

Индуктивные преобразователи для линейных измерений

М. И. ЭТИНГОФ

ОАО «НИИИзмерения», Москва, Россия, e-mail: etingof@glasnet.ru

Рассмотрены технические и метрологические характеристики наиболее распространенных в разных странах индуктивных преобразователей диаметром 8 мм, применяемых при линейных измерениях. Описаны некоторые конструктивные и метрологические недостатки, которые следует учитывать при эксплуатации. Внесены предложения по изменению конструкции индуктивных преобразователей для повышения качества измерений.

Ключевые слова: индуктивный преобразователь, магнитопровод, обмотка, катушка, сердечник.

The technical and metrological characteristics of the inductance converters with diameter of 8 mm the most common for linear measurements in different countries are considered. Some of their construction and metrological shortcomings to be considered at instruments operation are described. The proposals on construction of these converters change to improve their quality are given.

Key words: inductance converter, magnetic circuit, winding, coil, core.

Измерительные приборы с индуктивными преобразователями (ИП) занимают доминирующее положение среди электронных приборов для линейных измерений в диапазоне до 5—10 мм благодаря ряду преимуществ по сравнению с преобразователями других типов. Ими оснащены многочисленные цеховые контрольные приборы и оборудование в автоматическом производстве, а также лабораторные поверочные приборы, в том числе для аттестации и поверки концевых мер длины. Такие ИП имеют относительно простую конструкцию, малые габаритные размеры и низкую цену, а также достаточно высокие мощность выходного сигнала, точность и надежность, низкую чувствительность к изменению условий окружающей среды, сочетание хороших динамических свойств с возможностью передачи сигнала на сравнительно большие расстояния (до 10—15 м) с минимальными искажениями и потерями. Подавляющее большинство выпускаемых универсальных ИП имеют наружную посадочный диаметр 8 мм и примерно одинаковую конструкцию. Однако им присущи некоторые конструктивные и метрологические недостатки, которые следует непременно учитывать при эксплуатации.

Индуктивные преобразователи выпускают ведущие зарубежные фирмы США, Европы и Японии — Tesa (Швейцария), Mahr (Германия), MITUTOYO (Япония), Marposs (Италия) и др. В России ИП выпускают заводы «Измерон» и ООО «Микромех» согласно международному стандарту [1]. Каждый производитель предлагает большую гамму ИП для решения различных измерительных задач.

В дифференциальных соленоидных ИП используется зависимость индуктивного сопротивления обмоток от изменения длины воздушного зазора между ферромагнитным якорем (сердечником) и магнитопроводом (рис. 1). Следовательно, параметры электрического выходного сигнала ИП зависят от линейного перемещения якоря, связанного с отклонением размера объекта контроля. Дифференциальные ИП состоят из катушки, содержащей две или несколько об-

моток, и подвижного якоря, расположенного внутри катушки. В зависимости от схемы расположения и подключения обмоток выпускают ИП двух основных типов — трансформаторные и полумостовые.

Трансформаторные преобразователи (см. рис. 1, б) имеют первичную обмотку, на которую подается питающее напряжение, и две включенные навстречу друг другу вторичные обмотки, с которых снимается выходной сигнал. При расположении якоря симметрично вторичным обмоткам суммарное напряжение на их выводах равно нулю. При смещении якоря в каком-либо направлении напряжение на одной из них возрастает, а на другой — уменьшается. Это приводит к возникновению на выводах напряжения (сигнала), пропорционального смещению якоря. При подаче на первичную обмотку переменного напряжения во вторичных обмотках наводятся напряжения той же частоты, направленные в каждый момент времени навстречу друг другу. Разностный выходной сигнал после усиления и преобразования подается на аналоговый или цифровой индикатор.

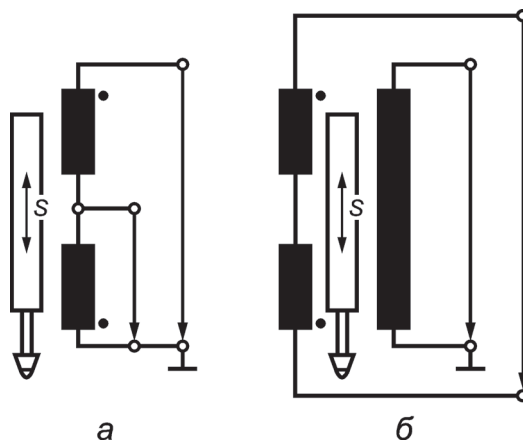


Рис. 1. Дифференциальный ИП с полумостовой (а) и трансформаторной (б) схемами включения обмоток

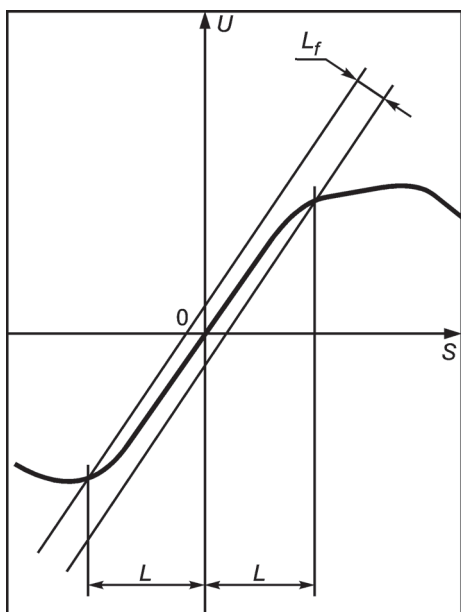


Рис. 2. Выходная характеристика ИП:

U — выходное напряжение; S — перемещение (ход) якоря;
 L — линейный диапазон характеристики; L_f — нелинейность

Полумостовые ИП (см. рис. 1, а) имеют две включенные навстречу друг другу обмотки, образующие половину индуктивного моста. Вторая его половина образуется входным делителем вторичного прибора. Напряжение питания подается на катушки ИП, а выходной сигнал снимается со средней точки. При расположении якоря симметрично обмоткам мост сбалансирован, и напряжение в его диагонали равно нулю. Смещение якоря вызывает пропорциональную разбалансировку моста. Выходной сигнал дисбаланса преобразуется и подается на аналоговый или цифровой индикатор.

