

УДК 531.781.08:681.2.084.2 (575.2) (04)

## РАСЧЕТ МАГНИТОАНИЗОТРОПНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УСИЛИЙ

*П.И. Пахомов* – чл.-корр. НАН КР, докт. техн. наук,  
*Т.Ю. Каплина* – аспирант

In this article the example of calculation of the gauge of efforts is examined. Influence of electric parameters of windings from gravity an auto dumper.

Расчет параметров магнитоанізотропных датчиков усилий (МДУ) осуществляется в соответствии с методикой, справочными данными, рекомендованными в [1, 2]. Исходными данными для расчета МДУ являются: диапазон измеряемых нагрузок – грузоподъемность карьерных автосамосвалов и возможные величины перегрузок (табл. 1, 2). При выполнении расчета необходимо определить геометрические размеры МДУ, величину выходного сигнала.

Геометрические размеры характеризуются активной площадью: площадью поперечного сечения, высотой преобразователя, количеством

секций – модулей и их длиной, размерами отверстий под обмотки и их расположением (рис. 1). На практике существуют жесткие ограничения по габаритным размерам, особенно по высоте магнитоупругих преобразователей. И чем больше усилие требуется измерить, тем жестче становятся ограничения по высоте. Это связано с ограничением по габаритным размерам весоизмерительной платформы [3]. Если габаритные размеры МДУ необоснованно увеличить, то возрастет стоимость весоизмерительной платформы и ухудшатся технические характеристики.

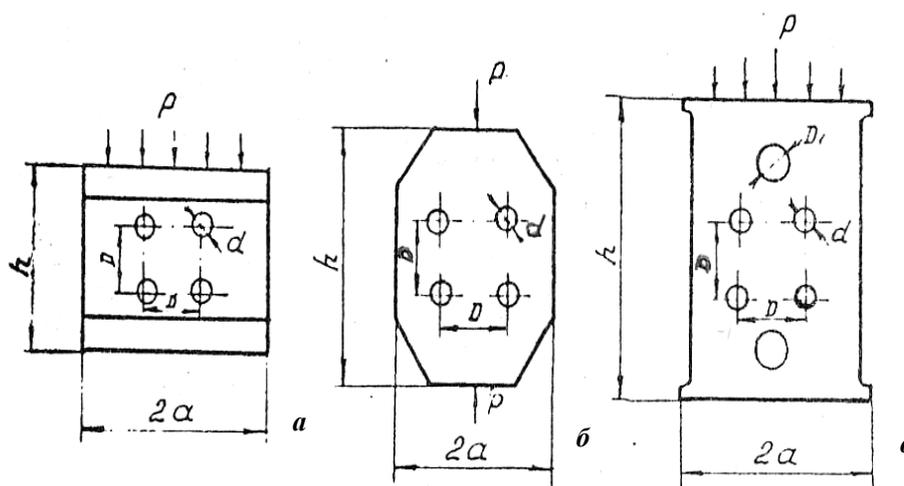


Рис. 1. Модули магнитоанізотропных монолитных преобразователей. *а* – прямоугольный; *б* – многогранный; *в* – рельсообразный; *Р* – приложенная нагрузка, кг.

Габаритный размер в направлении действия измеряемой силы (Р – приложенной нагрузки) имеет важнейшее значение для обеспечения необходимой точности измерения. Для цилиндрической формы высота преобразователя должна быть не меньше двух его диаметров.

Все три варианта (рис. 1) имеют одинаковые соотношения геометрических размеров  $d$ ,  $D$  и  $2a$ :

$$D \geq 2d; 2a \geq 3D; h \geq 2a. \quad (1)$$

1. *Расчет геометрических параметров преобразователя.* Его начинаем с выбора конструктивной схемы МДУ (рис. 1).

Модуль  $a$  рекомендуется для измерения сосредоточенных и относительно малых на-

грузок (до 40 тс);  $b$  – при незначительных перегрузках;  $v$  – для наихудших условий работы: с частыми и большими перегрузками и для измерения распределенных нагрузок, характер которых может изменяться.

Грузоподъемность карьерных автосамосвалов варьирует от 7 до 319,8 т и до 500 т (табл. 1, 2), т.е. 1 тс  $\approx$  10 кН, 7  $\approx$  70 кН, 500  $\approx$  5000 кН, поэтому выбираем рельсообразный  $v$ -модуль. По табл. 3 определяем конкретные геометрические размеры выбранного модуля  $v$ .

