

*О. А. Коржавин, Л. Ф. Куликовский*

## **МАГНИТНО-УСИЛИТЕЛЬНЫЙ ДАТЧИК ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С ПОСТОЯННЫМ МАГНИТОМ**

В связи с развитием информационно-измерительных систем для сбора, хранения и переработки значений первичных параметров, как например, усилие, давление, уровень жидкости, расход жидкости и газа и т. д., все более возрастающее значение получают преобразователи, объединяющие в себе различные функции.

К такому роду преобразователей относятся разработанные и исследованные в проблемной лаборатории кафедры «Электроизмерительная техника» Куйбышевского политехнического института им. В. В. Куйбышева магнитно-усилительные датчики линейных перемещений (ДМУ) [1].

Как известно, на выходе обычных индуктивных датчиков линейных перемещений часто ставится усилитель, а для их устойчивой работы требуется также стабилизатор напряжения.

Магнитно-усилительные датчики объединяют в себе свойства индуктивного датчика и магнитного усилителя на базе общей магнитной системы, а путем внесения небольшого изменения в схеме приобретают также свойства стабилизатора напряжения.

Таким образом, рассматриваемые датчики могут измерять перемещения, усиливать выходной электрический сигнал, а также обладают свойством самостабилизации, т. е. являются универсальными.

Магнитная система и электрическая схема одного из таких ДМУ с постоянным магнитом изображена на рис. 1а, 1б, а картина распределения постоянного магнитного потока подмагничивания — на рис. 2.

В исходном положении (рис. 2а) якорь III перекрывает половину каждого из двух О-образных сердечников. Поэтому постоянные магнитные потоки, создаваемые постоянным магнитом в обоих сердечниках, равны и оказывают одинаковое подмагничивающее действие на магнитную цепь обмоток переменного тока  $W \sim$ , намотан-

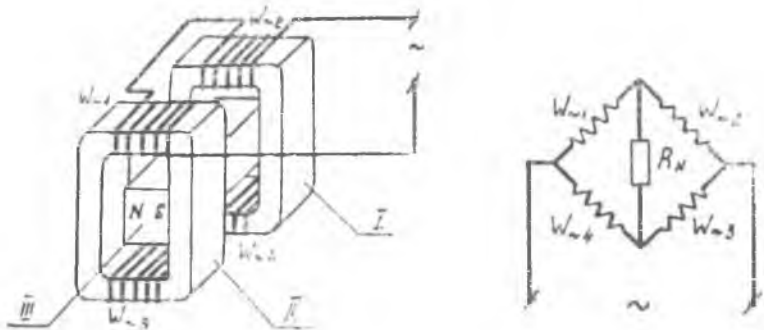


Рис. 1. Конструкция магнитной системы (1а), электрическая схема (1б) магнитно-усилительного датчика с постоянным магнитом.

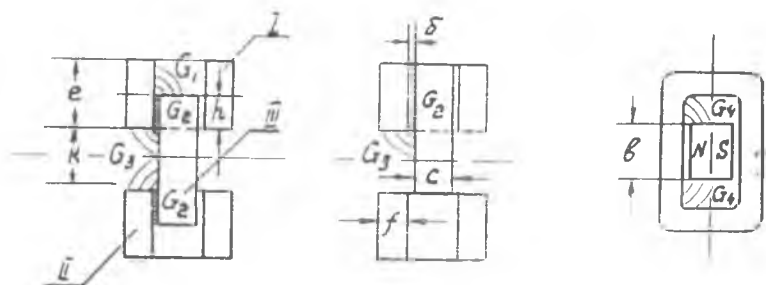


Рис. 2. Картина распределения постоянного магнитного потока в ДМУ.

ных на каждом из сердечников. В результате этого э. д. с. на выходе мостовой схемы рис. 1б, равна нулю.

