

Л. Б. Беленький, Б. К. Райков, Ю. Н. Секисов, О. П. Скобелев
(Самара)

ВИХРЕТОКОВЫЕ ЭКРАННЫЕ ДАТЧИКИ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПЫТАНИЙ

Предлагается классификация и дается описание базовых конструкций вихретоковых экранных датчиков, ориентированных на применение в системах автоматизации исследований и испытаний объектов машиностроения, а также приводятся результаты экспериментальных исследований датчиков.

В процессе экспериментальных исследований и испытаний объектов машиностроения, например автомобилей, необходимо измерение комплекса механических параметров, включающего линейные и угловые перемещения, силы и моменты.

Совершенствование объектов исследований и испытаний, как правило, связано с увеличением количества измеряемых параметров и соответственно числа датчиков в системах автоматизации, что приводит к росту стоимости аппаратуры первичного и вторичного преобразований относительно общих затрат на технические средства систем. Разумеется, стоимость датчиков механических параметров должна быть по возможности невысокой, их конструкции простыми и технологичными в изготовлении. Способствуют снижению стоимости обычно умеренные требования к точности преобразования. Кроме того, в датчиках перемещений и в выходных преобразователях датчиков сил и моментов желательно использовать общие физические принципы, что обеспечивает применение единой аппаратуры вторичного преобразования, снижение затрат на ее приобретение и эксплуатацию.

В значительной мере перечисленным требованиям удовлетворяют традиционные конструкции индуктивных датчиков механических параметров [1], которые продолжают совершенствоваться и развиваться [2, 3].

В то же время в практике автоматизации эксперимента известны экономически эффективные магистрально-модульные групповые (кластерные) преобразователи сигналов индуктивных датчиков, построенные на основе методов тестовых переходных процессов [4, 5]. Одним из наиболее привлекательных по своим возможностям является метод первой производной (МПП), в соответствии с которым аperiodическая измерительная цепь с датчиком возбуждается импульсом питания прямоугольной формы и фиксируется значение производной тока в начале переходного процесса, характеризующее естественный выходной сигнал датчика — изменение его индуктивности. МПП обеспечивает малое время преобразования, подавление влияния неинформативного параметра — сопротивления датчика, возможность повышения чувствительности и соотношения «сигнал/шум» за счет высокого уровня импульса питания малой длительности. Однако серьезным препятствием к применению МПП в обычных конструкциях индуктивных датчиков с магнитопроводом из стали является возникновение вихревых токов в магнитопроводе, влияние которых максимально проявляется в начале переходного процесса, а преобразование становится возможным лишь после их затухания. Именно это

обстоятельство явилось основополагающим в выдвижении идеи о применении МПП в конструкциях индуктивных датчиков, в которых используются немагнитные электропроводные экраны. Вихревые токи в начальной области переходного процесса не успевают проникнуть в глубину экранов, но именно вихревые токи несут полезную информацию о взаимном расположении экранирующей поверхности и катушки. Естественным выходным сигналом остается изменение индуктивности катушек при перемещении электропроводных немагнитных экранов, связанное с изменением параметров объекта, причем изменения индуктивности зависят от степени «экранирования».

Индуктивные датчики с немагнитными электропроводными экранами можно классифицировать как вихретоковые экранные датчики (ВТ ЭД). Несмотря на большое число публикаций, включая монографию, посвященную вихретоковым датчикам [6], ВТ ЭД механических параметров, для преобразования сигналов которых используются импульсные методы, в литературе освещены недостаточно, а имеющиеся публикации [7] не дают обобщенного представления об особенностях конструкций таких датчиков, их технических и метрологических характеристиках.

В настоящей статье предложена классификация и приведено описание разработанных авторами базовых конструкций вихретоковых экранных датчиков, ориентированных на применение в системах автоматизации исследований и испытаний автомобилей, их узлов и агрегатов, а также изложены результаты экспериментальных исследований датчиков, полученные с помощью преобразователей на основе МПП [8].

Базовые конструкции реализованных ВТ ЭД линейных и угловых перемещений иллюстрируются в таблице схематическими изображениями и графиками функций преобразования.

