

индекс 3624

ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ
ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЕФИ-520(7)-82

В.С.УРИХАНЯН

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ МАГНИТОМЕТРА
ИНТЕГРАЛЬНОГО МАГНИТНОГО
ПОЛЯ

ԵՐԵՎԱՆ 1982 ԵՐԵՎԱՆ

Одной из задач исследования магнитометра интегрального магнитного поля (МИМП) [1] является определение его суммарной погрешности. На рис.1 приведена таблица источников основной и дополнительных погрешностей МИМП.

Отклонение токонесущего проводника от прямолинейности, возникающее от его собственного веса, приводит к его удлинению (прогибу) - к увеличению пути интегрирования. При взаимных расположениях токонесущего проводника и магнитного поля, как показано на рис.2 и 3, благодаря совпадению осей чувствительности преобразователей силы с осью Y методические погрешности не возникают.

Жесткость токонесущего проводника практически не препятствует его перемещению в местах соединения с преобразователями силы. Возникающие погрешности не превышают $10^{-4}\%$.

Толщина токонесущего проводника при постоянстве магнитного поля, как в [1], по направлениям Y и Z не приводит к возникновению погрешностей.

Электрические шумы на выходе МИМП обусловлены шумами пьезо-

зорезистивного перехода и не превышает 100 мкВ [1].

Погрешности от создания дополнительного усилия (0,002Н) на преобразователи силы (рис.4) обусловлены изменением натяжения токонесящего проводника. Возникающие погрешности не превышают $10^{-4}\%$.

Погрешности от нелинейности статической функции преобразования МИМП обусловлены нелинейностью чувствительности преобразователей силы, которая из-за отсутствия точной количественной аналитической зависимости определяется экспериментально.

На рис.5 приведены кривые семейства вольт-амперных характеристик (ВАХ) пьезодиода [1]. На рис.6 приведена сило-токовая характеристика (СТХ) пьезодиода, построенная по результатам обработки (см.табл.1,гр.2) 10-кратного измерения тока через пьезодиод на 5 образцах [2]. При первоначальном нерабочем усилии 0,272Н (точка А на рис.6) зависимость имеет перегиб (ВАХ 1 на рис.5). По обеим сторонам указанного усилия до значения силы $\pm 0,002Н$ (точки Б и В на рис.6) зависимость имеет линейный характер (ВАХ 2 и 3 на рис.5). При усилиях, превышающих $\sim 25\%$ первоначально происходящие процессы обратимы. В табл.2 приведена зависимость выходного напряжения $U_{вых}$ преобразователя силы от усилия по результатам обработки 10-кратного измерения на 5 преобразователях. Результаты показывают, что зависимость в интервале усилия $F = \pm 0,002Н$ описывается уравнением $U_{вых} = 1000F \pm 0,0004$ с нелинейными искажениями, не превышающими $\pm 0,5\%$, при двухсторонней доверительной вероятности 0,95. В интервале рабочего усилия $10^{-7}Н \leq x \leq 0,002Н$ относительную основную погрешность δ преобразователя силы по [3] можно нормировать $\delta = \pm [0,5 + 0,005(0,002/x - 1)] \%$. При нормировке по выходному сигналу

$10^{-4}В \leq x \leq 2 В$ получаем $\delta = \pm [0,5 + 0,005 (2/x - 1)] \%$.

Разброс геометрических размеров токонесящего проводника приводит к изменению его диаметра и длины. Первое из этих изменений, при постоянстве магнитного поля, не приводит к возникновению погрешностей, а второе приводит лишь к изменению натяжения токонесящего проводника, которое компенсируется пружиной [1]. В табл.3 приведены зависимости основных характеристик пьезодиода от радиуса индентора. Разброс радиуса индентора составлял не более 0,1% от номинального значения. Зависимость первоначального нерабочего усилия F_0 от радиуса индентора для первых 4 значений описывается уравнением $F_0 = 0,0475r^2 - 0,975r + 8,3$. Для пьезодиода [1], при разбросе радиуса индентора порядка $\pm 0,2$ мкм, изменение чувствительности преобразователя по напряжению от усилия составляет не более 5%, а рабочий диапазон усилия уменьшается не более чем на 3%. Возникающие погрешности в первом случае компенсируются изменением сопротивления нагрузки, а во втором - исключаются указанием действительного значения диапазона рабочего усилия для каждого преобразователя.