При перемещении якоря, например, вперед от линии геометрической нейтрали (рис. 2б), им перекрывается большая часть первого сердечника и уменьшается площадь перекрытия второго сердечника. Подмагничивание первого сердечника увеличивается, а подмагничивание второго сердечника уменьшается и на выходе мостовой схемы датчика в сопротивлении  $R_n$  появляется э. д. с. переменного тока соответствующей фазы. Если якорь перемещается в другую сторону, то выходная э. д. с. меняет фазу на противоположную.

Магнитно-усилительный датчик подобного типа, изготовленный в лаборатории отдела «Автоматика и телемеханика» института «Гипровостокнефть», имел следующие параметры: магнитная система выполнена на базе двух витых ленточных О-образных сердечников стали Э-330 с толщиной ленты 0,08 мм сечением сердечника  $S_{cp} = e \cdot f = 15 \times 6$  мм и наружными размерами  $42 \times 24$  мм. Якорь выполнен из анизотропного оксидно-бариевого магнита со следующими данными: длина магнита  $l_m = c = 11$  мм, сечение магнита

$b \cdot (k + e) = 16 \times 30$  мм. Величина воздушного зазора  $\delta = 0,6$  мм. Магнит закреплен в латунной рамке, совершающей измеряемое перемещение. Обмоточные данные катушек изготовленного ДМУ:  $W_{1\sim} = W_{2\sim} = W_{3\sim} = W_{4\sim} = W_{\sim} = 450$  витков, провод ПЭЛШО  $\varnothing 0,2$  мм.

При расчете магнитно-усилительных датчиков с постоянным магнитом необходимо иметь в виду, что в процессе работы магнит якоря перемещается, при этом происходит изменение величины площади воздушного зазора, поэтому индукция в среднем сечении магнита, а значит и в сердечниках ДМУ, меняется по частному циклу кривой размагничивания, т. е. по кривой возврата. Эта кривая обычно [2] заменяется прямой с угловым коэффициентом  $\mu_r$  — проницаемости магнита на частном цикле, уравнение которой имеет вид:

$$\frac{H}{H_{вз}} - \frac{B}{B_{вз}} = 1, \quad (1)$$

где  $H_{вз}$ ,  $B_{вз}$  — величины напряженности и индукции, отсекаемые на координатных осях прямой возврата.

Уравнение прямой приведенной магнитной проводимости (размагничивающего фактора) якоря датчика относительно сердечника (арматуры) выражается [2] как

$$B = H \cdot \operatorname{tg} \alpha = H \cdot G \frac{l_M}{S_M}, \quad (2)$$

где  $l_M$ ,  $S_M$  — длина магнита и площадь его поперечного сечения  
 $G$  — проводимость системы «якорь — сердечник».

Особенностью магнитно-усилительных датчиков в отличие от известных цепей с постоянными магнитами (магнето, поляризованных реле и т. д.) является тот факт, что сечение магнита  $S_M$ , создающее поток подмагничивания, не является величиной постоянной, а меняется при перемещении якоря датчика.

При положении якоря ДМУ с координатой  $h$  совместное решение уравнений (1) и (2) дает значение индукции в среднем сечении магнита:

$$B = \frac{B_{вз}}{\frac{B_{вз}}{H_{вз}} + G_{oh}} \cdot G_{oh}, \quad (3)$$

где  $G_{oh} = G_h \frac{l_M}{S_M}$  — приведенная проводимость магнита — якоря относительно сердечника в положении с координатой  $h$ .

Расчетную зависимость (3) можно упростить, полагая прямую возврата магнита совпадающей с кривой размагничивания, что

практически имеет место для оксидно-бариевых магнитов, ввиду их очень большой коэрцитивной силы. Это видно из рис. 3, где приведена кривая размагничивания такого магнита. Так как в этом случае  $B_{вз} = B_r$  (остаточной индукции), а  $\frac{B_{вз}}{H_{вз}} = \mu_r$ , то зависимость (3) принимает вид:

$$B = \frac{B_r}{\mu_r + G_{oh}} \cdot G_{oh}. \quad (4)$$

Кроме того, при расчете высококоэрцитивных магнитов можно также пренебречь падением м. д. с. в стали сердечников ДМУ, составляющим лишь не-

сколько процентов от величины м. д. с., которую способен создать такой магнит для преодоления сопротивления воздушных зазоров.

