

# МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПОЛУЧЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО УЧАСТКА СТАТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТОУПРУГОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Чичикало Н.И.

Донецкий государственный технический университет

*In clause the methods and means ensuring reception of a more extended linear site of the target characteristic magnitostrctions of the converter of force in a convenient electrical signal are considered. The received means for lining of the characteristics  $\dot{I}SD$  have passed numerous approbation, do not contain active elements, are simply from the point of view of the basic decisions and, that most important, provide reception nominal(graduating) of the characteristics insignificantly varied in real conditions of operation, that provides staying of the entry conditions at definition of uncontrollable weight of object.*

Магнитоупругие преобразователи (МУП), как технические средства измерений для контроля нагрузок, создаваемых сыпучей массой, находящейся в накопителях, или силой, приложенной к узлам машин и механизмов, характеризуются совокупностью ферромагнитных свойств материала, выраженной теорией анизотропии ферромагнитных кристаллов, теорией кривых намагничивания и петли гистерезиса, теорией четных эффектов и теорией температурной зависимости ферромагнитных явлений. Однако для практической реализации нашли применение лишь явления магнитострикции и магнитоупругие.

При выборе чувствительного элемента (ЧЭ) на базе МУП для датчиков нагрузки, в том числе искробезопасных (ДНИ) ставится задача получения идентичности статистических характеристик при максимальном расширении линейного диапазона выходной характеристики с минимальным количеством типоразмеров. В качестве образцов для испытаний приняты:

1. Торроидальный ЧЭ, представляющий собой сердечник типа АРБ-400 (96x52x50), на котором расположены под углом  $90^\circ$  четыре измерительные элемента, каждый из которых состоит из двух взаимоперпендикулярных обмоток, причем, обмотка намагничивания двух из них расположена параллельно основанию сердечника, а двух других под углом  $45^\circ$  к нему. Сверление всех обмоток выполнено на центр. Число витков каждого измерительного элемента равно:  $W_{11}/W_{21} = 200/200$ ;  $W_{12}/W_{22} = 100/160$ ;  $W_{13}/W_{23} = 150/150$ ;  $W_{14}/W_{24} = 100/325$ .

2. Торроидальный ЧЭ типа АРБ-400 с тремя измерительными элементами, расположенными под углом  $120^\circ$  по отношению друг к другу. Угол сверления обмоток на центр выполнен так, что  $\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3$ . Число витков каждой обмотки:  $W_1/W_2 = 100/200$ .

3. Торроидальный ЧЭ типа АРБ-400 с четырьмя измерительными элементами. Все отверстия каждого выполнены параллельно друг другу, с одинаковым числом витков обмоток:  $W_1/W_2 = 200/400$ .

4. Подковообразный ЧЭ, представляющий собой сердечник с двумя измерительными элементами, расположенными на его концах, каждый из которых содержит две скрещенные обмотки, расположенные под углом  $45^\circ$  к основанию сердечника,  $W_1/W_2 = 100/200$ .

5. ЧЭ кубической формы (90x90x90) со скрещенными обмотками с числом витков:  $W_1/W_2 = 100/200$ .

6. ЧЭ кубической формы (60x60x60) со скрещенными обмотками с числом витков:  $W_1/W_2 = 100/200$ .

7. ЧЭ кубической формы (90x90x90) с тремя обмотками с числом витков:  $W_1/W_2/W_3 = 100/200/200$ .

8. ЧЭ кубической формы (60x60x60) с тремя обмотками с числом витков:  $W_1/W_2/W_3 = 100/200/200$ .

Испытательная аппаратура для исследования ЧЭ включает: пресс типа Р - 50 № 235, ГОСТ 7855-74, осциллограф С1-73, звуковой генератор ГЗ-118, цифровые вольтметры В716 и В727, мост RLC Е-7-11.

План экспериментальных исследований предусматривает:

1. Исследование образцов с целью уточнения допустимого значения механического напряжения ( $\sigma_{дон}$ ).
2. Исследование влияния последовательно включенной емкости на чувствительность и линейный диапазон статической характеристики.
3. Определение геометрических соотношений для чувствительных, силовводящих и элементов конструкции датчиков.
4. Исследование магнитных свойств стали и выбор величины первоначального подмагничивания.
5. Исследование влияния корректирующих звеньев и поиск наилучшего корректирующего звена.
6. Исследование кристаллографической структуры ЧЭ и их температурных характеристик.
7. Выбор метода и принципа измерений.

Результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 1, 2, 3.

