

Н. Н. ГОЛУБЕВ, В. И. ЗАЙЦЕВ, Е. Ф. ФУРМАКОВ
(Ленинград)

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С ДИСКРЕТНО РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

При измерении количества и расхода подвижных сред, автоматизации путевых устройств, контроле линейных и угловых размеров возникает задача преобразования больших перемещений или их производных по времени в электрическую величину.

Среди датчиков больших перемещений получили распространение электромагнитные преобразователи, в особенности амплитудные взаимноиндуктивные преобразователи с распределенными параметрами [1, 2], счетные преобразователи на основе магнитных сдвигающих регистров [3, 4] и электромагнитные преобразователи пространственного кодирования [5]. Первые из них отличаются простотой и надежностью, однако обладают низкими значениями точности и линейности, падающими с ростом рабочего диапазона. Вторые и третьи, наоборот, характеризуются высокой точностью и линейностью, но конструктивно сложны и ненадежны. Причины этого кроются, с одной стороны, в том, что амплитудное преобразование больших перемещений существенно затрудняется наличием мультипликативных составляющих погрешности и неравномерностью распределения удельных электромагнитных параметров по длине датчика; изготовление преобразователей с однородными электромагнитными свойствами в продольном направлении связано со значительными технологическими трудностями. В то же время конструкции амплитудных преобразователей с распределенными параметрами базируются на использовании небольшого числа элементов и, как правило, достаточно просты. С другой стороны, при счетном и кодовом преобразовании больших перемещений погрешность прибора носит практически аддитивный характер, а равномерность размещения отдельных пороговых элементов по длине датчика не представляет трудностей. Однако сами пороговые элементы в этом случае являются дискретными не только в информационном, но и в конструктивном смысле. Поэтому число N отдельных, механически разобщенных функциональных элементов дискретного датчика, так же как и число N' межэлементных соединений, достигает больших значений, становясь принципиальным препятствием на пути повышения надежности:

$$N \geq \frac{X}{2\delta}, \quad N' \geq \frac{X}{2\delta} + 1,$$

где X — диапазон, а δ — абсолютная погрешность измерения.

Надежность пространственно-кодирующих устройств, помимо указанной причины, снижается из-за наличия электроконтактных линий связи с подвижным считывающим органом.

В связи с этим представляет интерес разработка метода, позволяющего рационально сочетать точность дискретных преобразователей и конструктивную простоту амплитудных датчиков с распределенными параметрами. В основу такого метода можно положить широко используемый в технике интегральной микроэлектроники принцип функциональной интеграции.

Применительно к преобразователям параметров движения условия интеграции можно сформулировать следующим образом: минимизация числа конструктивно обособленных функциональных элементов и межэлементных соединений; неразрывность конструктивной линии и информационной цепи каждого функционального элемента; совмещенность компонентов конструктивной линии с элементами информационной цепи; периодичность изменения продольных параметров информационной цепи.

Последовательное осуществление условий интеграции, дополненных требованиями о недопустимости контактной связи с подвижным органом и о минимизации поперечных размеров функционального элемента при практически неограниченной длине последнего, привело к созданию дискретных измерительных устройств [6—9], которые по аналогии с датчиками, предложенными в [1], могут быть названы преобразователями с дискретно распределенными параметрами.

Основным функциональным элементом этих устройств является дискретный чувствительный элемент, представляющий собой стержень с периодически распределенными по его длине дискретными участками. Структура участков такова, что их электрические или магнитные свойства, а следовательно, и электромагнитные параметры всего элемента скачкообразно изменяются по мере перехода от участка к участку. Элемент подобного типа может использоваться для преобразования перемещения источника сосредоточенного электромагнитного поля в число изменений некоторых параметров электрической величины.

В зависимости от свойств дискретных участков можно различать элементы с дискретно распределенными электрическими, магнитными или электромагнитными параметрами (рис. 1, $a—z$).

В качестве примера чувствительного элемента с дискретно распределенными электрическими параметрами рассмотрим дроссель с дискретной обмоткой (см. рис. 1, a). Он состоит из прямого незамкнутого магнитного сердечника, несущего распределенную обмотку, разделенную на несколько дискретных, периодически повторяющихся участков. В простейшем случае дроссель может быть выполнен по типу рояльной струны и представлять собой отрезок ферромагнитной проволоки с навитой по всей ее длине однослойной неразрывной секционированной обмоткой, направление которой изменяется от секции к секции.