Особенность расчета постоянного магнита—якоря ДМУ заключается в том, что в различных его участках имеет место различное значение магнитной индукции, определяемое значением магнитной проводимости соответствующих участков.

Для части магнита — якоря, вошедшей в арматуру (в окно сердечника ДМУ)

$$B_2 = \frac{B_r}{\mu_r + \frac{G_{02} + G_{04}}{2}} \cdot \frac{G_{02} + G_{04}}{2}. \quad (5)$$

Для части магнита—якоря, которая не вошла в окно сердечника ДМУ

$$B_3 = \frac{B_r}{\mu_r + \frac{G_{03}}{2}} \cdot \frac{G_{03}}{2}. \quad (6)$$

Для бокового торца магнита—якоря

$$B_4 = \frac{B_r}{\mu_r + \frac{G_{01}}{4}} \cdot \frac{G_{01}}{4}. \quad (7)$$

где значения рабочей проводимости  $G_2$ , проводимостей выпучивания и рассеивания  $G_1, G_3, G_4$  с некоторым допущением могут быть определены на основании расчетных зависимостей, приведенных в [3], [4] как

$$G_1 = \frac{2\lambda_1 b}{\pi} \ln 1,76 \left( \frac{e}{\delta} - 0,5 \right),$$

где

$$(e - h)_{\max} < \frac{c}{2}$$

$$G_2 = \frac{\mu_0 b h}{\delta} \quad (8)$$

$$G_3 = \frac{2\mu_0 b}{\pi} \ln 1,76 \left( \frac{l}{\delta} + 0,5 \right)$$

$$G_4 = \frac{2\mu_0 h}{\pi} \ln 1,76 \left( \frac{C}{2\delta} + 0,5 \right).$$

Отметим, что в зависимостях (5) и (7) учитывается среднее значение м. д. с. на участках магнита с проводимостью  $G_1$  и  $G_4$ .

Значение же сечений перечисленных выше участков магнита — якоря, необходимых для расчета соответствующих приведенных магнитных проводимостей, определяется как

$$\begin{aligned} S_{M1} &= \frac{b \cdot c}{2}, \\ S_{M2} &= b \cdot h, \\ S_{M3} &= \frac{b \cdot k}{2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Результирующее значение постоянной магнитной индукции в сердечнике ДМУ  $B_0$  равно

$$B_0 = B_1 \frac{S_{M1}}{2 \cdot S_{\text{ср}}} + B_2 \frac{S_{M2}}{2 \cdot S_{\text{ср}}} + B_3 \frac{S_{M3}}{2 \cdot S_{\text{ср}}}. \quad (10)$$

Для магнитно-усилительного датчика с постоянным магнитом, выполненным на вышеприведенные параметры, расчетные значения проводимостей и магнитных индукций сведены в таблицу 1.

