

А.И. Ивон, В.Ф. Истушкин, Р.И. Лавров

**КОМПЬЮТЕРНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ПРИ  
ОПРЕДЕЛЕНИИ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО  
СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗЕРНА В ВАРИСТОРНЫХ  
МАТЕРИАЛАХ**

*Аннотация. Для осциллографического способа определения удельного электрического сопротивления зерна в варисторных материалах разработана методика обработки данных с помощью программы Microsoft Office Excel. Созданы шаблоны для Microsoft Excel, предназначенные для расчета  $\rho_g$  и температуры перегрева образца варистора при воздействии импульса напряжения по данным сканирования растровых изображений осциллограмм.*

**Введение.** Важным параметром, определяющим эксплуатационные характеристики варисторов в области сильного электрического тока, является удельное электрическое сопротивление зерна варисторной керамики  $\rho_g$  [1]. В работе [2] предложен осциллографический метод определения  $\rho_g$ , использующий одиночный экспоненциальный импульс напряжения. Поскольку метод основан на концепции дифференциального сопротивления, для корректной его реализации требуется высокая точность определения мгновенных значений напряжения по осциллограммам. Ранее было показано [3], что при сканировании растровых изображений аналоговых осциллограмм с помощью графического редактора Adobe Photoshop или специально разработанной для этой цели программы, можно обеспечить точность определения мгновенных значений напряжения с относительной погрешностью не превышающей  $\pm 1,5\%$ .

При определении удельного электрического сопротивления зерна варисторной керамики значительный объем данных, полученных при сканировании осциллограмм, требует больших затрат времени на их обработку. Существенно упростить обработку данных и снизить затраты времени позволяет программа для работы с электронными таблицами Microsoft Office Excel.

---

© Ивон А.И., Истушкин В.Ф., Лавров Р.И., 2015

**Постановка задачи.** Целью работы является создание методики обработки в Microsoft Excel данных при определении удельного сопротивления зерна варисторной керамике и разработка шаблонов таблиц для этой методики.

**Основная часть.** Метод, предложенный в работе [2], основан на использовании зависимости удельного дифференциального сопротивления  $\rho_{dif}$  варисторной керамики от плотности тока  $J$ , которая описывается выражением:

$$\rho_{dif} = \rho_g + A^* J^{-1}, \quad (1)$$

где  $A^*$  – постоянная величина.

Согласно (1) имеет место линейная зависимость между дифференциальным сопротивлением варисторной керамики, найденным по вольтамперной характеристике (ВАХ), и обратной величиной плотности электрического тока. Поэтому, построив по участку ВАХ зависимость  $\rho_{dif} = f(J^{-1})$  и линейно экстраполировав ее к  $J^{-1} = 0$  можно найти удельное сопротивление зерна  $\rho_g$ .

Для получения участка ВАХ образца варисторной керамики в области сильного электрического тока метод использует одиночный экспоненциальный импульс напряжения

$$U(t) = U_0 \exp(-t/\tau), \quad (2)$$

где  $U_0$  – амплитуда импульса,  $t$  – время,  $\tau$  – постоянная времени.

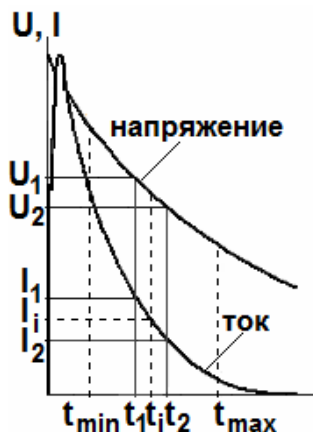


Рисунок 1 – Схематическое изображение осциллограмм напряжения и тока

На рис.1 схематически показаны осциллограммы напряжения и тока, регистрируемые с помощью запоминающего двулучевого осциллографа. Осциллограмма тока регистрируется, как падение напряжения на прецизионном резисторе  $R_T = 1$  Ом, включенном последовательно с образцом. Осциллограммы на рис. 1 представляют ВАХ образца варистора, которая задана в параметрическом виде, где параметром является время. Для определения удельного сопротивления зерна выбирают участки осциллограмм, лежащие в интервале времени

$t_{min} \leq t \leq t_{max}$ . Эти участки используют для построения зависимости (1). Участки разбивают на одинаковые интервалы времени  $\Delta t = t_2 - t_1$ , соответствующие моментам времени  $t_i = (t_2 + t_1)/2$ . Для этих