При перемагничивании сердечника внешним сосредоточенным полем, например полем катушки с переменным током (рис. 2, a), в обмотке индуцируется напряжение, представляющее собой алгебраическую сумму напряжений, возникающих в отдельных секциях:

$$U = \sum_{i=1,3,5,\dots}^{i=n-1} U_i - \sum_{i=2,4,6,\dots}^{i=n} U_i = WS \frac{d}{dt} \left(\sum_{i=2,4,6,\dots}^{i=n} B_{cpi} - \sum_{i=1,3,5,\dots}^{i=n-1} B_{cpi} \right), \quad (1)$$

где W — число витков секции обмотки; n — число секций; S — площадь поперечного сечения сердечника; B_{cpi} — среднее значение продольной магнитной индукции на участке сердечника, соответствующем секции i .

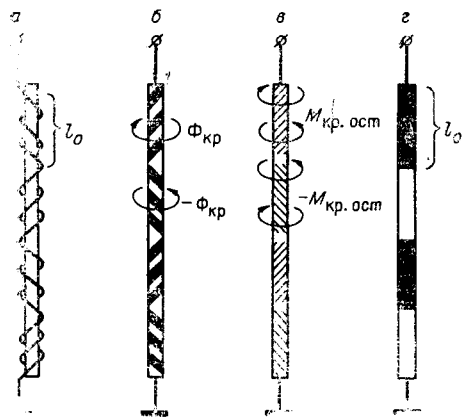


Рис. 1. Интегральные чувствительные элементы:

a — с дискретно распределенной электрической цепью; *б* — с дискретно распределенной магнитной цепью; *в* — с дискретно распределенными электромагнитными параметрами; *г* — условное изображение.

Если обмотка дросселя равномерна, а длина катушки не превышает длины секции, то при $L^2 \gg S$ в выражении (1) можно пренебречь влиянием удаленных от катушки секций.

Тогда, ограничиваясь случаем синусоидально изменяющейся индукции, получим

$$U = \pi \sqrt{2} f S \frac{W}{l_0} \left(\int_{l_k - \frac{l_0}{2}}^{l_k + \frac{l_0}{2}} B_l dl - \int_{l_k - \frac{3l_0}{2}}^{l_k - \frac{l_0}{2}} B_l dl - \int_{l_k + \frac{l_0}{2}}^{l_k + \frac{3l_0}{2}} B_l dl \right), \quad (2)$$

где B_l — значение индукции в сечении сердечника, расположенном на расстоянии l от начала отсчета (см. рис. 2, б); f — частота изменения индукции.

Из (2) и рис. 2, б следует, что фаза выходного напряжения будет зависеть от направления обмотки на участке k при выполнении одного из условий:

$$\int_{l_k - \frac{l_0}{2}}^{l_k + \frac{l_0}{2}} B_l dl > 2 \int_{l_k - \frac{3l_0}{2}}^{l_k - \frac{l_0}{2}} B_l dl; \quad \int_{l_k + \frac{l_0}{2}}^{l_k + \frac{3l_0}{2}} B_l dl > 2 \int_{l_k + \frac{l_0}{2}}^{l_k + \frac{3l_0}{2}} B_l dl, \quad (3)$$

которое можно обеспечить выбором l_0 при фиксированной длине катушки.

Таким образом, при перемещении катушки вдоль дросселя фаза выходного напряжения будет периодически изменяться на противоположную (см. рис. 2, в). Число таких изменений фазы определяется отношением $m = l_k / l_0$, функция преобразования датчика перемещения имеет вид

$$l = l_k \pm \frac{l_0}{2} = l_0 \left(m \pm \frac{1}{2} \right). \quad (4)$$

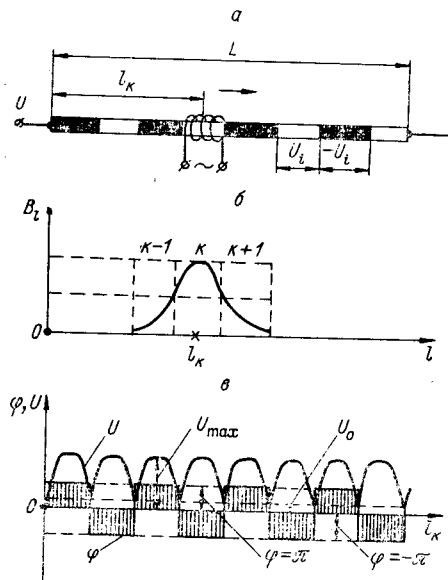


Рис. 2. Преобразователь с дискретно распределенными электрическими параметрами:

a — возбуждение дискретного чувствительного элемента электромагнитным полем подвижной катушки; *б* — распределение магнитной индукции по длине сердечника чувствительного элемента; *в* — фазовая и амплитудная характеристики преобразователя.