Таблица 1 - Результаты эксперимента

| Показания прибора прессы $\varphi^0$ | Показания измерителя силы F, кН | $F(\tau) =$ |
|--------------------------------------|---------------------------------|-------------|
|                                      |                                 | $F (кН)$    |
|                                      |                                 | 9,80665     |
| 0                                    | 0,00                            | 0,000000    |
| 5                                    | 5,55                            | 0,565942    |
| 10                                   | 16,66                           | 1,698841    |
| 15                                   | 27,77                           | 2,831751    |
| 20                                   | 38,88                           | 3,964656    |
| 25                                   | 50,00                           | 5,098581    |
| 30                                   | 60,63                           | 6,182539    |
| 35                                   | 71,27                           | 7,267517    |
| 40                                   | 81,91                           | 8,352495    |
| 45                                   | 92,55                           | 9,437473    |
| 50                                   | 103,12                          | 10,51531    |

Таблица 2 - Результаты эксперимента. (Напряжение питания датчиков гармонической,  $U = 10 В$ , эф.)

| $\varphi^0$ | $C = 0$<br>Uэф(В) | $C = 2$ мкф<br>Uэф(В) | $C = 1$ мкф<br>Uэф(В) |
|-------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|
| 0           | 0,112             |                       |                       |
| 5           | 0,219             | 0,420                 |                       |
| 10          | 0,599             | 1,987 1,450           | 1,320                 |
| 20          | 1,970 2,310       | 4,750                 | 5,170                 |
| 2           | 15                | 1,345                 | 3,250                 |
| 5           | 2,750             | 6,400                 |                       |
| 30          | 3,772 4,000       | 8,470 8,960           | 6,110                 |
| 35          | 4,650             | 10,450                |                       |
| 40          | 5,300 5,560       | 11,410 11,600         | 7,770                 |
| 45          | 5,800             | 12,170                |                       |
| 50          | 6,470 6,510       | 12,510 12,010         | 9,010                 |

Таблица 3 - Результаты эксперимента. (Напряжение питания датчиков гармонической,  $U = 20 В$  эф.)

| $\varphi^0$ | $C = 0$<br>U В, эф | $C = 2$ мкф<br>U В, эф | $C = 1$ мкф<br>U В, эф |
|-------------|--------------------|------------------------|------------------------|
| 0           | 0,240              |                        |                        |
| 5           | 2,600              | 3,300 3,280            | 3,330                  |
| 10          | 4,330              | 9,190                  | 6,010                  |
| 15          | 6,660              | 16,010                 | 9,990                  |
| 20          | 8,480              | 21,550                 | 12,450                 |
| 25          | 9,940              | 23,510                 | 14,270                 |
| 30          | 11,010             | 24,610                 | 15,850                 |
| 35          | 12,210             | 25,020                 | 17,260                 |
| 40          | 13,120             | 25,380                 | 18,360                 |
| 45          | 14,040             | 25,710                 | 19,010                 |

Анализ осциллограмм и интерпретация полученных результатов показывают, что при отсутствии емкости в выходной цепи ( $C=0$ ) выходное напряжение имеет много гармоник, при  $C = 2$  мкф выходное напряжение имеет гармоническую форму, при  $C = 1$  мкф выходное напряжение имеет удовлетворительную гармоническую форму.

На рис. 1 - 8 представлены зависимости  $U_{эф} = f(F)$ . При подключении емкости увеличивается реактивная составляющая тока  $I_2$ . Реактивная составляющая тока  $I_2$  является опережающей относительно ЭДС измерительной цепи. Эта составляющая уменьшает реактивную составляющую тока  $I_1$ .

На определенном участке характеристика преобразования приобретает линейный участок. За счет резонанса напряжений или работы вблизи резонанса напряжений увеличивается  $U_2$  и может превысить напряжение питания  $U_1$  при больших нагрузках. Например, при питании обмотки возбуждения датчика  $W_1$  напряжением 19 В, напряжение на выходе может достигать 21 и более вольт.

Однако уменьшается отрезок  $F_{min}$  до  $F_{max}$ , на котором характеристика преобразования линейная. Таким образом, на основании полученных результатов эксперимента можно сделать вывод, что емкость увеличивает ток подмагничивания, то есть, увеличивает  $B_m$ . Значительно размагничивается сердечник по высшим гармоникам.

В табл. 4 приведены схемы включения обмоток датчиков нагрузки, для которых приведены выше зависимости выходного напряжения.

По семейству зависимостей можно установить подобие характеристик преобразователей.

Толщина набора пакета преобразователя и рациональное число витков обмоток следует определить с учетом данных, полученных при заданных размерах пластин чувствительного элемента и по заданному значению (наибольшему) измеряемой силы.