Таблица 1

№	h	G <sub>2</sub>	G <sub>02</sub> + G <sub>04</sub>		B <sub>1</sub> $\frac{S_{M1}}{2 \cdot S_{\text{ср}}}$	B <sub>2</sub> $\frac{S_{M2}}{2 \cdot S_{\text{ср}}}$	B <sub>3</sub> $\frac{S_{M3}}{2 \cdot S_{\text{ср}}}$	B <sub>0</sub>
			$\frac{2}{a}$					
	м.м	$\frac{b\delta}{a}$	$\frac{b\delta}{a}$	$\frac{b\delta}{a}$	$\frac{b\delta}{\text{м}^2}$	$\frac{b\delta}{\text{м}^2}$	$\frac{b\delta}{\text{м}^2}$	$\frac{b\delta}{\text{м}^2}$
1	0	0			0,071	0	0,12	0,191
2	2	6,7 · 10 <sup>8</sup>	12,3 · 10 <sup>6</sup>		0,071	0,052	0,12	0,243
3	4	13,4 · 10 <sup>8</sup>	12,3 · 10 <sup>6</sup>		0,071	0,104	0,12	0,295
4	6	20,2 · 10 <sup>8</sup>	12,3 · 10 <sup>6</sup>		0,071	0,156	0,12	0,347
5	8	26,8 · 10 <sup>8</sup>	12,3 · 10 <sup>6</sup>		0,071	0,208	0,12	0,399
6	10	33,5 · 10 <sup>8</sup>	12,3 · 10 <sup>6</sup>		0,071	0,26	0,12	0,451
7	12	40,2 · 10 <sup>8</sup>	12,3 · 10 <sup>6</sup>		0,0624	0,312	0,12	0,494
8	14	47 · 10 <sup>8</sup>	12,3 · 10 <sup>6</sup>		0,0383	0,365	0,12	0,523

На рис. 4 представлены расчетная, изображенная пунктиром, и экспериментальная, изображенная сплошной линией, зависимости  $B_0 = f(h)$ .

Для снятия последней с помощью баллистического гальванометра измерялся магнитный поток в сердечнике ДМУ при выдерживании из него магнита—якоря, опущенного на соответствующую величину  $h$ . Как видно из рис. 4 отклонение расчетной величины индукции от экспериментальной не превышает 10%, что является вполне удовлетворительным.

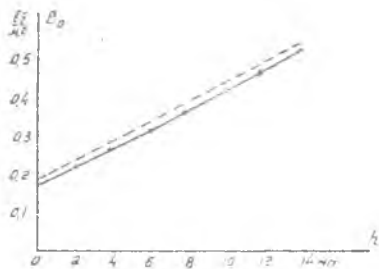


Рис. 4. Расчетная и экспериментальная снятая зависимости постоянной составляющей индукции в сердечнике ДМУ в функции перемещения якоря.

Полученная линейная зависимость величины постоянной слагающей индукции в сердечниках рассматриваемого ДМУ от величины перемещения якоря обуславливает, как будет видно из дальнейшего, линейность характеристики «вход.—выход» магнитно-усилительного датчика.

Для определения электрических параметров цепи переменного тока ДМУ целесообразно использовать графоаналитический метод расчета двухтактных магнитных усилителей, основанный на применении к нелинейной цепи переменного тока метода холостого хода и короткого замыкания, изложенный в [5], [6], распространив его на случай, когда за изменяющуюся величину постоянного подмагничивания принимается не напряженность, а индукция подмагничивающего поля. Такое развитие метода [5], [6] применительно к магнитно-усилительным датчикам вполне обосновано, если индукция подмагничивающего поля меняется по линейному закону в функции перемещения якоря  $h$ .

Значение переменных составляющих индукции в сердечниках ДМУ определяется напряжением источника питания и значением постоянных составляющих подмагничивающих полей в каждом сердечнике:

$$\begin{aligned} B_{01} &= B_{\text{оср}} - \Delta B_0 \\ B_{02} &= B_{\text{оср}} + \Delta B_0, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $B_{\text{оср}}$  — постоянная составляющая индукции в сердечнике ДМУ при положении якоря на линии геометрической нейтрали.