моментов времени находят значения тока  $I_i$  и дифференциального сопротивления  $R_{dif}$ , используя формулы:

$$I_i = (I_1 + I_2)/2, \quad (3)$$

$$R_{dif} = (U_1 - U_2)/(I_1 - I_2). \quad (4)$$

На основании известных значений площади  $S$  и толщины образца  $L$ , значения  $R_{dif}$  и  $I_i$  приводятся к удельным величинам  $\rho_{dif}$  и  $J$ , строится зависимость (1) и путем линейной экстраполяции к  $J^{-1} = 0$  определяется значение  $\rho_g$ .

Для получения растровых изображений аналоговых осциллограмм применяют цифровую фотокамеру. Полученные таким образом графические файлы, позволяют извлечь необходимую информацию, с помощью Adobe Photoshop или специальной программы для сканирования растровых изображений [3].

Результатом сканирования являются координаты точек растрового изображения осциллограмм, по которым можно найти значения напряжения в этих точках, используя предварительно определенный масштаб напряжения [3]. Погрешность в этом случае не превышает  $\pm 1,5\%$ . При сканировании участка осциллограммы регистрируется массив значений координат в пикселях (координата по горизонтали – время  $t_i$ , по вертикали – напряжение  $U_i$  или ток  $I_i$ ). Этот массив может быть обработан с помощью программы Microsoft Excel для построения зависимости  $\rho_{dif} = dE/dJ = (dU/dI)(S/L)$  от обратной плотности тока  $J^{-1}$ . В этом случае удобно использовать предварительно созданные в Microsoft Excel шаблоны. Пример такого шаблона показан на рис. 2.

Массив сканированных данных для ввода в шаблон представляется как двумерная матрица из 10 строк и 6 столбцов. На рис. 2 столбцы этой матрицы обозначены как  $t_1, I_1, U_1, t_2, I_2, U_2$ . В столбцах шаблона  $J, 1/J, dE/dJ, R_{дин}, R_{ст}, betta$  применяются формулы, обеспечивающие расчет  $J, 1/J, \rho_{dif} = dE/dJ$ , динамического и статического сопротивлений  $R_{дин} = (U_1 - U_2)/(I_1 - I_2), R_{ст} = (U_1 + U_2)/(I_1 + I_2)$ , а также коэффициента нелинейности варистора  $betta = R_{ст}/R_{дин}$ . По данным столбцов шаблона  $1/J, dE/dJ$  в Microsoft Excel строится зависимость (1). При построении этой зависимости используется опция «Добавить линию тренда», которая обеспечивает проведение прямой линии через полученные расчетные точки методом наименьших квадратов. Эта линия нужна для выполнения линейной экстраполяции при определении значения  $\rho_g$ .

Вид окна программы Microsoft Excel после построения зависимости (1) показан на рис. 3. Выбрав на прямой линии две точки с координатами  $\rho_{1dif}$ ,  $1/J_1$  и  $\rho_{2dif}$ ,  $1/J_2$ , можно выполнить расчет  $\rho_g$  по формуле:

$$\rho_g = \rho_{1dif} - 1/J_1 \cdot \frac{\rho_{1dif} - \rho_{2dif}}{1/J_1 - 1/J_2}. \quad (5)$$

Эта формула для шаблона, показанного на рис. 3, применяется в ячейке, которую предваряет надпись «Расчет удельного электрического сопротивления зерна». После подстановки в формулу указанных выше координат, Microsoft Excel обеспечивает вывод в ячейку значения удельного сопротивления зерна  $\rho_g$ .