Учитывая, что магнитная индукция в сечении обмотки намагничивания

$$e = \frac{d\Psi}{dt} = WS \frac{dB_m \sin \omega t}{dt}, \quad e(t) = \omega B_m WS \cos \alpha t.$$

Амплитуда ЭДС

$$E_m = 2\pi f B_m WS, \quad U_{эф} = E_{эф} = \frac{E_m}{\sqrt{2}}, \quad U_{эф} \sqrt{2} = 2\pi f B_m WS, \quad U_{эф} = 4,44 B_m S f W.$$

Таблица 4 - Исследование способов получения линейного участка характеристики МУП

| 1-й вариант | № п/п | C <sub>2</sub> , мкФ | R <sub>1</sub> , кОм | 4-й вариант | №п/п | C, мкФ |
|-------------|-------|----------------------|----------------------|-------------|------|--------|
|             | 1     | 0,05                 | 510,0                |             | 1    | 0,0    |
|             | 2     | 0,05                 | 560,0                |             | 2    | 1,0    |
|             | 3     | 0,05                 | 620,0                |             | 3    | 2,0    |
|             | 4     | 0,05                 | 680,0                |             | 4    | 3,0    |
|             | 5     | 0,05                 | 750,0                |             | 5    | 0,1    |
|             | 6     | 0,05                 | 820,0                |             |      |        |
|             | 7     | 0,05                 | 910,0                |             |      |        |
|             | 8     | 0,05                 | 1*10 <sup>3</sup>    |             |      |        |
|             | 9     | 0,05                 | 1,1*10 <sup>3</sup>  |             |      |        |
|             | 10    | 0,05                 | 1,2*10 <sup>3</sup>  |             |      |        |
|             | 11    | 0,05                 | 1,5*10 <sup>3</sup>  |             |      |        |
| 2-й вариант | № п/п | C <sub>2</sub> , мкФ | R <sub>1</sub> , кОм | 5-й вариант | №п/п | C, мкФ |
|             | 1     | 0,1                  | 510,0                |             | 6    | 2,0    |
|             | 2     | 0,1                  | 560,0                |             | 7    | 0,0    |
|             | 3     | 0,1                  | 620,0                |             |      |        |
|             | 4     | 0,1                  | 680,0                |             |      |        |
|             | 5     | 0,1                  | 750,0                |             |      |        |
|             | 6     | 0,1                  | 820,0                |             |      |        |
|             | 7     | 0,1                  | 910,0                |             |      |        |
|             | 8     | 0,1                  | 1,0*10 <sup>3</sup>  |             |      |        |
|             | 9     | 0,1                  | 1,1*10 <sup>3</sup>  |             |      |        |
|             | 10    | 0,1                  | 1,2*10 <sup>3</sup>  |             |      |        |
|             | 11    | 0,1                  | 1,5*10 <sup>3</sup>  |             |      |        |
| 3-й вариант | № п/п | C, мкФ               | R, кОм               | 6-й вариант | №п/п | C, мкФ |
|             | 1     | 2,0                  | 50,0                 |             | 8    | 20,0   |
|             | 2     | 3,0                  | -                    |             |      |        |
|             | 3     | 1,0                  | -                    |             |      |        |
|             | 4     | 2,5                  | -                    |             |      |        |
|             | 5     | 3,0                  | 30,0                 |             |      |        |
|             | 6     | 3,0                  | 12,0                 |             |      |        |
|             | 7     | 3,0                  | 3,1                  |             |      |        |
|             | 8     | 3,0                  | 3,0                  |             |      |        |
|             | 9     | 3,0                  | 2,7                  |             |      |        |
|             | 10    | 3,0                  | 2,4                  |             |      |        |
|             | 11    | 3,0                  | 2,6                  |             |      |        |

С учетом единиц измерения:  $S[m^2], B[mл], [мл] = \left[ \frac{Bc}{M^2} \right]$ ,

$$B[mл] = B \left[ \frac{Bc}{M^2} \right] = 10^{-4} B[гс], \quad S[см^2] = S(M^2) = 10^{-4} [M^2],$$

окончательно получим для  $S [см^2]$

$$U_{эф} = 4,44 B_m S W f \cdot 10^{-8}.$$

В сечении обмотки намагничивания - полный магнитный поток  $\Phi_m$ . С учетом коэффициента заполнения сталью 0,9 площадь сечения  $S_{1,2}: S_{1,2} = 2 l B 0,9$

Для принятого значения  $B_m$  и заданного значения напряжения питания  $U_{эф}$  число витков обмотки намагничивания:

$$W = U_{эф} / 4,44 B_m S W f \cdot 10^{-8}, \quad \text{или} \quad W = U_{эф} / 4,44 2 l в B_m f \cdot 0,9 \cdot 10^{-8}.$$

получим  $W = 50 U_{эф} / 2 l в \cdot 10^4 / B_m$ ,

где  $2l [см], B_m [Гс], в [см]$ .