Как следует из рис. 4, этому положению якоря при  $h = 7,5$  мм соответствует

$$B_{\text{оср}} = 0,35 \frac{h_0}{\mu^2}.$$

На основании метода [5], [6] и выше сказанного для цепи переменного тока ДМУ необходимо построить зависимости

$U_{xx} = f(B_0)$ ,  $I_{кз} = f(B_0)$ , а затем, с учетом сопротивления нагрузки, перейти к зависимости  $I = f(B_0)$ . Для построения зависимости  $U_{xx} = f(B_0)$  следует наложить на семейство кривых одновременного намагничивания переменным и постоянным полями сердечника ДМУ вида  $B_m = f(H_m, B_0)$  семейство  $B_c - B_m = B_c - f(H_m, B_0)$ , причем

$$B_c = \frac{U}{4 \cdot k_f \cdot f \cdot S_{cp} W} \quad (12)$$

Точки пересечения кривых обоих семейств, соответствующих одному значению постоянной индукции  $B_0$ , определяют переменную слагающую индукции в каждом сердечнике  $B_{1m}$  и  $B_{2m}$ . Тогда

$$U_{xx} = 4 \cdot k_f \cdot f \cdot W \sim S_{cp} (B_{1m} - B_{2m}). \quad (13)$$

Для построения зависимости

$$I_{кз} = f(B_0) = \frac{l}{\sqrt{2} W} (H_{1m} - H_{2m}) \quad (14)$$

значения  $H_{1m}$  и  $H_{2m}$  определяются точками пересечения кривых  $B_m(H_m, B_0)$  с прямой  $B_m = \frac{1}{2} B_c = \text{const}$ .



Рис. 5. Семейство кривых одновременного намагничивания для стали Э-330 с толщиной ленты 0,08 м.м.

На рис. 5 представлено семейство кривых одновременного намагничивания  $B_m = f(H_m, B_0)$  для материала магнитопровода ДМУ, снятое с помощью миллиберметра М-119, а на рис. 6а и 6б расчетные зависимости  $U_{xx} = f(B_0)$ ,  $I_{кз} = f(B_0)$  и  $U_{xx} = f(I)$ , причем, последняя зависимость рассчитана для случая работы ДМУ на самопишущий миллиамперметр Н-370, имеющий  $R_n = 21 \text{ ом}$  с учетом активного сопротивления обмоток, равного 19 ом.

Исключая из двух найденных зависимостей  $U_{xx} = f(B_0)$  и  $U_{xx} = f(I)$  напряжение холостого хода, находим характеристику  $I = f(B_0)$ , которая с учетом уже известной зависимости  $B_0 = f(h)$  может быть представлена как искомая характеристика «вход—выход ДМУ»:  $I = f(h)$ . На рис. 6в представлены расчетная, изображенная пунктиром, и экспериментально снятая, изображенная сплош-

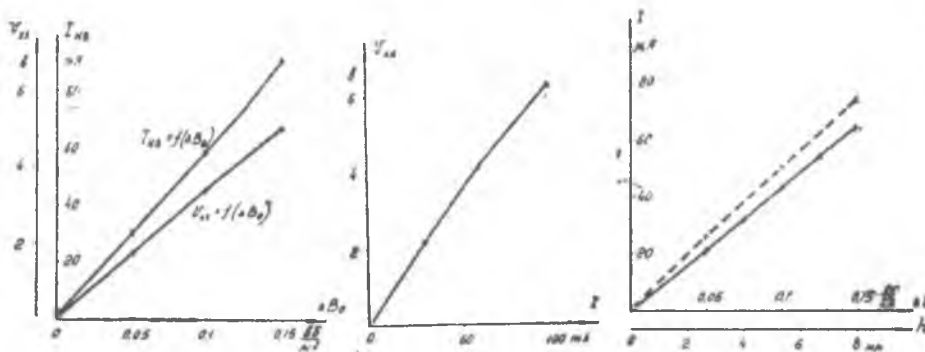


Рис. 6. Расчетные зависимости напряжения холостого хода и короткого замыкания ДМУ (6а, 6б) и расчетная и экспериментально снятая характеристика „вход—выход ДМУ“  $I = f(h)$ .

ной линией, зависимость  $I = f(h)$ . Как видно из этого рисунка, отклонение расчетной зависимости от экспериментальной не превышает 13%. Одной из причин этой погрешности является значительное отступление формы кривой тока  $I$  от синусоидальной.