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O		
1	t1	i1	U1	t2	i2	U2	J, A cm-2	1/J	dE/dJ, Ом см	Rдин, Ом	Rст, Ом	beta					
2	1300	1186	195	1600	1389	272	63,7	0,016	2,978	10,4	99,6	9,6					
3	1350	1225	206	1650	1414	283	57,8	0,017	3,220	11,3	108,4	9,6					
4	1400	1265	220	1700	1437	296	51,9	0,019	3,516	12,3	119,2	9,7					
5	1450	1301	234	1750	1461	311	46,4	0,022	3,855	13,5	130,9	9,7					
6	1500	1331	247	1800	1479	324	42,0	0,024	4,191	14,7	142,8	9,7					
7	1550	1361	260	1850	1496	337	37,6	0,027	4,622	16,2	157,3	9,7					
8	1600	1389	272	1900	1513	350	33,5	0,03	5,127	17,9	174,0	9,7					
9	1650	1414	283	1950	1528	362	29,8	0,034	5,677	19,9	192,6	9,7					
10	1700	1437	296	2000	1539	374	26,6	0,038	6,295	22,0	213,4	9,7					
11	1750	1461	311	2050	1550	387	23,4	0,043	7,062	24,7	240,9	9,7					
12							Rст = Rt*(Mu*(U1-U2)/(Mi*(i2-i1))-1)										
13							Rдин = (dE/dJ)*L/S L - толщина образца; S - площадь электродов										
14							beta = Rст/Rдин										
15							Rt - величина сопротивления токового резистора (Rt = 1 Ом)										
16							Для масштаба напряжения				Для масштаба тока						
17							2000	1229	пикселей			1700	1501	пикселей			
18							2000	423	пикселей			1700	288	пикселей			
19							Масштаб напряжения =				0,12407 В/пиксель						
20							Масштаб тока =				0,004122 А/пиксель						
21							1632										
22							1690										
23							1632 Нуль тока =				1632 пикселей						
24							1679 Нуль напряжения =				1685 пикселей						
25							Масштаб времени =				0,02353 мкс/пиксель						
26							1310				684						
27							2160				684						
28							Начало отсчета времени =				525 пикселей						
29							Измерительный интервал времени =				17,6 мкс						
30							Время до начала измерительного интервала =				18 мкс						

Рисунок 2 – Шаблон Microsoft Excel для обработки массива данных, полученного после сканирования растровых изображений осциллограмм напряжения и тока

В настоящей работе сканирование растровых изображений осциллограмм, для получения исходного массива данных, выполнялось

с шагом 25 пикселей по оси времени (интервал времени 3 мкс). Для расчета дифференциального сопротивления образца  $\Delta U/\Delta I = (U_1 - U_2)/(I_1 - I_2)$  использовались отсчеты напряжения и тока, отстоящие друг от друга на интервал 75 пикселей по оси времени.

Измерительный импульс напряжения вызывает разогрев образца варисторной керамики. Температуру перегрева  $\Delta T$  в любой момент времени  $t$  можно найти по растровым изображениям осциллограмм напряжения и тока. Их сканирование, начиная с момента подачи импульса, с заданным по времени шагом  $\Delta t = t_i - t_{i+1}$  позволяет получить массивы напряжения  $U(t_i)$ ,  $U(t_{i+1})$  и тока  $I(t_i)$ ,  $I(t_{i+1})$ .