Зная размеры  $2l [см]$  и  $B = в [см^2]$ , приняв для датчика на любые измеряемые силы единое стандартное напряжение питания первичной обмотки  $U_{эф}$ , следует вычислять число витков обмотки намагничивания:  $W = 50 U_{эф} / 2 l \cdot 10^4 / B_m$ .

Рационально для преобразователя всех типоразмеров принимать:  $B_m = 5000 Гс$  и  $U_{эф} = 10 В$ .

На основании характеристик преобразования можно сделать следующий вывод:

Для испытуемого датчика следует считать характеристику преобразования линейной для значения  $F =$  от 30 кН до 70 кН.

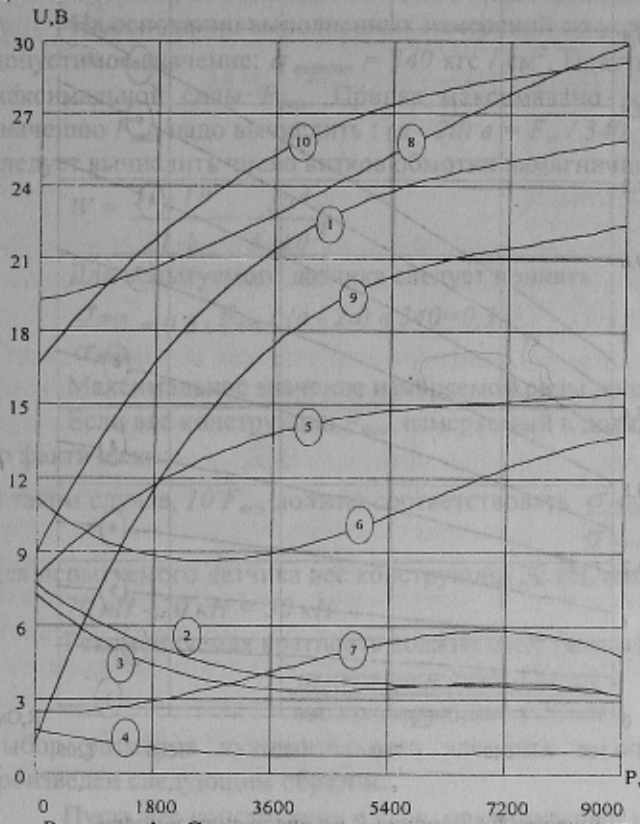


Рисунок 1 - Статические характеристики МУП при варьировании схем подключения выходных обмоток ЧЭ образцов №1

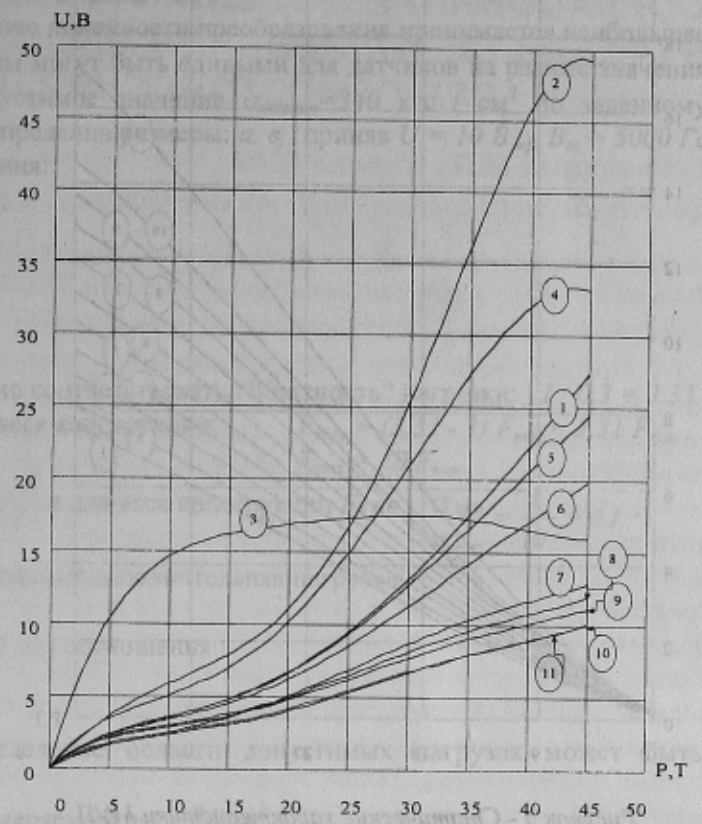


Рисунок 2 - Статические характеристики МУП типа куб, двухобмоточный, при варьировании схем подключений обмоток образцов 5, 6, 7, 8