В рассматриваемых ВТ ЭД линейных перемещений преобразование входного параметра связано с изменением расстояния от катушки до экрана (1) либо площади экранирования витков катушки (2), а в датчиках угловых перемещений — площади экранирования (3, 4). В то же время с целью улучшения линейности функции преобразования или для регулирования чувствительности используются гибридные конструкции, в которых изменения расстояния от экрана до катушки сопровождаются изменениями площади экранирования (5).

В дифференциальных датчиках малых линейных перемещений (1) входной параметр воздействует на шток с закрепленным на нем экраном в форме диска из немагнитного электропроводного материала. В цилиндрическом корпусе датчика установлена пара неподвижных плоских катушек. Плоскости экрана расположены параллельно плоскостям намотки катушек. При движении штока изменяются расстояния от поверхностей экранов до катушек.

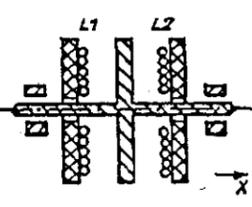
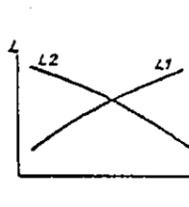
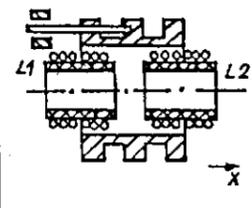
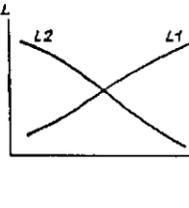
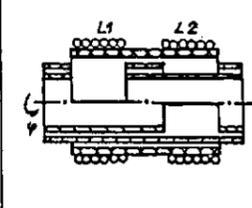
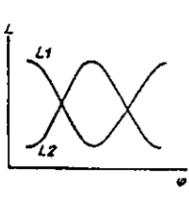
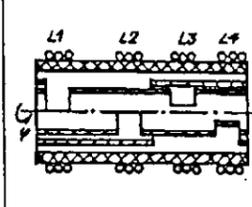
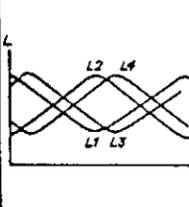
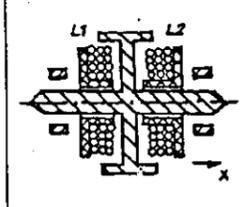
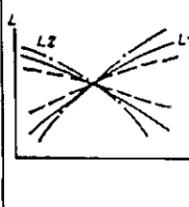
Измерение индуктивности L_1 и L_2 ведется в ходе переходного процесса при возбуждении дифференциальной схемы прямоугольными импульсами. Под действием нарастающих токов в катушках образуются магнитные поля, создающие вихревые токи в экране. Магнитные поля вихревых токов, взаимодействуя с полями катушек, вызывают изменения индуктивностей, которые зависят от расстояний между экранами и катушками.

Рассматриваемая конструкция ВТ ЭД малых перемещений является базовой.

В датчиках средних линейных перемещений имеются две катушки индуктивности и подвижный цилиндрический экран из немагнитного электропроводного материала, жестко связанный со штоком, на который воздействует входной параметр x . Шток, двигаясь в подшипниках, перемещает экран относительно неподвижных катушек, изменяя площадь перекрытия (экранирования) катушек.

Базовая конструкция датчика угловых перемещений в двух вариантах представлена в таблице. Первый вариант (3) обеспечивает преобразование угловых перемещений в диапазоне $0-60^\circ$. В корпусе датчика, кроме катушек индуктивности L_1 , L_2 , расположены два цилиндрических экрана: неподвижный (большого диаметра) и подвижный (меньшего), имеющие окна, изобра-

Базовые модели вихрековых экранных датчиков

№	Преобразуемые параметры		Отличительные особенности	Схематическое изображение конструкции	Вид функции преобразования
	Наименование	Диапазон			
1	Малые линейные перемещения	0—1,0 мм	Изменение расстояния до экрана		
2	Средние линейные перемещения	0—10,0 мм	Изменение площади экранирования		
3	Угловые перемещения	0—60°	Изменение площади экранирования		
4	Угловые перемещения	0—360°	Две пары катушек, изменение площади экранирования		
5	Малые линейные перемещения	0—3,0 мм	Изменение площади экранирования и расстояния до экрана		