Погрешности от разброса электрических характеристик элементов МИМП обусловлены разбросом удельного электрического сопротивления полупроводникового материала. Это приводит к изменению чувствительности преобразователя примерно на 10%. Эти погрешности устраняются во время настройки путем изменения сопротивления нагрузки.

Погрешности от неточности сборки и настройки МИМП обусловлены несоосностью центра шара, оси индентора и токонесящего проводника и применяемыми приборами и устройствами. Эти погрешности составляют несколько сотых долей процента.

Погрешности от наличия упругостей в опорах не превышают сотую долю процента.

Погрешности, вызванные старением МИМІ, возникают из-за ползучести механически нагруженных элементов и старения радиотехнических изделий. Эти погрешности устраняются периодической переналадкой МИМІ.

Дополнительные погрешности от колебания питания не превышают 0,01%. Погрешности от дифференциального сопротивления на участках насыщения тока (> 200 кОм) компенсируются балансировкой моста.

Погрешности от нестабильности элементов конструкции вызывают изменение режима работы МИМІ. Они уменьшаются искусственным старением путем термической обработки (отпуск, отжиг и т.п.). Эти погрешности не превышают долей процента за год и можно исключить периодической переналадкой МИМІ.

Изменение температуры внешней среды приводит к изменению натяжения токонесущего проводника. Погрешности при изменении температуры на 50°C не превышают тысячной доли процента (жесткость натяжной пружины $0,001$ м/Н). При повышении (снижении) температуры у пьезодиодов [I] наблюдается явление, аналогичное увеличению (уменьшению) усилия в контакте пьезодиода. С увеличением температуры участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС) передвигается в сторону больших отрицательных смещений напряжения. При $+70^{\circ}\text{C}$ участок с ОДС исчезает и дальнейшее увеличение температуры не приводит к увеличению тока через пьезодиод. При этом исчезает также пьезочувствительность пьезодиода. Для пьезодиодов [I] наблюдаемые явления обратимы вплоть до $+70^{\circ}\text{C}$. При температуре $\sim (120-130)^{\circ}\text{C}$ возникает

тепловой пробой пьезодиода. В сторону низких температур обратимость характеристик пьезодиода сохраняется до -80°C . Зависимость первоначального усилия F_0 от температуры приведена в табл.4. Эта зависимость в интервале температур $-70^{\circ}\text{C} \leq T \leq +65^{\circ}\text{C}$ имеет линейный характер и описывается уравнением $= -0,00084 + +0,293$. Изменение первоначального усилия составляет не более $0,3\%/^{\circ}\text{C}$. Изменение конструктивных размеров преобразователя от температуры также приводит к изменению усилия в контакте пьезодиода. Для трех марок материалов корпуса результаты приведены в табл.5. Мост был сбалансирован при 25°C . Для корпусов из стали Ст.3 и Ст.45 получилась недокомпенсация, а для Ст.50 - перекомпенсация с наименьшим изменением выходного сигнала. Зависимость имеет линейный характер и составляет 10 мВ/ $^{\circ}\text{C}$ (приведенная погрешность $0,5\%/^{\circ}\text{C}$). Смещением нуля рабочего диапазона усилия балансировкой моста на $0,5\%/^{\circ}\text{C}$ температурные погрешности исключаются из результата измерения. Перекомпенсация получилась также при материале корпуса из алюминиевого сплава Д16 (~ 15 мВ/ $^{\circ}\text{C}$). Для корпусов из бронзы и латуни имеет место перекомпенсация с изменением выходного сигнала $(20 - 25)$ мВ/ $^{\circ}\text{C}$. При термостатировании преобразователей с точностью $0,1^{\circ}\text{C}$ температурные погрешности снижаются до 1 мВ (приведенная погрешность $0,05\%/^{\circ}\text{C}$).