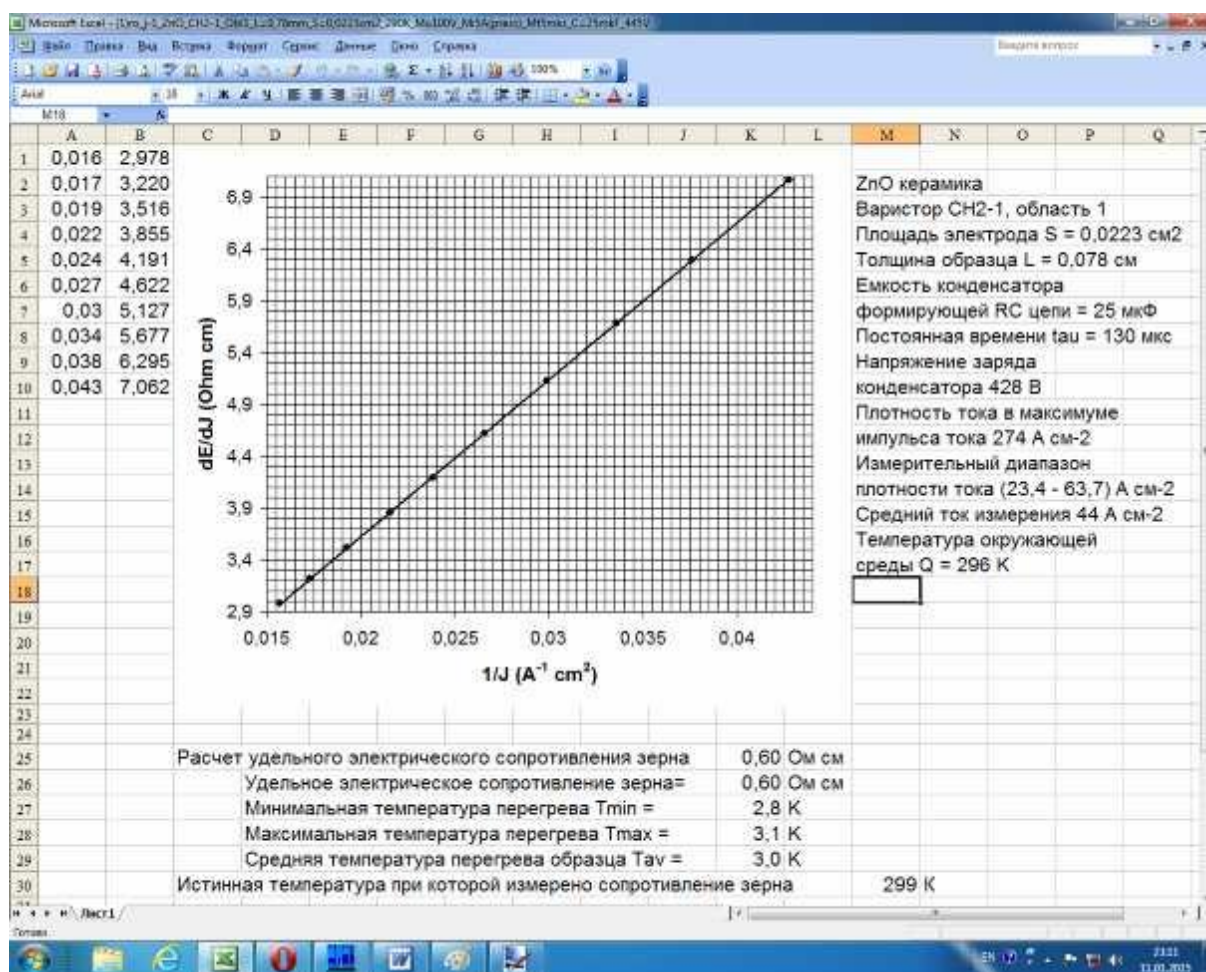


Рисунок 3 – Шаблон Microsoft Excel для построения зависимости

$$\rho_{dif} = f(J^{-1}).$$

Построение выполнено по данным, представленным на рис. 2

Эти массивы позволяют рассчитать температуру перегрева образца, если учесть, что за время действия импульса заметного рассеивания тепла не происходит, поскольку постоянная времени импульсов напряжения, используемых для измерения  $\rho_g$  мала (не более

350 мкс). В этом случае вся мощность, выделяемая электрическим током, идет на нагрев образца. Тогда, если мгновенный ток и напряжение имеют значения  $I(t)$  и  $U(t)$ , то за бесконечно малый интервал времени  $dt$  в образце выделится энергия  $dW(t) = U(t)I(t)dt$ , которая приведет к увеличению его температуры на величину, определяемую соотношением:

$$d\Delta T(t) = \frac{U(t)I(t)dt}{c_T d_m SL}, \quad (6)$$

где  $c_T$  и  $d_m$  удельная теплоемкость и плотность варисторной керамики;  $S$ ,  $L$  – площадь и толщина образца, соответственно.

Выполнив интегрирование (6) по времени можно найти температуру перегрева образца  $\Delta T(t)$  в момент времени  $t$ :

$$T(t) = \frac{1}{c_T d_m SL} \int_0^t U(t)I(t)dt. \quad (7)$$

Интеграл в соотношении (7) вычисляется методом трапеций, используя массивы напряжения  $U(t_i)$ ,  $U(t_{i+1})$  и тока  $I(t_i)$ ,  $I(t_{i+1})$ . Расчетное соотношение для температуры перегрева  $\Delta T$  в момент времени  $t$  в этом случае имеет вид:

$$\Delta T(t) = \frac{1}{2c_T d_m SL} \sum_{i=1}^N (U(t_{i+1})I(t_{i+1}) + U(t_i)I(t_i))(t_{i+1} - t_i), \quad (8)$$

где  $N = t/\Delta t$ ,  $\Delta t = t_{i+1} - t_i = \text{const}$ .