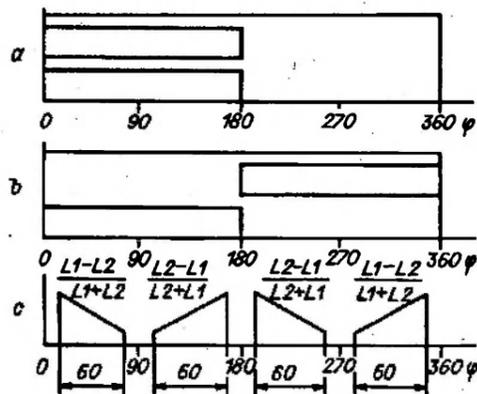


Рис. 1. Базовая конструкция датчика угловых перемещений 0—60°:

a — неподвижный экран, *b* — подвижный экран, *c* — сквозная градуировочная характеристика

женные на развертке (рис. 1, *a*, *b*). Экраны находятся внутри цилиндрических каркасов, на которых намотаны катушки. При вращении подвижного экрана, связанного со входным воздействием, изменяются площади экранирующих электропроводных поверхностей внутри катушек.

Функция преобразования датчика имеет циклический характер, однако наличие пологих (промежуточных) участков не позволяет использовать датчик в диапазоне 360°.

Для расширения диапазона до 360° в [9] предложено дополнить базовую конструкцию (3) третьей катушкой и изменить окна на неподвижном и подвижном экранах. Три окна на неподвижном экране (рис. 2, *a*) расположены одинаково, занимая сектор в 120°, аналогичные окна на подвижном экране (рис. 2, *b*) смещены относительно друг друга на 120°. Во вторичном преобразователе предусмотрена коммутация катушек дифференциальными парами с таким расчетом, чтобы обеспечить шесть поддиапазонов по 60° каждый (рис. 2, *c*).

В таблице приведен второй вариант базовой конструкции (4). Для улучшения линейности в поддиапазонах использованы четыре катушки индуктивности, образующие две постоянные дифференциальные пары: $L1, L2$ и $L3, L4$. В этом варианте два окна на неподвижном экране и расположены со сдвигом на 180°, и занимают сектор 180°; на подвижном экране окна под каждой дифференциальной парой катушек сдвинуты на 180° относительно друг друга. Однако пары окон катушек $L1, L2$ и катушек $L3, L4$ сдвинуты относительно друг друга на 45°. Соответственно и функции преобразования $L1(\varphi), L2(\varphi)$ и $L3(\varphi), L4(\varphi)$ сдвинуты на 45°. Во вторичном преобразователе предусмотрены средства, обеспечивающие деление всего диапазона изменения входного параметра (360°) на восемь участков (поддиапазонов) по 45° [10].

Гибридный вариант базовой конструкции (5) в таблице представлен датчиком линейных перемещений 0—3,0 мм. Его подвижный экран имеет форму цилиндра, аналогичную экрану в базовой конструкции (2), но отличающуюся

от нее плоской перегородкой внутри цилиндра. При движении цилиндра изменяется площадь экранирования витков обеих катушек, но в то же время происходит изменение расстояний от катушек до перегородки. При отдельном рассмотрении этих эффектов графики функций преобразования идентичны соответственно графикам (2) и (1) в

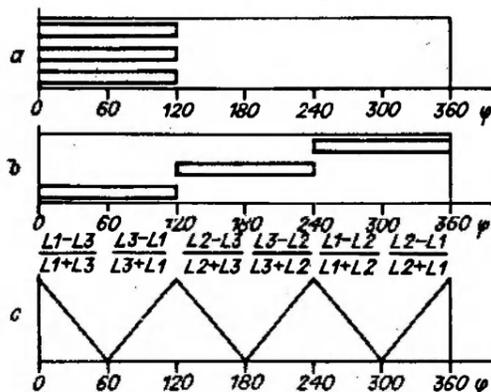


Рис. 2. Базовая конструкция датчика угловых перемещений 0—360° (I вариант):

a — неподвижный экран, *b* — подвижный экран, *c* — сквозная градуировочная характеристика

таблице (в гибридной базовой конструкции (5) они изображены штриховой и штрихпунктирной линиями). Очевидно, что совместное действие обоих эффектов приводит к выравниванию каждой характеристики и способствует линеаризации функции преобразования.

Разработаны также варианты датчиков малых линейных перемещений со вспомогательными элементами, придающими датчику черты гибридности (5) [11].