2. *Выбор материала для изготовления преобразователя.* После выбора размера модуля и соответственно его высоты выбираем материал для изготовления МДУ (табл. 4) и величину удельной нагрузки  $d_n$ .

Таблица 1  
Основные характеристики карьерных автосамосвалов, выпускаемых в странах СНГ

Характеристика		Тип автосамосвала					
		МАЗ-503Б	МАЗ-525	КрАЗ-256	КрАЗ-256Б	БелАЗ-540	БелАЗ-548
Грузоподъемность, т		7	25	12	10	27	40
Собственная масса, т		6,75	22	11,4	11,4	21	28
Распределение полной нагрузки по осям, кН.	передней	45	153,5	44	70	157	226
	задней	90	307	87,5	140	314	452
Характеристика		Тип автосамосвала					
		БелАЗ-549	БелАЗ-7519	БелАЗ-7521	БелАЗ-7420-9590 *		
Грузоподъемность, т		75	110	180	120		
Собственная масса, т		65	85	120	45,6		
Распределение полной нагрузки по осям, кН.	передней	454	650	1058	541		
	задней	956	1300	2192	1082		

Таблица 2  
Основные характеристики карьерных автосамосвалов, выпускаемых за рубежом

Характеристика		Модель автосамосвала, фирма-изготовитель (страна).					
		120 М “Вабко” (США)	М-120-17 “Юнит Риг” (США)	HD-1200 “Комацу” (Япония)	HD-1600 “Комацу” (Япония)	R-170 “Эвклид” (США)	M-200 “Юнит Риг” (США)
Грузоподъемность, т		108,9	108,8	120	160	154,2	181,4
Масса с грузом, т		187,93	187,9	207,6	261,5	255,78	319,8
Распределение полной нагрузки по осям, кН	передней	584	629	6646	8525	8525	-
	задней	1295,3	1250	1411,4	1762,5	1705,3	-

Таблица 3

Геометрические размеры модулей магнитоанізотропных монолитных преобразователей, мм

Вариант модуля	d	D	2a	h	D1
a	3	6	20	20	-
b	6	12	40	60	-
в	7	14	40	80	10

Таблица 4

Материал для изготовления МДУ

Марка материала	Чувствительность МВ/А	Рабочая нагрузка МПа (δн)	Предел прочности МПа (δmax)	Ударная стойкость	Коррозийная стойкость	Термообработка	Стоимость руб./г
50 КФ 2	15,0	80	350	-	-	+	16700
X23Ю5	17,5	100	660	-	+	-	500
Ю12	29,0	100	650	-	+	+	500
08Х13	12,0	80	600	+	+	-	230
44НХТЮ	8,5	200	1200	+	-	+	2800
МС-Ш	22,5	250	1600	+	-	+	25000
Э42	14	80	530	-	-	-	300
X17Ю5	22,0	100	650	-	+	-	500
МС	7,0	250	1600	+	-	+	2500

Примечание. (+) – материалы, не склонные к образованию трещин при ударных нагрузках; материалы, стойкие к коррозии при влажности до 98%; материалы, для которых рекомендуется термообработка. (-) – материалы, склонные к образованию трещин при ударных нагрузках; материалы, активно корродирующие во влажной среде; материалы, для которых проводить термообработку нецелесообразно.

Применение фехралей [4] для изготовления МДУ расширяется с каждым годом, в этом веществе содержание хрома составляет 13–30% при одинаковом содержании алюминия (4–5%). Однако при менее 15% хрома характеристики преобразователей становятся существенно нелинейными. При содержании хрома более 25% в сплаве выделяется фаза, которая снижает магнитные свойства и делает материал твердым и хрупким.

Для наших целей подходит сплав X23Ю5, который выпускается серийно; стоимость – 500 руб./г сравнительно низкая и проводить термообработку нецелесообразно.

Таким образом, для выбранного сплава X23Ю5  $\delta_n = 100 \text{ МПа} = 10^8 \text{ Н/м}^2 = 10^5 \text{ кН/м}^2$ ;  $\delta_{max} = 660 \text{ МПа}$ .

Рассмотрим расчет силоизмерительных датчиков, предназначенных для измерения максимальных нагрузок до 150 кН.