Погрешности МИМІ от изменения влажности внешней среды обусловлены изменением токов утечки пьезодиода. Их возможно уменьшить периодической перебалансировкой моста, а также герметизированием перехода.

Погрешности от изменения внешнего давления обусловлены изменением геометрических размеров конструктивных элементов МИМІ, которые вызывают изменение усилия в контакте пьезодиода.

При конструировании МИМП необходимо его составные элементы расположить так, чтобы давление распространялось по всему объему без задержки, как например, в [1].

Погрешности от вибрации возникают из-за наличия масс и упругостей токонесущего проводника и прижимного устройства преобразователя. Уменьшение влияния вибрации возможно применением виброизолирующих платформ, как в [1], и применением фильтров.

Погрешности от неточности установки МИМП возникают из-за отклонения оси чувствительности преобразователей от горизонтали. При этом возникает дополнительное усилие от веса токонесущего проводника и прижимного устройства. С помощью контроля выходного сигнала МИМП по минимальному значению обеспечивается точность установки порядка $10''$. Погрешности при этом не превышают $5 \cdot 10^{-3}\%$ от диапазона рабочего усилия МИМП.

Погрешности от непостоянства нагрузки на выходе обусловлены изменением сопротивления нагрузки. Их можно уменьшить применением согласующего элемента между МИМП и вторичным устройством.

Погрешности от переходного процесса относятся к динамическим погрешностям и обусловлены нелинейностью динамической функции преобразования МИМП, наличием сопротивления среды и явлением самоиндукции. Эти погрешности исключаются путем проведения измерения после завершения переходного процесса ($2 - 3\tau$), медленным наращиванием тока в токонесущем проводнике и применением фильтров.

Выводы

Основная погрешность МИМП обусловлена исключительно нелинейностью функции преобразования полупроводникового пьезоэлемента

тивного преобразователя силы и его порогом чувствительности. Основная погрешность от остальных влияющих величин ничтожно мала и ее практически можно пренебречь. Суммарная относительная основная погрешность МИМП в рабочем диапазоне выходного сигнала $10^{-4} \text{ В} \leq X \leq 2 \text{ В}$ по [3] нормируется

$$\delta = \pm [0,5 + 0,005(2/x - 1)] \%$$

Дополнительные погрешности МИМП в основном обусловлены температурными погрешностями преобразователя силы и не превышают $10 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$ (приведенная погрешность $0,5\%/^\circ\text{C}$). Смещением нуля рабочего диапазона МИМП на $0,5\%/^\circ\text{C}$ температурные погрешности исключаются из результата измерения. Дополнительные погрешности МИМП от остальных влияющих величин достаточно малы и ими практически можно пренебречь.

Таблица 1

Значения рабочего усилия F , несмещенной оценки генерального среднего \tilde{I} , несмещенной оценки среднего квадратического отклонения S , доверительных границ $\pm \varepsilon$ генерального среднего \tilde{I} при двухсторонней доверительной вероятности $\gamma^* = 0,95$ для пьезодиодов [1]

F, H	$\tilde{I}, \text{мА}$	$S, 10^{-3} \text{H}$	$\pm \varepsilon, 10^{-4} \text{H}$
1	2	3	4
0,19	0,2782	3,428	9,84
0,20	0,2865	3,516	10,09
0,21	0,2957	3,216	9,23
0,22	0,3035	2,921	8,39
0,23	0,3121	3,210	9,22
0,25	0,3295	2,818	8,09
0,26	0,4236	3,411	9,79
0,266	0,5217	3,312	9,51
0,27	0,6180	3,271	9,39
0,271	0,7176	2,691	7,72
0,272	0,8172	2,722	7,82
0,273	0,9167	2,489	7,15
0,274	0,0163	2,791	8,01
0,276	1,1882	3,219	9,24
0,282	1,2117	3,111	8,93
0,29	1,2446	2,162	6,21
0,30	1,2446	2,722	7,82