Экспериментально определенный коэффициент формы выходного тока ДМУ  $K_f$  составлял 1,24, а коэффициент искажения  $K_n$  — 0,94. Исследования, проведенные с рассматриваемым ДМУ, показали, что при напряжении питания  $U_{\sim} = 25$  в, частотой 50 гц в диапазоне перемещений  $0 \div 8$  мм на нагрузку  $R_n = 50$  ом датчик отдавал мощность порядка 0,1 вт., имея коэффициент полезного действия порядка 15%, а при  $R_n = 1000$  ом чувствительность датчика составляла 1 в/мм. При работе на самопишущий миллиамперметр Н-370 с пределом  $0-50$  мА (сопротивление самописца на указанном пределе равно 21 ом) чувствительность датчика составляла 8 ма/мм. При этом нелинейность выходной характеристики составляла 1,5%, а изменение фазы выходного тока, определенное с помощью компенсатора переменного тока КПТ-1, составляло порядка 7°. Значительное изменение фазы выходного тока, которое характерно для всякого магнитного усилителя, делает нецелесообразным сочетание магнитно-усилительного датчика с приборами ферродинамической системы.

Экспериментально определенная вероятная основная погрешность при работе ДМУ на прибор магнитоэлектрической системы класса 1,5 составляла 1,5%.



При питании ДМУ напряжением несинусоидальной формы (от феррорезонансного стабилизатора типа СНЭ-120-0,1) с  $K_{\phi} = 1,06$  и  $K_n = 0,98$  погрешность в показаниях выходной величины составляла 1,6% по сравнению с синусоидальной формой кривой питания.

Отметим, что в действительности искажения формы кривой питающего напряжения не достигают таких значений, а поэтому данная погрешность в реальных условиях заметно меньше.

Влияние колебания напряжения и частоты питания на характеристики ДМУ можно определить с помощью вышерассмотренного метода холостого хода и короткого замыкания.

При изменении напряжения или частоты питания, как это следует из (12), меняются величины  $\frac{1}{2} B_c$  и  $B_s$  на рис. 5. Вследствие этого кривые одновременного намагничивания пересекаются в других точках и по ним определяют характеристики холостого хода, короткого замыкания и далее — выходную характеристику ДМУ при новом значении напряжения или частоты питания.

Как показывает расчетный и экспериментальный анализ, колебания напряжения и частоты питания сильно сказываются на показаниях ДМУ, в то время как в обычных двухтактных магнитных усилителях они оказывают относительно слабое влияние.

Такая существенная разница в свойствах магнитного усилителя и рассматриваемого магнитно-усилительного датчика, являющихся цепями со сталью, подмагничиваемых постоянным сигналом управления, объясняется принципиальной разницей характеристик одновременного намагничивания магнитного материала при постоянной напряженности подмагничивающего поля (в обычных магнитных усилителях) и при постоянной индукции подмагничивающего поля (в ДМУ с постоянным магнитом).

Это хорошо видно на примере, приведенного на рис. 5 семейства характеристик  $B_m = f(H_m)$  при  $B_0 = var$ , где даже весьма небольшое изменение переменной слагающей индукции, т. е. напряжения питания, вызывает при данном значении  $B_0$ , т. е. при фиксированном положении магнита—якоря ДМУ, значительное изменение напряженности переменного поля, т. е. тока в дросселях ДМУ и его нагрузке.

Это объясняется горизонтальным расположением характеристик указанного семейства в его рабочей области в то время как широко представленные в литературе по магнитным усилителям характеристики одновременного намагничивания типа  $B_m = f(H_m)$  при  $H_0 = var$  имеют в своей рабочей зоне вертикальное расположение. Такая специфическая особенность магнитного усилителя, подмагничиваемого постоянным магнитом, отмечается также в [7], где по этой же причине заметно ухудшалось качество рассматриваемых там стабилизаторов тока.