3. Расчет площади поперечного сечения преобразователя. Его осуществляют по формуле:

$$S_H = \frac{P_H}{1,5 * \delta_H} \text{ м}^2, \quad (2)$$

где  $P_H$  – номинальная нагрузка, тс; 1,5 – полуторакратный запас с учетом неравномерности нагрузки;  $\delta_H$  – номинальная величина усредненной нагрузки, тс/м<sup>2</sup>.

Активная длина секции одномодульного преобразователя должна быть меньше его ширины и может быть рассчитана по формуле:

$$b_c = \frac{P_H * 10^6}{1,5 * \delta_H * a_c} \text{ мм}, \quad (3)$$

где  $a_c = 20 \text{ мм}$  – ширина секции одномодульного преобразователя (минимальный радиус модуля МДУ, табл. 3);  $b_c$  – активная длина секции одномодульного преобразователя.

4. *Электромагнитный расчет.* Ориентировочный электрический расчет конструктивных модулей может быть произведен методом подобия, основанным на предложении о линейной зависимости параметров преобразователя от его геометрических размеров.

Магнитоанизотропный преобразователь – трансформатор с малым и изменяющимся в зависимости от приложенного усилия коэффициентом связи между первичной и вторичной обмотками. Мощность этого трансформатора пропорциональна произведению объема меди в обмотках на площадь поперечного сечения магнитопровода.

Базовые значения магнитодвижущей силы первичной обмотки для фехралей выбирают в диапазоне (60–184) ампер-витков:

$$I_1 \times \omega_1 = 63, \quad (4)$$

где  $\omega_1 = 28$  витков – количество витков первичной обмотки в рекомендуемом базовом модуле, тип провода – ПЭЛШО.

Тогда

$$I_1 = 2.25A. \quad (5)$$

Благоприятные условия отвода тепла от преобразователей позволяют допускать плотность тока в их обмотках возбуждения от 10 до 12А/мм<sup>2</sup> ( $J$ )

$$d = 1.13 \times \sqrt{\frac{I_1}{J}} \text{ мм}, \quad (6)$$

где  $I_1$  – величина тока в обмотке, А;  $J$  – допустимая плотность тока, А/мм.

$$d_1 = 1.13 \times \sqrt{\frac{2.25}{12}} = 0.49 \text{ мм}. \quad (7)$$

Напряжение питания преобразователя рассчитывают из условия получения необходимого магнитного потока, а величина магнитной индукции в сечении магнитопровода МДУ неравномерна и изменяется под действием механических напряжений. Поэтому при расчетах принимают среднее значение индукции, для сплава Х23Ю5 она составляет 1,5–1,77 Тл.

$$U_1 = 5.65 \times K_f \times \omega_1 \times f_n \times B_{cp} \times S_0 \times n \text{ В}, \quad (8)$$

где  $K_f = 1.11$  – коэффициент формы синусоидального напряжения питания;  $f_n = 50$  Гц – частота напряжения;  $S_0$  – площадь магнитопровода, охватываемая первичной обмоткой;  $B_{cp} = 1.77$  Тл. – среднее значение индукции для выбранного сплава Х23Ю5;  $n = 1$  – число секций (модулей) преобразователя.

$$S_0 = b_c \times (\sqrt{2} \times D - d), \text{ м}^2 \quad (9)$$

Выходной сигнал преобразователя при полной удельной нагрузке рассчитываем по формуле:

$$\Delta U_2 = K_n \times (I_1 \times \omega_1) \times p \times \gamma_H \times \omega_2 \times n \text{ В}, \quad (10)$$

где  $K_n = 1$  – коэффициент подобия;  $(I_1 \times \omega_1) \times p$  – расчетная магнитодвижущая сила, А;  $\gamma_H = 17.5$  мВ/А – чувствительность для Х23Ю5.

В рекомендуемом базовом модуле провода вторичной обмотки типа ПЭВ диаметром 0,2 мм, эти значения принимаем:

$\omega_2 = 200$  – число витков вторичной обмотки датчика.

Тогда максимальный выходной сигнал датчиков определяется:

$$\Delta U_2 = 1 \times 63 \times 17.5 \times 200 \times 1 = 220500 \text{ мВ} \quad (11)$$

Расчеты МДУ при номинальной нагрузке от 7 до 152 тс с интервалом (шагом) в 2,5 тс сведены в табл. 5.