В качестве первичных преобразователей датчиков силы и момента, как правило, используются стержневые упругие элементы и торсионы соответственно. Преобразование линейных деформаций упругих элементов в датчиках силы производится с помощью ВТ ЭД малых линейных перемещений (базовая конструкция (1) в таблице), а преобразование деформаций торсиона — с помощью ВТ ЭД угловых перемещений (базовая конструкция (3) в таблице). В реализованных конструкциях датчиков преобразование сил ведется в диапазонах 0—5000 Н, 0—50000 Н, преобразование моментов — в диапазоне 0—20 Н·м.

Индуктивность катушек порядка $300 \cdot 10^{-6}$ Гн. Девиация индуктивности составляет 5—20 %.

Питание всех датчиков механических параметров осуществляется прямоугольными импульсами амплитудой 10 В, длительностью $5 \cdot 10^{-6}$ с. Частота повторения 30 кГц.

С помощью микропроцессорного устройства, включающего вторичные преобразователи, построенные на основе МПП [12], с использованием ПЭВМ была проведена метрологическая аттестация, в ходе которой определены характеристики датчиков в рабочем диапазоне. По средним значениям найдены аппроксимирующие функции в виде полиномов первой, второй и третьей степени. Максимальные отклонения средних значений от аппроксимирующих принимались за оценки систематической погрешности. Минимальную систематическую погрешность (0,05 %) (среди приведенных в таблице) имеет датчик угловых перемещений, работающий в диапазоне 0—360°, максимальную (0,5 %) — датчик малых линейных перемещений. У датчика средних линейных перемещений систематическая погрешность составила 0,1 %, а у датчика угловых перемещений, работающего в диапазоне 0—60°, и гибридного датчика малых линейных перемещений — 0,2 %.

В процессе эксплуатации датчиков в составе системы автоматизации испытаний можно обеспечить снижение систематической составляющей погрешности и свести к минимуму традиционные требования в отношении линейности за счет автоматической коррекции функции преобразования датчика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конюхов Н. Е., Медников Ф. М., Нечаевский М. Л. Электромагнитные датчики механических величин. — М.: Машиностроение, 1987.
2. Seifert Ch. Sensoren für Automatisierungstechnik. Teil 3: Sensoren zur Messungen mechanischer Größen // Feingeräte technik. — 1989. — 38, N 12.
3. Cleeveland P. Sensing distance and displacement // I and CS. — 1989. — 62, N 19.
4. Виттих В. А., Скобелев О. П. Системы сбора и предварительной обработки информации в стандарте КАМАК для АСНИ физических полей // Автометрия. — 1982. — № 4.
5. Виттих В. А., Киреев В. А., Скобелев О. П. Кластерный подход к построению программно-аппаратных средств систем сбора и преобразования измерительной информации // Автометрия. — 1991. — № 2.
6. Герасимов В. Г., Ключев В. В., Шатерников В. Е. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий. — М.: Энергоатомиздат, 1983.
7. Секисов Ю. Н. и др. Модули в стандарте КАМАК для преобразования сигналов экранных датчиков // Тез. докл. конф. по план. экспер. в научных исследованиях. — М.: МЭИ, 1985.
8. Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Мостовая измерительная цепь для индуктивных датчиков в импульсном режиме // Автоматизация научных исследований. — Куйбышев: КуАИ, 1979.

9. А. с. 1392350 СССР. Устройство для измерения угловых перемещений /Ю. Н. Секисов и др.—Опубл. 30.04.88, Бюл. № 16.
10. А. с. 1603187 СССР. Измеритель угловых перемещений /К. Д. Сосняков и др.—Опубл. 30.10.90, Бюл. № 40.
11. А. с. 1227941 СССР. Датчик линейных перемещений /Ю. Н. Секисов и др.—Опубл. 30.04.86, Бюл. № 16.
12. Киреев В. А., Компанец В. К., Сидоров А. А., Скобелев О. П. Микропроцессорные модули сбора и обработки данных в стандарте VME // VME bus in RESEARCH and TECHNOLOGY: Пер. Системы VME bus в физическом эксперименте и промышленности.—Новосибирск: ИЛИЭ СО АН СССР, 1991.

Поступило в редакцию 10 января 1993 г.