Таблица 2

Значения рабочего усилия F , номинального выходного сигнала $U_{\text{вых}}$, несмещенной оценки генерального среднего \tilde{U} , несмещенной оценки среднего квадратического отклонения S , доверительных границ $\pm \varepsilon$ генерального среднего \tilde{U} при двухсторонней вероятности $\gamma^* = 0,95$, доверительных границ ε_{H} и ε_{B} среднего квадратического отклонения S при двухсторонней доверительной вероятности $\gamma^* = 0,95$ и относительной погрешности δ для полупроводниковых пьезорезистивных преобразователей силы [1]

$F, 10^{-3} \text{H}$	$U_{\text{вых}}, \text{В}$	$\tilde{U}, \text{В}$	$S, 10^{-3} \text{В}$	$\pm \varepsilon, 10^{-4} \text{В}$	$\varepsilon_{\text{H}}, 10^{-3} \text{В}$	$\varepsilon_{\text{B}}, 10^{-3} \text{В}$	$\delta, \%$
1	2	3	4	5	6	7	8
+2,00	+2,00	1,9910	3,268	9,38	2,730	4,065	0,50
+1,75	+1,75	1,7423	3,599	10,40	2,994	4,499	0,50
+1,50	+1,50	1,4933	2,536	7,29	2,117	3,115	0,50
+1,25	+1,25	1,2453	2,572	7,39	2,148	3,200	0,44
+1,00	+1,00	0,9957	2,690	7,90	2,233	3,379	0,50
+0,75	+0,75	0,7472	2,218	6,37	1,852	2,759	0,46
+0,50	+0,50	0,4981	2,171	6,30	1,806	2,714	0,50
+0,25	+0,25	0,2493	1,436	4,12	1,199	1,786	0,44
0,00	$\pm 10^{-4}$	-	-	-	-	-	-
-0,25	-0,25	0,2494	1,516	4,35	1,266	1,886	0,41
-0,50	-0,50	0,4989	3,538	10,20	2,954	4,401	0,42
-0,75	-0,75	0,7475	2,488	7,14	2,077	3,095	0,43
-1,00	-1,00	0,9966	2,496	7,17	2,084	3,105	0,42
-1,25	-1,25	1,2461	2,746	7,88	2,293	3,416	0,38
-1,50	-1,50	1,4942	2,739	7,86	2,285	3,405	0,44
-1,75	-1,75	1,7426	2,600	7,47	2,171	3,234	0,47
-2,00	-2,00	1,9911	2,795	8,03	2,334	3,477	0,49

Таблица 3

Зависимость первоначального нерабочего усилия F_0 , рабочего диапазона усилия $\Delta F_{\text{раб}}$, рабочего диапазона тока $\Delta I_{\text{раб}}$, чувствительность по току от усилия λ_I , чувствительность по напряжению от усилия λ_n и максимального давления в контакте пьезодиода P_{max} от значения радиуса закругления r сферического кончика индентора пьезодиода

r мкм	F_0 , 10^{-2} Н	$\Delta F_{\text{раб}}$, 10^{-2} Н	$\Delta I_{\text{раб}}$, мА	λ_I , мА/Н	λ_n , В/Н	P_{max} , 10^9 Н/м ²
1	2	3	4	5	6	7
10	5,1	$\pm 0,1$	$\pm 0,12$	120	1200	11,38
20	11,4	$\pm 0,15$	$\pm 0,155$	103	1030	9,43
30	27,2	$\pm 0,2$	$\pm 0,201$	100,5	1005	9,62
40	52,5	$\pm 1,2$	$\pm 0,49$	40,8	408	9,88
50	78,8	$\pm 0,8$	$\pm 0,225$	28,1	281	9,75
60	106,2	$\pm 0,6$	$\pm 0,182$	30,4	304	9,54

Таблица 4

Значения температуры T , несмещенной оценки генерального среднего \tilde{F}_0 , несмещенной оценки среднего квадратического отклонения S , доверительных границ $\pm \varepsilon$ генерального среднего F_0 при двухсторонней доверительной вероятности $\gamma^* = 0,95$ для полупроводниковых пьезорезистивных преобразователей силн [1]