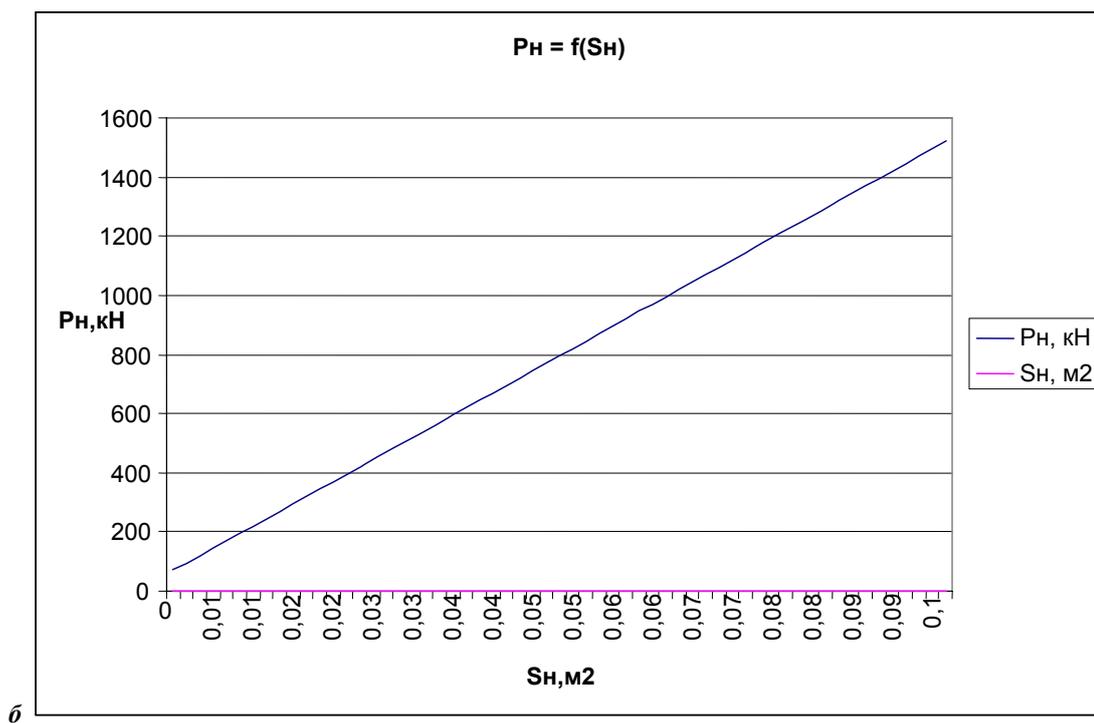
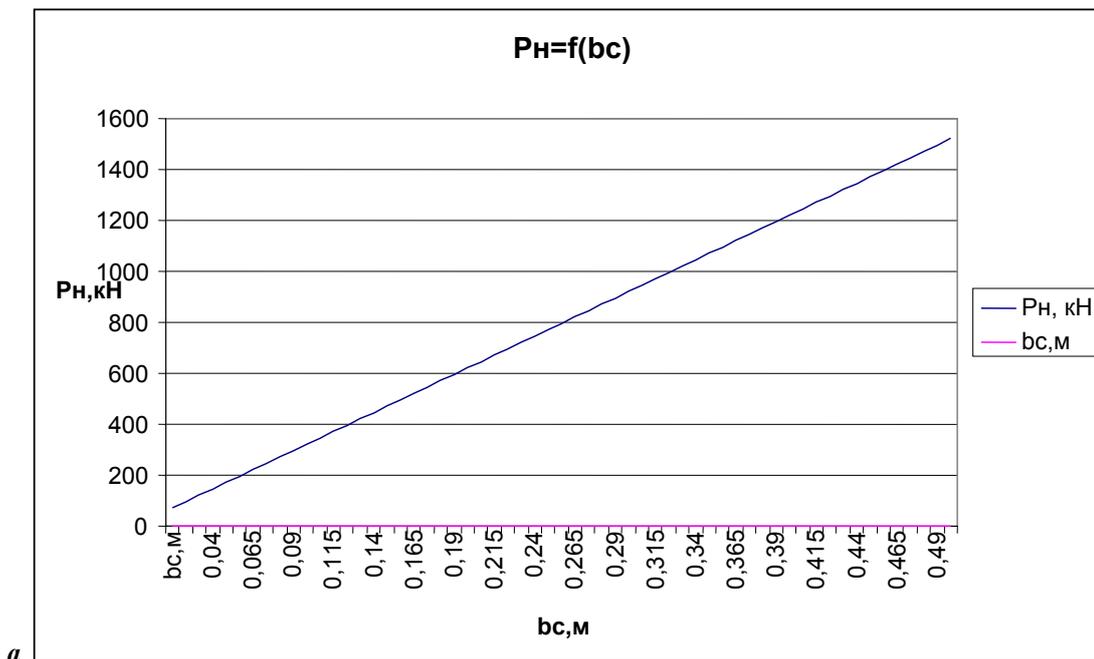
Датчик обладает относительно малым входным сопротивлением ( $\approx 50 \text{ Ом}$ ), поэтому, как и всякий источник, он выделяет максимальную мощность при условии согласования его с нагрузкой. Кроме этого, формула (10), (11) не отражает имеющее место различие потери в магнитопроводе преобразователя. По сведениям [5], общий КПД датчиков не превышает величину 0,4. Как правило, выходной сигнал нагруженного датчика имеет мощный выход при напряжении от сотен милливольт до десятков вольт. Выходной сигнал конкретного изготовленного образца датчика уточняется при экспериментальных измерениях.