Для получения массивов  $U(t_i)$ ,  $U(t_{i+1})$ ,  $I(t_i)$ ,  $I(t_{i+1})$  сканирование было выполнено с шагом 25 пикселей. Обработка проводилась в Microsoft Excel с использованием опции меню «сумма»  $\Sigma$  для вычисления суммы в выражении (8). Вид шаблона для вычисления температуры перегрева показан на рис. 4.

Массивы сканированных данных в пикселях для времени, тока и напряжения вводятся в столбцы шаблона  $t_i$ ,  $I_i$  и  $U_i$ , соответственно. В столбцах шаблона  $t_i$ ,  $P_i$ ,  $dT_i$  применяются формулы, которые по масштабам и элементам массивов  $t_i$ ,  $I_i$  и  $U_i$  вычисляют мгновенные значение времени  $t_i$ , мощности  $P_i = U(t_i)I(t_i)$  и приращения температуры  $dT_i = (U(t_i)I(t_i) + U(t_{i+1})I(t_{i+1}))(t_{i+1} - t_i)/(2c_T d_m SL)$ .

Для вычисления температуры перегрева образца  $\Delta T(t_{i+1})$  в момент времени  $t_{i+1}$  с начала подачи импульса напряжения, из столбца шаблона  $dT_i$  копируется подгруппа значений вплоть до момента времени  $t_{i+1}$ . К этой подгруппе применяется опция меню «сумма»  $\Sigma$ . Вы-

полняется суммирование приращений температуры, дающее искомое значение  $\Delta T(t_{i+1})$ . На рис. 4 максимальная температура перегрева образца варистора при измерении  $\rho_g$ , получена суммированием всех значений столбца  $dT_i$ . Эту температуру можно видеть после строки текста «Максимальная температура перегрева =».

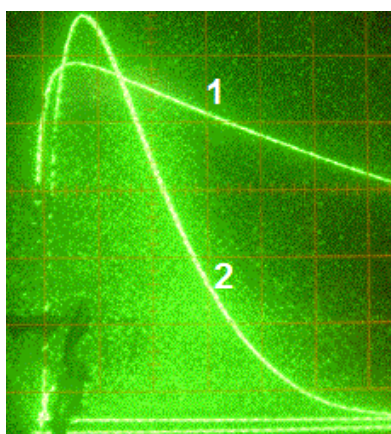
	A	B	C	D	E	F		
1	t <sub>i</sub>	i <sub>i</sub>	U <sub>i</sub>	t <sub>i</sub> , c	P <sub>i</sub> , Вт	dT <sub>i</sub> , K		
2	775	1620	1690	0	0			
3	800	1111	205	5,9382E-07	679,7	0,042	Масштаб напряжения = 0,140252454 В/пиксель	
4	825	97	209	1,1876E-06	1960	0,163	Масштаб тока = 0,00664452 А/пиксель	
5	850	115	214	1,7815E-06	1931	0,24	Масштаб времени = 2,34741784E-08 с/пиксель	
6	900	236	221	2,9691E-06	1774	0,456	Для масштаба времени	
7	950	370	229	4,1566E-06	1600	0,416	1320 699	
8	1000	485	234	5,3444E-06	1454	0,376	2172 699	
9	1050	573	240	6,5321E-06	1339	0,344		
10	1100	650	246	7,7197E-06	1238	0,317	Окружающая температура Q = 288 K	
11	1150	707	254	8,9074E-06	1161	0,296	Удельная теплоемкость = 0,496 Дж г-1 К-1	
12	1200	778	261	1,0095E-05	1068	0,275	Плотность = 5,6 г см-3	
13	1250	848	271	1,1283E-05	974,4	0,252	Толщина образца = 0,078 см	
14	1300	904	280	1,247E-05	899,5	0,231	Площадь электродов = 0,0223 см2	
15	1350	959	291	1,3658E-05	825,2	0,212	Напряжение заряда конденсатора = 435 В	
16	1400	1010	300	1,4846E-05	757,8	0,195	Постоянная времени экспоненциального импульса = 130 мкс	
17	1450	1059	312	1,6033E-05	691,9	0,179		
18	1500	1099	325	1,7221E-05	637,2	0,164		
19	1550	1138	336	1,8409E-05	585,4	0,151		
20	1600	1177	348	1,9596E-05	533,8	0,138		
21	1650	1213	359	2,0784E-05	486,9	0,126		
22	1700	1248	372	2,1971E-05	441,1	0,114		
23	1750	1281	384	2,3159E-05	398,7	0,103		
24	1800	1306	395	2,4347E-05	366,4	0,094		
25	1850	1333	405	2,5534E-05	332,6	0,086		
26	1900	1359	416	2,6722E-05	300,1	0,078		
27	1950	1383	426	2,791E-05	270,5	0,07		
28	2000	1406	438	2,9097E-05	242,1	0,063		
29	2050	1427	449	3,0285E-05	216,5	0,056		
30	2100	1446	461	3,1473E-05	193,4	0,05		
31	2150	1464	471	3,266E-05	172,1	0,045		
32	2200	1479	481	3,3848E-05	154,3	0,04		
33	Максимальная температура перегрева =						5,4 K	