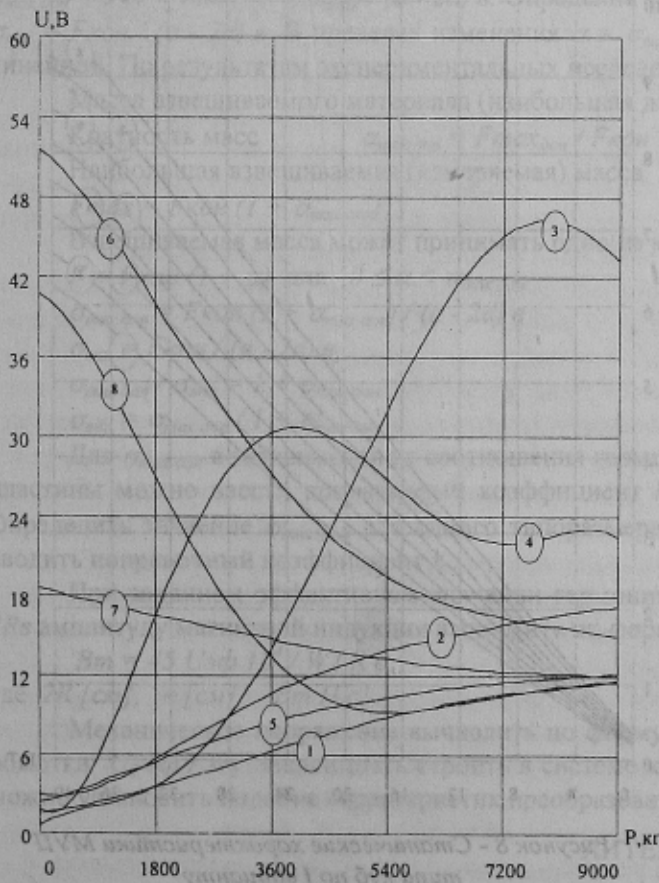


Рисунок 3 - Статические характеристики МУП типа куб по IV, V и VI варианту

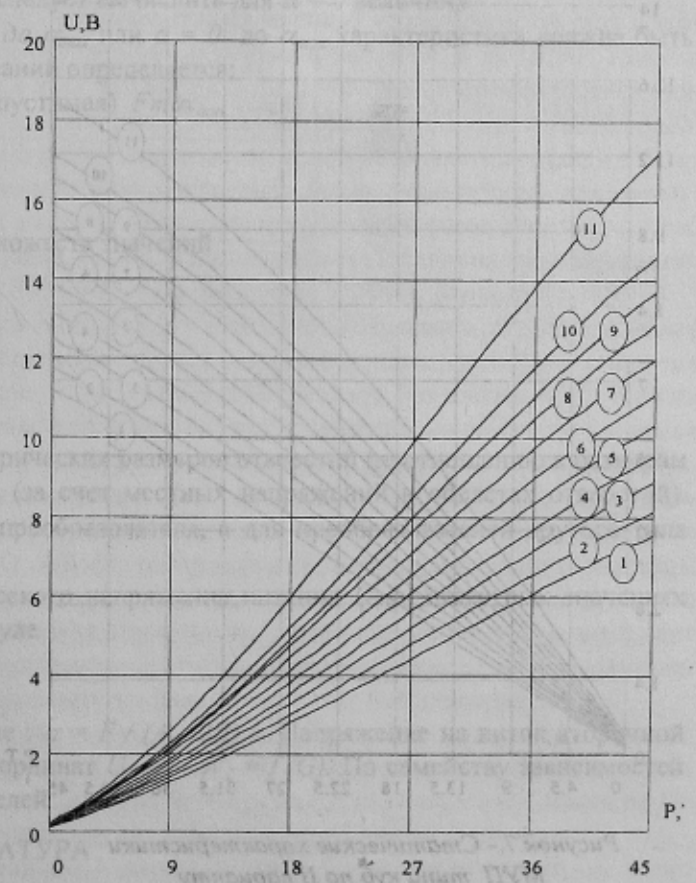


Рисунок 4 - Статические характеристики МУП типа куб по III варианту

