мА}$	145	180	215	290	325	360	430	505	575	650
$\eta$	0,41	0,59	0,68	0,76	0,86	0,89	0,87	0,83	0,77	0,72
$A_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}/a = 20 \text{ В/мм} = \text{const}$										
$I_H, \text{мА}$	145	180	215	290	325	360	430	505	575	650
$\eta$	0,33	0,52	0,63	0,73	0,84	0,87	0,86	0,82	0,74	0,67
$A_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}/a = 24 \text{ В/мм} = \text{const}$										
$I_H, \text{мА}$	145	180	215	290	325	360	430	505	575	650
$\eta$	0,32	0,51	0,61	0,70	0,82	0,83	0,82	0,78	0,71	0,62

Залежність струму навантаження від частоти вхідної напруги  $I_H = f(f_p)$  при фіксованих значеннях вхідної напруженості електричного поля  $A_{\text{вх}}$  подана в табл. 6.

Таблиця 6 - Залежність струму від частоти вхідної напруги п'єзотрансформатора

$A_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}/a = 24 \text{ В/мм} = \text{const}$										
$f_p, \text{кГц}$	71,64	71,78	71,86	71,93	72	72,22	72,36	72,50	72,65	72,79
$I_H, \text{мА}$	576	504	468	396	360	326	285	218	191	166

Температурна залежність діелектричної проникності п'єзоматеріалів  $\epsilon_{33}^T = f(T_p)$  представлена в табл. 7.

Таблиця 7 - Температурна залежність діелектричної проникності п'єзоматеріалів

ЦТС-35										
$T_p, ^\circ\text{C}$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\epsilon_{33}^T \cdot 10^9 \text{ Ф/м}$	8,83	8,85	8,88	8,91	9,12	9,56	10,00	10,62	10,97	12,05
ЦТС-24										
$T_p, ^\circ\text{C}$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\epsilon_{33}^T \cdot 10^9 \text{ Ф/м}$	10,10	10,15	10,17	10,25	10,88	11,37	12,18	12,90	13,91	14,72
ЦТБС-3										
$T_p, ^\circ\text{C}$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\epsilon_{33}^T \cdot 10^9 \text{ Ф/м}$	7,02	7,12	7,33	7,84	8,54	9,28	10,51	11,46	13,03	15,08

Для апроксимації отриманих характеристик використовуємо прикладну програму Arpro.exe, яка призначена для пошуку функціональної залежності довільних початкових даних методом розрахунку коефіцієнтів полінома другого – п'ятого ступеня:

$$f(x) = A + Bx + Cx^2 + Dx^3 + Ex^4 + Fx^5.$$

Характеристика  $P_{\text{вих}} = f(I_H)$  за вхідними даними з табл. 3, побудована за допомогою програми з використанням полінома третього ступеня, має вигляд (рис. 2).

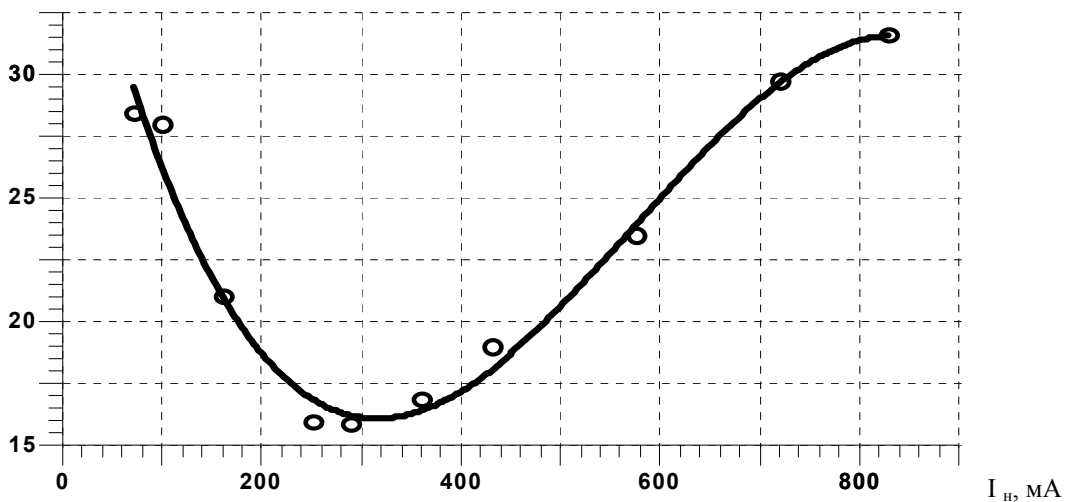


Рисунок 2- Залежність вихідної потужності  $P_{\text{вих}}$  від струму навантаження  $f(I_n)$  при  $A_{\text{вх}} = 24 \text{ В/мм}$

Коефіцієнти полінома:

A: 40,2236; B: -0,175334; C: 0,000383392; D: -2,22552  $10^{-7}$ ; E: 0; F: 0 (Вт).