Можно, однако, предложить целый ряд схем, в которых отмеченная выше особенность обуславливает существенную стабилизацию

ДМУ при колебании напряжения питания. Для этого необходимо использовать магнитно-усилительный датчик как нелинейную индуктивность, которая при последовательном соединении со значительным линейным активным сопротивлением или с емкостью (за счет феррорезонанса напряжений) сама становится стабилизатором напряжения. Так при включении в цепь питания мостовой схемы рис. 1 б балластного активного сопротивления в 1 ком. (для уменьшения потерь его следует брать индуктивным) при колебании напряжения питания в пределах  $+5 \div -10\%$  изменения в показаниях ДМУ составляли 1,5%, а при колебании сети на  $+10\% \div -15\% - 2,5\%$ . При этом чувствительность датчика не отличалась от предыдущей, а нелинейность выходной характеристики составляла 1,5%. При изменении частоты питания на 1% от 50 гц в этом случае изменения в показаниях ДМУ составляли 0,6%, а отклонение формы питающего напряжения от синусоидальной в выше указанных пределах вызывало погрешность в 2,5%.

Использование нелинейной индуктивности ДМУ в режиме феррорезонанса целесообразно в случае высокоомной нагрузки, так как низкоомная нагрузка заметно снижает величину эквивалентной нелинейной индуктивности мостовой схемы рис. 1 б и резкого режима феррорезонанса не имеет места. Так при включении в цепь питания мостовой схемы конденсатора  $C = 10 \mu F$  при  $R_n = 21 \text{ ом}$  (самопишущий миллиамперметр Н-370) в режиме феррорезонанса при колебании напряжения питания на  $+5\% \div -10\%$  погрешность в показаниях ДМУ составляла 2,5%. линейность же выходных характеристик была хуже, чем в выше приведенных случаях. В случае же использования ДМУ как датчика напряжения схема феррорезонанса дает весьма высокие результаты. Так при  $R_n = 1000 \text{ ом}$  в этом случае при колебании напряжения сети на  $+10 \div -30\%$ , погрешность в показаниях ДМУ составляла 2,5%, а от изменения частоты питания на 1% от 50 гц — 1,1%. При этом нелинейность выходной характеристики составляла 2,5%.

Таким образом, рассматриваемый ДМУ при включении на приборы непосредственной оценки обеспечивает их нормальную работу при питании от сети без применения стабилизаторов напряжения. То есть магнитно-усилительный датчик с постоянным магнитом выполняет одновременно три функции: измерителя перемещений, магнитного усилителя и стабилизатора питающего напряжения.

При оценке температурной погрешности магнитно-усилительного датчика необходимо иметь в виду, что если в обычных индуктивных датчиках основной причиной этой погрешности является изменение активного сопротивления меди обмоток, то в данном случае, в виду большого значения добротности, температурная нестабильность ДМУ определяется в основном температурным коэффициентом оксидно-бариевых магнитов, являющегося отрицательным и составляющим  $0,18 \div 0,2\%/\text{град}$  и в меньшей степени температурной зависимостью магнитной проницаемости материала магнито-

провода, влияние которой в определенной степени компенсируется изменением активного сопротивления обмоток ДМУ.

Экспериментально определенная для ДМУ на вышеприведенные параметры температурная погрешность в диапазоне  $-15^{\circ}\text{C} + 55^{\circ}\text{C}$  составляла в среднем 2% на  $10^{\circ}\text{C}$ .

Заметим, что так как характер изменения показаний магнитно-усилительного датчика с изменением температуры при его соответствующей линейной аппроксимации является таким же, как и в случае изменения активного сопротивления меди в электроизмерительных приборах, то для снижения температурной погрешности в рассматриваемом случае могут быть с успехом использованы известные схемы температурной компенсации с помощью полупроводниковых термосопротивлений.