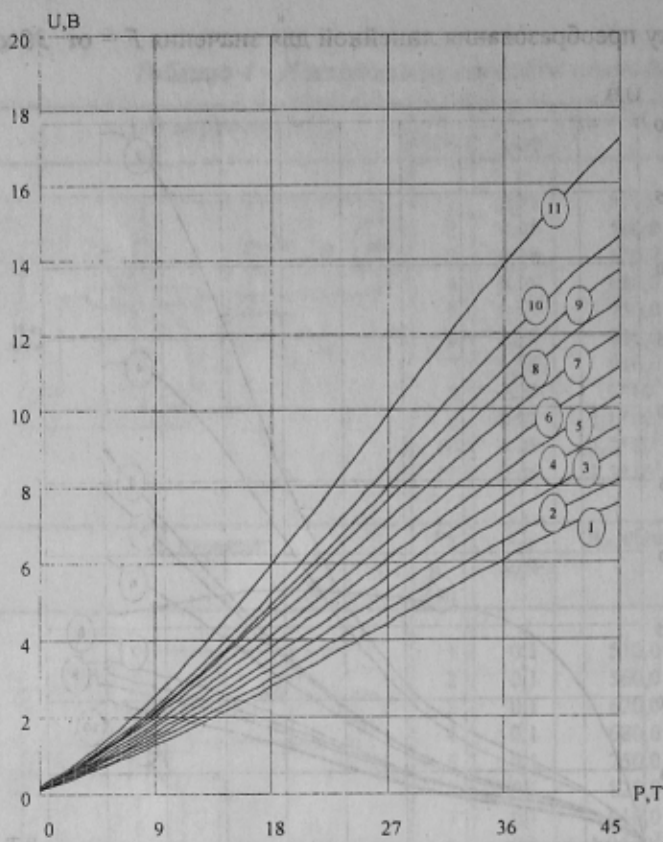


Рисунок 5 - Статические характеристики МУП типа куб по III варианту

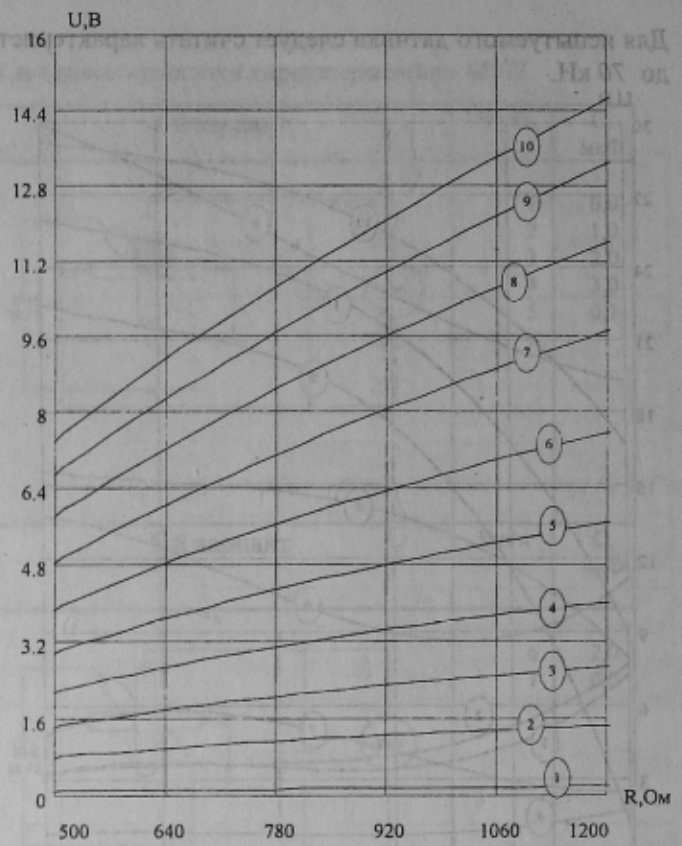


Рисунок 6 - Влияние R на чувствительность характеристик, ЧЭ типа куб, III вариант