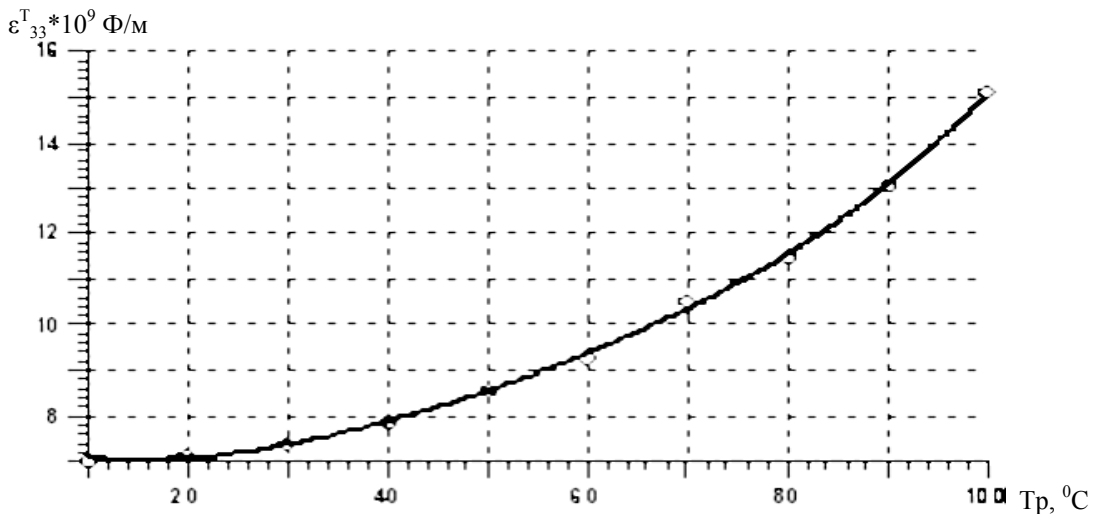


Рисунок 3- Температурна залежність діелектричної проникності  $\epsilon_{33}^T = f(T_p)$  п'єзоматеріалів ЦТС-35 (1), ЦТС-24 (2), ЦТБС-3 (3)

Характеристика  $\epsilon_{33}^T = f(T_p)$  за вхідними даними з табл. 7, побудована з апроксимацією поліномом четвертого ступеня, має вигляд (рис.3), а коефіцієнти поліномів подані в табл. 8.

Таблиця 8 - Коефіцієнти поліноміальної апроксимації температурної залежності діелектричної проникності п'єзоматеріалів

Матеріал	A	B	C	D	E	F
ЦТС-35	9,03917	-0,0240071	$6.47886 \cdot 10^{-4}$	$-2,98463 \cdot 10^{-6}$	$1,85022 \cdot 10^{-8}$	0
ЦТС-24	10,1917	-0,0051791	$-3.26275 \cdot 10^{-4}$	$1,84498 \cdot 10^{-5}$	$-1,01398 \cdot 10^{-7}$	0
ЦТБС-3	7,47667	-0,069695	0,002976694	$-3,10684 \cdot 10^{-5}$	$1,58508 \cdot 10^{-7}$	0

Залежність коефіцієнта трансформації ПТ в режимі холостого ходу ( $R_n = \infty$ )  $K_{u0} = f(A_{\text{вх}})$  при  $T_c = 20^\circ\text{C}$ , побудована за даними табл. 4. з апроксимацією поліномом третього ступеня має вигляд (рис.4.).

При цьому отримані такі коефіцієнти апроксимуючого полінома:

A: 30,2361; B: -1,87666; C: 0,0509886; D: -0,000466584; E: 0; F: 0.

Залежність  $U_{\text{вих}} = f(A_{\text{вх}})$  при  $R_n = 180 \text{ Ом}$ , експериментальні дані для якої подані в табл. 3, побудована з апроксимацією поліномом третього ступеня, має вигляд (рис.5.)

Коефіцієнти полінома для цього випадку:

A: -1,71349; B: 2,51321; C: -0,0190577; D: -3,50171E-5; E: 0; F: 0.