Объем статьи не позволяет подробно останавливаться на особенностях методики расчета температурного компенсатора для магнитно-усилительных датчиков данного типа. Укажем, однако, что для рассматриваемого ДМУ при включении последовательно с нагрузкой  $R_n = 200 \text{ ом}$  термосопротивления ММТ-8, имеющего при  $t = 20^{\circ}\text{C}$   $R_T = 160 \text{ ом}$ , шунтированного манганиновым сопротивлением  $R_m = 100 \text{ ом}$ , в вышеуказанном диапазоне изменения температур температурная погрешность не превышала 1%  $\pm$  1,1%, т. е. была почти в 14 раз меньше, чем без термокомпенсации. При этом в сопротивлении термокомпенсатора терялось лишь 15% полезного напряжения выходного сигнала.

Внешние переменные магнитные поля не оказывают заметного влияния на показания ДМУ. При поднесении вплотную к алюминиевому корпусу ДМУ оксидно-бариевого магнита размерами с якорь датчика, имеющего на поверхности напряженность поля порядка нескольких десятков  $\frac{\text{ка}}{\text{м}}$ , изменения в показаниях датчика составляли порядка 2,5%, т. е. ДМУ относится к приборам 1-й категории защищенности.

Существенным положительным качеством рассматриваемого магнитно-усилительного датчика является малая величина электромагнитных тяговых сил и полное отсутствие вибраций якоря. Экспериментально определенные с помощью пружинного динамометра электромагнитные силы не превышали 30 г.

Магнитно-усилительные датчики, как всякие датчики с переменной площадью воздушного зазора, особо эффективны для измерения перемещений порядка нескольких миллиметров. Поэтому интерес представляет сравнить их по эффективности с известными индуктивными датчиками, например, плунжерного типа, описанными в [8], применяющимися для измерения таких же перемещений и имеющих также малые тяговые усилия.

В [8] приводятся данные, что индуктивный датчик типа ИД-1 в диапазоне 0—4 мм создавал изменение тока, равное 3 ма, а индукционный трансформаторный датчик типа ВГ-194 при перемещении плунжера на 4 мм развивал напряжение 0,25 в в нагрузке 900 ом.

При этом оба вышеуказанных датчика имели соизмеримые габариты и подводимую мощность с рассматриваемым ДМУ. Таким образом, магнитно-усилительный датчик имеет выходное напряжение на порядок, а выходную мощность — на два порядка больше, чем у плунжерных индуктивных датчиков.

Поэтому, если указанные выше плунжерные датчики работают обычно [8] на электронные приборы типа ЭПП, ЭПВД и т. д., то ДМУ, как было показано выше, развивает мощность, достаточную для работы не только указывающего, но и самопишущего прибора стрелочного типа.

Описанный магнитно-усилительный датчик предназначен для использования в расходомерах и плотномерах, разрабатываемых отделом «Автоматика и телемеханика» института «Гипровосток-нефть».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. О. А. Коржавин. Магнитно-усилительные датчики линейных перемещений. «Известия высших учебных заведений», серия «Электромеханика», № 1, 1964.

2. Ф. А. Ступень. Электромеханические реле. Харьков, 1956.

3. А. С. Садовский. Проходной индуктивный датчик. «Автоматика и телемеханика», № 6, 1954.

4. О. А. Коржавин. Исследование индуктивного преобразователя с магнитопроводом слоистого типа». Известия высших учебных заведений, серия «Приборостроение», № 3, 1963.

5. М. Е. Поюровский. Графоаналитический расчет характеристик двухтактных магнитных усилителей. «Электричество», № 7, 1956.

6. М. А. Розенблат. Магнитные усилители, ч. II, Советское Радио, 1960.

7. М. А. Розенблат, Н. П. Васильева. Применение дросселей, подмагничиваемых постоянным магнитным полем, в качестве стабилизаторов тока. «Автоматика и телемеханика», № 6, 1952.

8. Д. И. Агейкин и др. «Датчики систем автоматического контроля и регулирования», Москва, 1959.