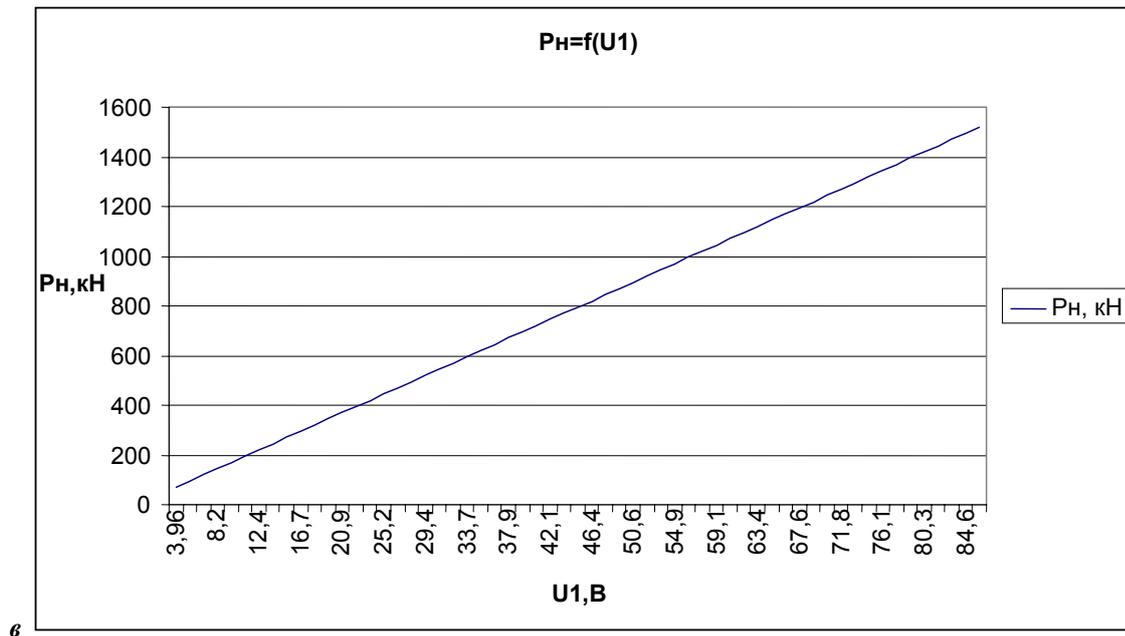
По результатам расчета геометрических параметров, электромагнитного расчета выполнены графики:  $P_H = f(S_H)$ ,  $P_H = f(b_H)$ ,  $P_H = f(U_1)$ , которые приведены на (рис. 2).