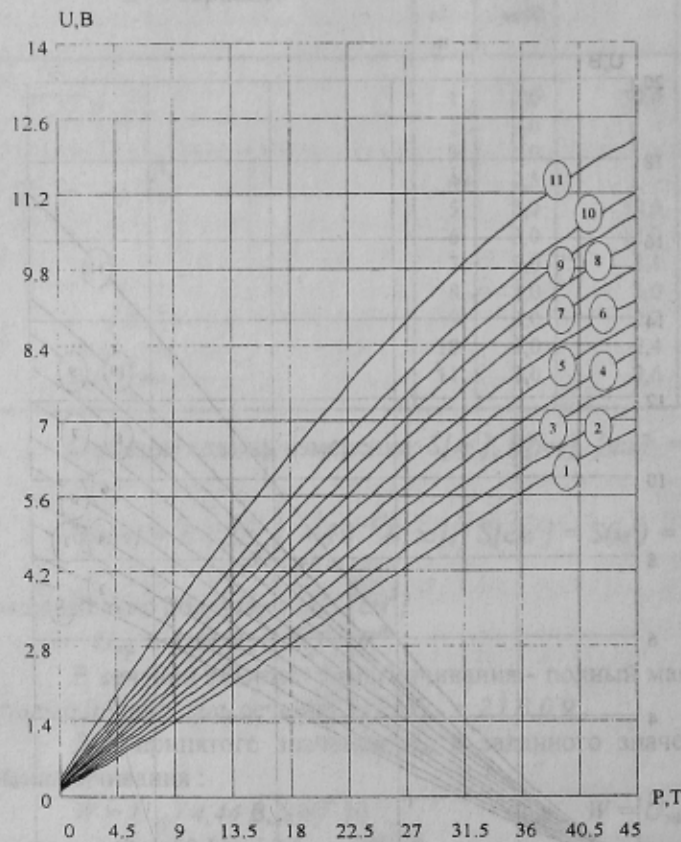


Рисунок 7 - Статические характеристики МУП типа куб по II варианту

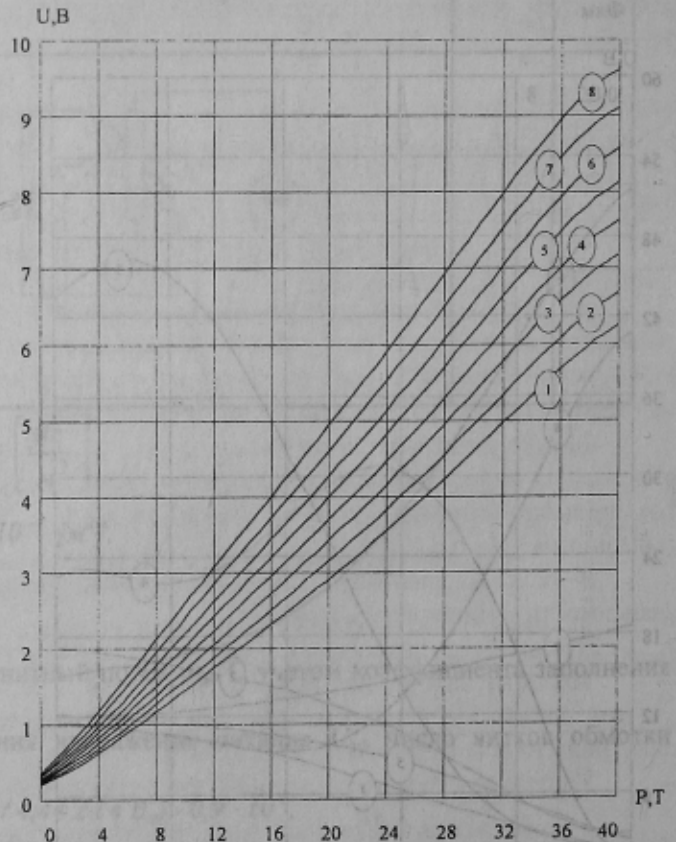


Рисунок 8 - Статические характеристики МУП типа куб по I варианту

Площадь сечения испытуемого преобразователя :  $(a - 2d) v = 21 \text{ см}^2$ ,

$$\sigma = 70 / (a - 2d) v = 70 / 21 (\text{см}^2) = 3,33 \text{ КН/см}^2 = 340 \text{ кг силы / см}^2.$$

На основании выполненных измерений по условию линейности преобразования принимается наибольшее допустимое значение:  $\sigma_{\text{max доп}} = 340 \text{ кгс / см}^2$ . Пластины могут быть едиными для датчиков на разные значения максимальной силы  $F_{\text{max}}$ . Приняв максимально допустимое значение  $\sigma_{\text{max доп}} = 340 \text{ кгс / см}^2$  по заданному значению  $F_{\text{max}}$  надо вычислить :  $(a - 2d) v = F_m / 340$ . Определив размеры:  $a, v$ , приняв  $U = 10 \text{ В эф}$ ,  $B_m = 5000 \text{ Гс}$  следует вычислить число витков обмотки намагничивания:

$$W = \frac{50 \cdot 10}{21 \cdot b} \cdot \frac{10^4}{5 \cdot 10^3}.$$

Для испытуемого датчика следует принять:

$$\frac{\sigma_{\text{min}}}{\sigma_{\text{max}}} = 0,3, F_{\text{кон}} / (a - 2d) v = 340 = 0,3$$

Максимальное значение измеряемой силы должно соответствовать: "Кратность" нагрузки:  $1 / 0,3 = 3,33$ .