целью параллельно дискретному чувствительному элементу устанавливается возбуждающий элемент — дроссель с непрерывно распределенной обмоткой (рис. 3, а). Роль считывающего органа выполняет короткозамкнутая гильза, охватывающая оба дросселя. При подключении об-

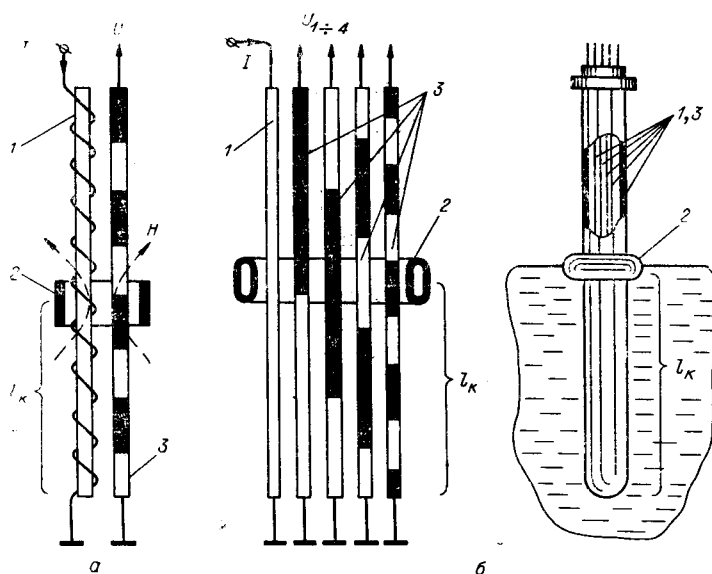


Рис. 3. Бесконтактное возбуждение счетного (а) и кодирующего (б) преобразователей:

1 — возбуждающий дроссель с непрерывно распределенной обмоткой; 2 — подвижный короткозамкнутый виток; 3 — дискретные чувствительные элементы.

мотки возбуждающего элемента к источнику переменного тока I в гильзе индуцируются круговые токи и она становится источником продольного переменного поля. Перемещение l_h гильзы преобразуется в число изменений фазы или амплитуды выходного напряжения в соответствии с (4).

Анализ преобразователей, выполненных на основе дросселей с дискретными обмотками, показывает, что они отвечают большинству условий интеграции. В частности, число конструктивно обособленных функциональных элементов и межэлементных соединений составляет $N = N' - 1 \leq 4$ для счетных и $N = N' - 1 \leq \log_2 \frac{X}{2\delta} - 1$ для кодирующих преобразователей; конструктивная линия (магнитный сердечник) и информационная цепь (секционированная обмотка) каждого функционального элемента механически неразрывны. Элементы бесконтактной возбуждающей системы также интегрированы.

Частично выполненным остается условие совмещенности информационных и конструктивных компонентов. Однако и оно может быть реализовано путем перехода от навиваемых обмоток к печатным.

Интересной особенностью дросселя с печатной дискретно распределенной обмоткой является возможность его конструктивного обращения. Эта операция приводит к следующей разновидности рассматриваемых устройств — преобразователям с дискретно распределенными магнитными параметрами. Чувствительный элемент такого преобразователя (см. рис. 1, б) представляет собой электропроводный немагнитный стержень, несущий группу распределенных по его длине спиральных ленточ-

ных магнитопроводов. Он может быть выполнен из металлической проволоки, отдельные участки которой покрыты винтообразными магнитными пленками с периодически изменяющимися направлениями закручивания.

При перемагничивании пленки внешним полем в ней возникает винтовая магнитный поток Φ , содержащий круговую составляющую $\Phi_{кр}$. Под действием $\Phi_{кр}$ в i -м участке проволоки индуцируется продольное напряжение

$$U_i = - \frac{d}{dt} \Phi \sin \beta = c l_0 \Delta \sin \beta \frac{dB_{срi}}{dt}, \quad (5)$$

где $\beta \leq \frac{\pi}{4}$ — угол подъема винтовой оси пленки; c — конструктивный коэффициент; Δ — толщина пленки.

Выражения для напряжения, действующего на концах стержня, составляются аналогично формулам (1), (2); функция преобразования датчика перемещения, выполненного на базе чувствительных элементов с дискретно распределенными магнитными параметрами, совпадает с (4).

Дальнейшее развитие дискретных интегральных преобразователей параметров движения возможно на основе использования физических явлений, возникающих при изменении структуры материала. Примером элемента с дискретно распределенными электромагнитными параметрами, основанного на применении такого явления, может служить элемент, принцип действия которого заключается в использовании обратного эффекта Видемана. Этот эффект относится к магнитоупругим явлениям и возникает при намагничивании закрученных ферромагнитных образцов [10]. В соответствии с эффектом в закрученной ферромагнитной проволоке, перемагничиваемой продольным полем, индуцируется э.д.с. Видемана [11]

$$E_i = \xi f l_0 B_{ср} \frac{M_{кр}}{r^2}, \quad (6)$$

где ξ — коэффициент, характеризующий магнитоупругие свойства используемого материала; f — частота изменения индукции; $B_{ср}$ — среднее значение продольной индукции на участке проволоки радиусом r ; $M_{кр}$ — крутящий момент.