$T, ^\circ\text{C}$	\tilde{F}_0 , Н	$S, 10^{-3}$ Н	$\pm \varepsilon, 10^{-3}$ Н
1	2	3	4
-73,3	0,355	4,368	1,25
-55,3	0,338	4,521	1,3
-41,7	0,329	4,461	1,28
-25,0	0,315	4,892	1,4
0,0	0,293	4,381	1,26
14,0	0,280	4,91	1,41
28,0	0,269	4,317	1,24
42,7	0,258	4,568	1,3
50,7	0,250	4,125	1,18
-66,0	0,237	3,816	1,1

Таблица 5

Зависимость выходного сигнала преобразователя силы $-[I]$ в мВ от изменения температуры при различных материалах корпуса

T, °C	Материал корпуса преобразователя		
	Ст.3	Ст.45	Ст.50
I	2	3	4
0,0	-2375	-1242	230
2,3	-2208	-1158	209
5,2	-1973	- 997	181
8,4	-1652	- 875	152
11,1	-1378	-732	128
14,6	-1051	-561	97
17,3	- 776	-420	72
19,2	- 578	-331	54
21,4	-356	-184	32
23,7	-134	-71	11
25,0	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$
27,2	227	125	-22
29,0	391	197	-39
31,3	633	341	-61
34,5	947	541	-91
37,6	1245	672	-122
40,1	1517	793	-144
43,3	1823	976	-174
44,9	1979	1064	-188
46,1	2089	1123	-199
50,2	2380	1242	-215
55,4	2580	1370	-249
60,2	2650	1417	-263

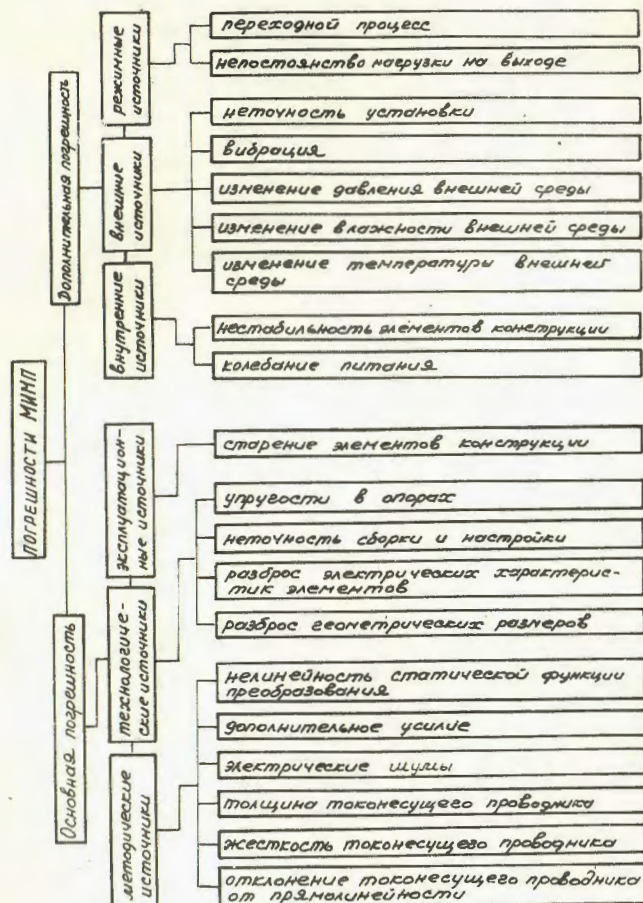


Рис.1 Таблица источников погрешностей магнитометра интегрального магнитного поля

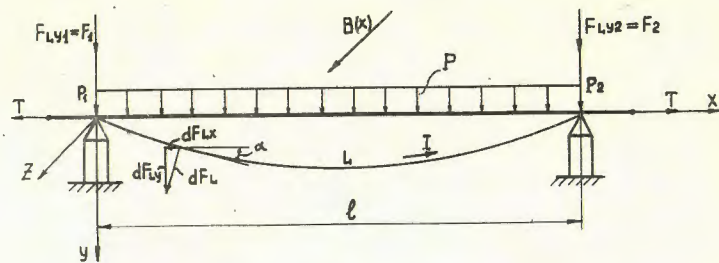


Рис.2 Расположение токонесущего проводника и магнитного поля. Оси чувствительности преобразователей силы направлены вертикально