Если вес конструкции  $F_{\text{кон}}$  измеряемый в долях веса конструкции:  $F_{\text{max}} = (3,33 - 1) F_{\text{кон}} = 2,31 F_{\text{кон}}$ , то фактически:  $F_{\text{max}} = 10 F_{\text{кон}}$ .

В таком случае,  $10 F_{\text{кон}}$  должно соответствовать  $\frac{\sigma_{\text{min}}}{\sigma_{\text{max}}} = 1$  и для веса конструкции  $F_{\text{кон}}$ :  $\frac{\sigma_{\text{min}}}{\sigma_{\text{max}}} = \frac{1}{10} = 0,1$ .

Для испытуемого датчика вес конструкции 20 кН, измеряемая дополнительная нагрузка:

$$70 \text{ кН} - 20 \text{ кН} = 50 \text{ кН}$$

Рекомендуемая кратность должна быть равна 2,5 из соотношения :

$$\frac{\text{измеряемая сила (50 кН)}}{\text{вес конструкции (20 кН)}}$$

Выбор размеров чувствительного элемента и определение области допустимых нагрузок может быть произведен следующим образом.

Пусть вес конструкции -  $F_{\text{кон}}$ , максимальный измеряемый вес -  $F_{\text{max}}$ .

Кратность веса :  $\alpha_{\text{max}} = F_{\text{max}} / F_{\text{кон}}$ .

Максимальная величина измеряемой силы :  $F_{\text{max}} = F_{\text{кон}} (1 + \alpha_{\text{max}})$ .

Таким образом, при заданных размерах пластины определяется толщина набора

$\sigma_{\text{max доп}} = 340 = F_{\text{кон}} (1 + \alpha_{\text{max}}) / (a - 2d) v$ . Определив  $v$ , следует вычислить для  $\alpha = 0$  величину

$\sigma_{\text{min}} = F_{\text{кон}} / (a - 2d) v$ . В пределах изменения  $\sigma = \sigma_{\text{min}}$  до  $\sigma_{\text{max}}$  или  $\alpha = 0$  до  $\alpha_{\text{max}}$  характеристика должна быть линейной. По результатам экспериментальных исследований определяется:

Масса взвешиваемого материала (наибольшая допустимая)  $F_{\text{max доп}}$

Кратность масс  $\alpha_{\text{max доп}} = F_{\text{max доп}} / F_{\text{кон}}$

Наибольшая взвешиваемая (измеряемая) масса

$$F_{\text{max}} = F_{\text{кон}} (1 + \alpha_{\text{max доп}})$$

Взвешиваемая масса может принимать одно из множеств значений :

$$F = F_{\text{кон}} (1 + \alpha) \text{ для } 0 \leq \alpha < \alpha_{\text{max доп}}$$

$$\sigma_{\text{max доп}} = F_{\text{кон}} (1 + \alpha_{\text{max доп}}) / (a - 2d) v$$

$$\sigma_{\text{min}} = F_{\text{кон}} / (a - 2d) v,$$

$$\sigma_{\text{max доп}} / \sigma_{\text{min}} = 1 + \alpha_{\text{max доп}}$$

$$\sigma_{\text{min}} = \sigma_{\text{max доп}} / (1 + \alpha_{\text{max доп}})$$

Для  $\sigma_{\text{max доп}}$  в зависимости от соотношения геометрических размеров отверстий по отношению к размерам пластины можно ввести поправочный коэффициент  $k_n$  (за счет местных напряжений в областях отверстий).

Определить значение  $\sigma_{\text{max доп}}$  для одного типоразмера преобразователя, а для преобразователей другого типа вводить поправочный коэффициент  $k_n$ .

При заданном эффективном значении гармонического напряжения питания  $U_{\text{эф}}$ , известных значениях  $2Rv$  амплитуду магнитной индукции вычислить по формуле

$$B_m = 45 U_{\text{эф}} 10^4 / W 2 R v,$$

где  $2R$  [см],  $v$  [см],  $B_m$  [Гс]

Механическое напряжение вычислить по формуле :  $\sigma = F / (A - 2D) v$ . Напряжение на виток вторичной обмотки  $U_2 \text{ эф} / W_2$ . Зависимость строить в системе координат  $U_2 \text{ эф} / W_2 = f(G)$ . По семейству зависимостей можно установить подобие характеристик преобразователей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Структурно-алгоритмические принципы построения ИИС напряжённо-деформированных объектов / Чичикало Н.И., - Донецк: РИА ДонГУ, 1988. - 178с.: ил. ISBN 966 - 7559 - 00 - 7