Таблица 5

Расчеты МДУ при минимальной нагрузке

$P_H$ , кН	$S_H$ , м <sup>2</sup>	$bс$ , м	$S_0$ , м <sup>2</sup>	$U_1$ , В	$P_H$ , кН	$S_H$ , м <sup>2</sup>	$bс$ , м	$S_0$ , м <sup>2</sup>	$U_1$ , В
70	0,004667	0,023333	0,000255	3,95979	770	0,051333	0,256667	0,002803	43,55769
95	0,006333	0,031667	0,000346	5,374001	795	0,053	0,265	0,002894	44,9719
120	0,008	0,04	0,000437	6,788211	820	0,054667	0,273333	0,002985	46,38611
145	0,009667	0,048333	0,000528	8,202422	845	0,056333	0,281667	0,003076	47,80032
170	0,011333	0,056667	0,000619	9,616633	870	0,058	0,29	0,003167	49,21453
195	0,013	0,065	0,00071	11,03084	895	0,059667	0,298333	0,003258	50,62874
220	0,014667	0,073333	0,000801	12,44505	920	0,061333	0,306667	0,003349	52,04295
245	0,016333	0,081667	0,000892	13,85926	945	0,063	0,315	0,00344	53,45716
270	0,018	0,09	0,000983	15,27348	970	0,064667	0,323333	0,003531	54,87138
295	0,019667	0,098333	0,001074	16,68769	995	0,066333	0,331667	0,003622	56,28559
320	0,021333	0,106667	0,001165	18,1019	1020	0,068	0,34	0,003713	57,6998
345	0,023	0,115	0,001256	19,51611	1045	0,069667	0,348333	0,003804	59,11401
370	0,024667	0,123333	0,001347	20,93032	1070	0,071333	0,356667	0,003895	60,52822
395	0,026333	0,131667	0,001438	22,34453	1095	0,073	0,365	0,003986	61,94243
420	0,028	0,14	0,001529	23,75874	1120	0,074667	0,373333	0,004077	63,35664
445	0,029667	0,148333	0,00162	25,17295	1145	0,076333	0,381667	0,004168	64,77085
470	0,031333	0,156667	0,001711	26,58716	1170	0,078	0,39	0,004259	66,18506
495	0,033	0,165	0,001802	28,00137	1195	0,079667	0,398333	0,00435	67,59927
520	0,034667	0,173333	0,001893	29,41558	1220	0,081333	0,406667	0,004441	69,01348
545	0,036333	0,181667	0,001984	30,82979	1245	0,083	0,415	0,004532	70,42769
570	0,038	0,19	0,002075	32,244	1270	0,084667	0,423333	0,004623	71,8419
595	0,039667	0,198333	0,002166	33,65821	1295	0,086333	0,431667	0,004714	73,25611
620	0,041333	0,206667	0,002257	35,07243	1320	0,088	0,44	0,004805	74,67033
645	0,043	0,215	0,002348	36,48664	1345	0,089667	0,448333	0,004896	76,08454
670	0,044667	0,223333	0,002439	37,90085	1370	0,091333	0,456667	0,004987	77,49875
695	0,046333	0,231667	0,00253	39,31506	1395	0,093	0,465	0,005078	78,91296
720	0,048	0,24	0,002621	40,72927	1420	0,094667	0,473333	0,005169	80,32717
745	0,049667	0,248333	0,002712	42,14348	1445	0,096333	0,481667	0,00526	81,74138
					1470	0,098	0,49	0,005351	83,15559
					1495	0,099667	0,498333	0,005442	84,5698
					1520	0,101333	0,506667	0,005533	85,98401





6

Рис. 2. Градуированная характеристика МДУ номинальной нагрузки:  
а) от ширины; б) от площади поперечного сечения; в) от напряжения питания.

#### Литература

1. Шишкинский В.Н. Магнитоанизотропные монолитные силоизмерители. – М.: Машиностроение, 1981. – 80 с.
2. Пахомов П.И. Расчет и исследование магнитоанизотропных преобразователей усилий. – Бишкек, 2000. – 49 с.
3. Единое образовательное пространство XXI века: Материалы междунар. научн.-практ. конф., посвящ. 10-летию КРСУ / Отв. ред. В.И. Нифадьев. – Бишкек: Изд-во КРСУ, 2003. – 275 с.
4. Гуманюк Н.М. Магнитоупругие датчики в автоматике. – Киев: Техника, 1965. – 264 с.
5. Твердин Л.М. и др. Автоматическое устройство с магнитоупругими преобразователями. – М.: Машиностроение, 1974. – 96 с.