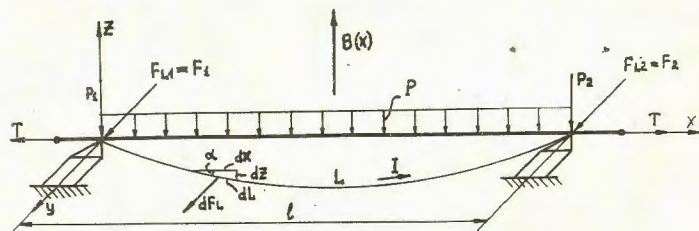


Рис.3 Расположение токонесущего проводника и магнитного поля. Оси чувствительности преобразователей силы направлены горизонтально

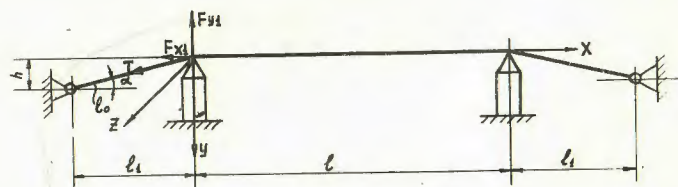


Рис.4 Расположение токонесущего проводника при создании дополнительного усилия

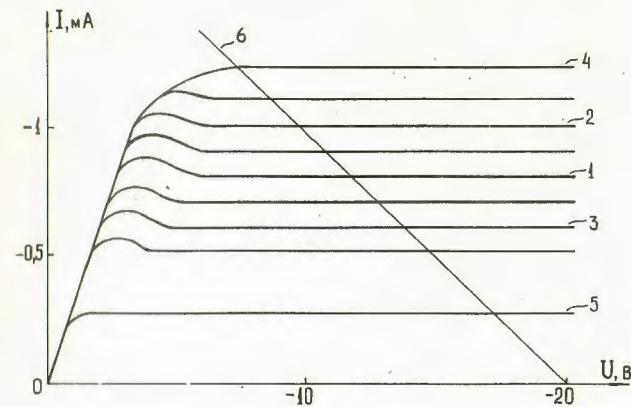


Рис.5 Семейство вольт-амперных характеристик пьезодиода

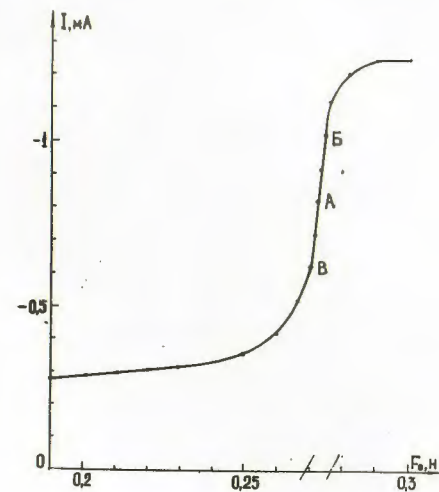


Рис.6 Зависимость тока через пьезодиод от приложенного усилия

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Урихянц В.С. Магнитометр для измерения интеграла магнитного поля вигглер-магнита. Препринт ЕФИ-457(64)-6С. Ереван, 1980 .
2. ГОСТ II.004-74. Прикладная статистика оценок и доверительных границ для параметров нормального распределения. М.: Изд-во стандартов. 1979.
3. ГОСТ 13600-68. Государственная система обеспечения единства измерений. Средства измерений. Классы точности. Общие требования. М.: Изд-во стандартов. 1980.

Рукопись поступила 15 марта 1981 г.

Редактор Л.П.Мукаян

Тех.редактор А.С.Абрамян

Заказ 049

ВФ-05070

Тираж 299

Препринт ЕФИ

Формат издания 60x84/16

Подписано к печати 15/II-82г. I,0 уч.изд.л. Ц. 7 к.

Издано Отделом научно-технической информации
Ереванского физического института, Ереван-36, пер.Маркрянэ 2