Если последовательно расположенные участки проволоки необратимо закручены во взаимно противоположных направлениях (см. рис. 1, в), каждому из них соответствует э.д.с. E_i , фаза которой определяется направлением остаточного крутящего момента $M_{кр,ост}$.

Выражение для э.д.с., действующей на концах проволоки, и функция преобразования датчика перемещения составляются подобно (1), (2) и (4).

Преобразователи с использованием обратного эффекта Видемана удовлетворяют всем условиям интеграции и отличаются элементарной простотой и высокой надежностью.

На основе дискретных чувствительных элементов могут быть созданы не только счетные, но и кодирующие датчики перемещений, скоростей и ускорений. На рис. 3, б приведены схема и общий вид преобразователя уровня неэлектропроводной жидкости в параллельный двоичный код. Преобразователь содержит интегральные чувствительные элементы, дискретные участки которых расположены в соответствии с видом выбранного кода, возбуждающий элемент и считывающий элемент — короткозамкнутый виток, выполненный в виде пустотелого металлического поплавка тороидальной формы. Каждому положению по-

плавка отвечает определенная кодовая комбинация фаз выходных напряжений U_{1-4} , соответствующая двоичному числу M . Функция преобразования уровнемера имеет вид

$$2l = l_0 \left(M \pm \frac{1}{2} \right). \quad (7)$$

Отметим, что при измерении уровня электропроводных сред роль считывающего элемента может выполнять сама среда.

Для суждения о реальных возможностях измерительных преобразователей с дискретно распределенными электромагнитными параметрами приведем характеристики разработанного нами уровнемера [8], четырехразрядный вариант которого показан на рис. 3: рабочий диапазон $X=1300$ мм; относительная погрешность измерения $\gamma=\pm 0,5\%$; вид функции преобразования — линейный; вид кода — параллельный, двоичный, циклический; число двоичных разрядов $c=7$; тип дискретного чувствительного элемента — дроссель с дискретно распределенной обмоткой; номинальное и остаточное значения напряжения на выходе дросселя младшего разряда: $U_1=25\div 30$ мВ, $U_0=1\div 1,5$ мВ соответственно; выходное сопротивление дросселя $R=0,05\div 0,1$ Ом; напряжение и частота источника питания соответственно: $U=6,3$ В, $f=5\cdot 10^3$ Гц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Ф. Куликовский, М. Ф. Зарипов. Индуктивные преобразователи перемещения с распределенными параметрами. М.—Л., «Энергия», 1966.
2. М. Ф. Зарипов. Преобразователи с распределенными параметрами. М., «Энергия», 1969.
3. В. И. Рукавишников. Поплавковый датчик уровня. Авторское свидетельство № 267110.— ОИПОТЗ, 1970, № 12.
4. А. В. Рабинович, О. Д. Величкин. Уровнемер для жидкости. Авторское свидетельство № 190037.— ИПОТЗ, 1967, № 1.
5. З. И. Гитис. Преобразователи информации для электронных цифровых вычислительных устройств. М., «Энергия», 1970.
6. О. И. Башнин, Н. Н. Голубев, В. М. Конин, Е. Ф. Фурмаков. Дискретный уровнемер. Авторское свидетельство № 290178.— ОИПОТЗ, 1971, № 2.
7. О. И. Башнин, Н. Н. Голубев, В. М. Конин, Е. Ф. Фурмаков. Уровнемер. Авторское свидетельство № 282685.— ОИПОТЗ, 1970, № 30.
8. Н. Н. Голубев, Б. А. Золотухин, В. М. Конин, Е. Ф. Фурмаков. Трансформаторный датчик перемещения. Авторское свидетельство № 292065.— ОИПОТЗ, 1971, № 4.
9. О. И. Башнин, Н. Н. Голубев, В. М. Конин, Е. Ф. Фурмаков. Преобразователь перемещение—код. Авторское свидетельство № 279197.— ОИПОТЗ, 1970, № 26.
10. H. Chang, A. J. Milnes. Magnetic Fields of Twisters Represented by Confocal Hollow Prolate Spheroids.— Trans. IRE, 1960, v. EC-9, № 2.
11. Е. Ф. Фурмаков. Теплостойкий измерительный преобразователь давления.— ИВУЗ, Приборостроение, 1970, № 7.

Поступила в редакцию
17 мая 1971 г.