Рисунок 4 – Шаблон для вычисления температуры перегрева образца варистора

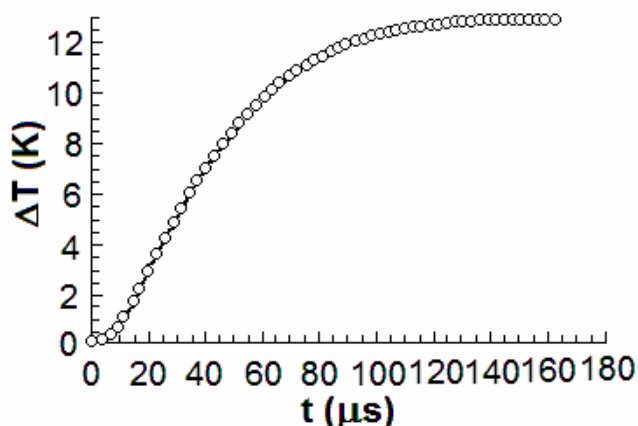
Копируя разные подгруппы значений в массиве  $dT_i$  и, применяя к ним опцию «сумма»  $\Sigma$ , можно построить временную зависимость температуры перегрева образца варисторной керамики, начиная с момента подачи импульса напряжения. Такая зависимость для образца варистора СН2-1 показана на рис. 5,б.

Как можно видеть на рис. 5,б наиболее сильно температура перегрева  $\Delta T$  изменяется в интервале времени близком к началу подачи импульса напряжения (начало отсчета времени  $t = 0$ ). Со временем темп изменения  $\Delta T$  уменьшается и температура перегрева выходит на

постоянное значение, соответствующее максимальному перегреву образца варистора импульсом напряжения.



а



б

Рисунок 5 – Растровое изображение осциллограмм – а (1 – напряжение, 2 – ток) и построенная по ним зависимость температуры перегрева образца варистора СН2-1 от времени – б. Масштабы: время – 0,1163 мкс/пиксель; напряжение – 0,1395 В/пиксель; ток – 0,0034 А/пиксель. Геометрия образца:  $L = 0,78$  мм,  $S = 0,0231$  см<sup>2</sup>. Постоянная времени экспоненциального импульса напряжения  $\tau = 340$  мкс. Температура окружающей среды 297 К.

**Выводы.** Созданы шаблоны для программы Microsoft Office Excel, позволяющие упростить и ускорить процесс обработки данных, полученных путем сканирования растровых изображений осциллограмм аналоговых осциллографов. Шаблоны предназначены для использования в осциллографическом методе определения удельного электрического сопротивления зерна в варисторных материалах. Показана возможность определения по осциллограммам температуры перегрева образца варистора при воздействии импульса напряжения. Разработан шаблон Microsoft Excel для расчета температуры перегрева.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Gupta T. K. Application of zinc oxide varistors [Text] / T. K. Gupta // J. Am. Ceram. Soc., 1990. – V. 73(7). – P. 1817-1840.
2. Ivon A.I. High-current measurement of the grain resistivity in zinc oxide varistor ceramics [Text] / A.I. Ivon, R.I. Lavrov, A.B. Glot. // Ceram. Int., 2013. – V. 39. – P. 6441–6447.
3. Ivon A.I. Application of bitmaps for increasing data processing accuracy in physical experiment [Text] / A.I. Ivon, Y.A. Ivon, R.I. Lavrov // System technologies: coll. articles. – Dnepropetrovsk, 2014. – Issue 1 (90). – P. 10 – 17.