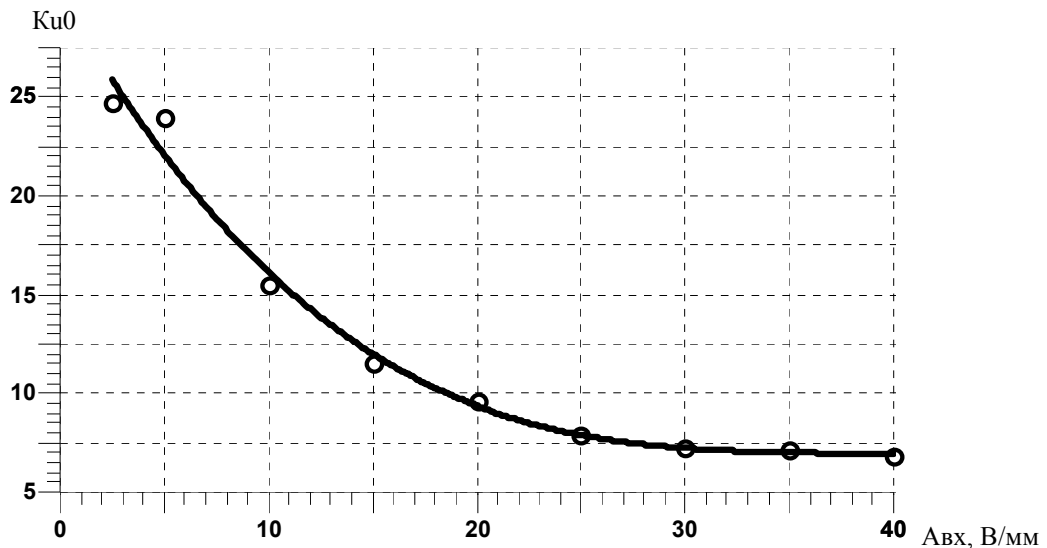


Рисунок 4 - Залежність коефіцієнта трансформації ПТ в режимі холостого ходу ( $R_n = \infty$ )  $K_{u0} = f(A_{вх})$

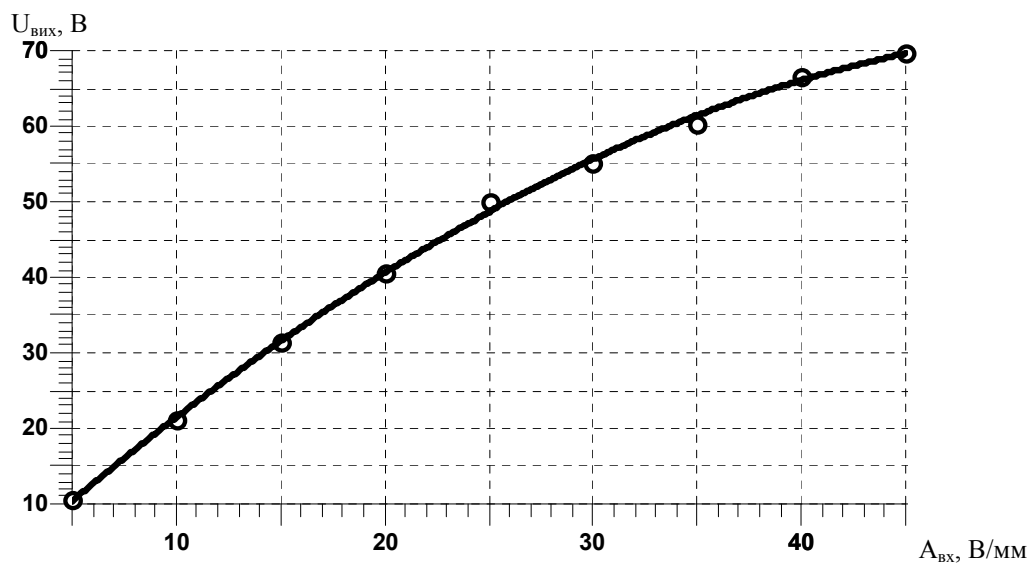


Рисунок 5 - Залежність  $U_{вих} = f(A_{вх})$  при  $R_n = 180 \text{ Ом}$

**Висновок.** Отже, отримано основні експериментальні характеристики, що з достатньою точністю можуть бути апроксимовані поліномами не вище 5 ступеня, з метою побудови математичної моделі комплекта п'єзотрансформатор струму - люмінісцентна лампа для конструктивного розрахунку напівпровідникових пускорегулюючих апаратів, сконструйованих на базі п'єзоелектричного трансформатора.

#### Література

1. О работе пьезотрансформатора с люминесцентной лампой. А.Т.Булгаков, М.Е.Клыков, В.Р.Медвидь, Н.Г.Тарасенко, Р.Х.Хафизов, В.А.Шевченко // Светотехника.1987. - №2. - С.20-21.
2. Перспективы применения сегнетокерамики в светотехнике. А.Т.Булгаков, Р.Х.Хафизов, В.Р.Медвидь, М.Е.Клыков, Н.Г.Тарасенко / Тезисы докладов 9-ой Всесоюзной научно-технической конференции по светотехнике „Задачи светотехнической науки в повышении эффективности освещения и развития светотехнического производства”. - Рига.10-12 ноября 1987. - С.20-28.
3. В.Р.Медвидь, Н.Г.Тарасенко. Расчет пьезотрансформатора для стабилизации разряда в люминесцентных лампах // Светотехника, 1987. - №12. - С.11-14.
4. Ерофеев А.А. Пьезоэлектронные устройства автоматики. - Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1982.-212 с.
5. Р.Х.Хафизов, А.Т.Булгаков, В.Р.Медвидь. Светотехника – новая область применения сегнетокерамики /Тезисы докладов 3-ей Всесоюзной конференции „Актуальные проблемы получения и применения сегнето- и пьезокерамических материалов и их роль в ускорении научно-технического прогресса”. - М.: Изд.МДИТП им. Ф.Э.Дзержинского, 1987. - С.139-144.

Одержано 15.05.2008 р.