Достоинством дифференциальных ИП является возможность получения линейной характеристики (рис. 2) в сравнительно большом диапазоне (до 10 мм) перемещений якоря, поскольку нелинейности характеристик двух симметричных обмоток частично компенсируются.

Конструкция большинства выпускаемых ИП примерно одинакова [2, 3]. В цилиндрическом корпусе расположен неподвижный магнитопровод с двумя или тремя катушками (обмотками) и подвижный тонкий относительно длинный цилиндрический шток с якорем. Корпус, одновременно служащий посадочным местом для установки ИП в измерительную стойку или оснастку, изготовлен из нержавеющей стали с наружным диаметром 8h6 или 8h7 и имеет твердое никелевое или хромовое покрытие, защищающее его от коррозии в цеховых условиях. Шток перемещается по направляющей из насыпных шаров диаметром 0,68—0,8 мм, собранных с небольшим натягом 1—2 мкм. От поворота шток удерживается роликом (шпонкой), его ход ограничен упорами. Такая конструкция обеспечивает легкость и точность перемещения штока, устойчивость к боковым усилиям на измерительный наконечник. На внутреннем конце штока установлен ферритовый стержень, который движется внутри кату-

шек и служит якорем ИП. Якорь находится в немагнитной втулке с ТКЛР, близким к ТКЛР магнитопровода. Для якоря и магнитопровода используют мягкие ферриты с коэффициентом магнитной проницаемости 2000—6000 Гн/м. На наружном конце штока расположен измерительный наконечник с твердосплавным шариком диаметром 3 мм. Измерительное усилие создается регулируемой пружиной. Катушки расположены в ферритовом магнитопроводе.

Катушки ИП с числом витков 600—800 намотаны аккуратно тонким проводом диаметром 0,04—0,08 мм. Число витков симметричных обмоток и их сопротивление строго одинаковы. Питание обмоток осуществляется переменным синусоидальным или импульсным током, например в форме меандра, напряжением 3—6 В частотой 5—13 кГц. Масса подвижного штока, на котором закреплен якорь, равна 2—10 г. Это позволяет использовать ИП в динамическом режиме при изменении размеров с частотой до 60 Гц. Причем рабочее положение ИП может быть вертикальным (вниз или вверх наконечником) или горизонтальным. Чувствительность ИП составляет от 50 мВ/мм до 73 В/мм при нагрузке 2—10 кОм.

Большинство ИП имеют длину около 100 мм с аксиальным или радиальным выводом кабеля, надежно защищенным резиновым уплотнителем. Длина кабеля равна 2 м, ее увеличение может привести к ухудшению метрологических характеристик преобразователя. Корпус и направляющие также надежно герметизированы. Подвижный шток защищен эластичным уплотнением (гармошкой) из маслбензостойкой резины. Степень защиты преобразователя IP 65 соответствует стандартам [4, 5].

Выпускают ИП с диапазонами измерения $L = \pm (0,2; 1,0; 2,0; 5,0)$ мм, а также некоторые модели с диапазоном $L = \pm 10$ мм. Измерительное усилие зависит от модели ИП, наименьшее составляет 0,16 Н, наибольшее — 1,0 Н.

Нелинейность характеристики L_f преобразователей с аналоговым выходом составляет от $(0,07 + 0,4L)$ до $(0,2 + 3L^3)$ мкм у разных моделей (см. рис. 2). При использовании ИП с микропроцессорным блоком, имеющим программу линейаризации, можно выпрямить характеристику и повысить ее линейность. В комплекте с аналоговыми или микропроцессорными электронными блоками ИП устойчиво работают при цене деления шкалы или дискретности цифрового отсчета 0,01; 0,05; 0,1 мкм. Воспроизводимость (повторяемость) показаний ИП с блоком составляет 0,01—0,20 мкм у разных моделей, погрешность прямого и обратного хода 0,01—0,25 мкм, смещение нуля при изменении окружающей температуры 0,25 мкм/°С. Применять ИП можно при температуре от –10 до +65 °С, но метрологические характеристики гарантированы только при нормальной температуре 20 °С.

Для подъема (арретирования) штока в процессе измерений ИП могут быть снабжены механическим или пневматическим арретиром, использующим давление или разрежение воздуха.

При помощи приборов с ИП проводят, главным образом, относительные измерения, настраивая приборы по плоскопараллельным концевым мерам длины или образцовой детали, например по установочному кольцу. Это существенно уменьшает систематические и случайные погрешности

измерения, так как настраивают и измеряют в одинаковых условиях, а диапазон измерения невелик. Однако в погрешность измерения входят погрешности аттестации образцовой детали и настройки.

Выходные сигналы ИП обрабатывают в зависимости от решаемой задачи. Высокая линейность выходной характеристики позволяет складывать или вычитать выходные сигналы двух или нескольких ИП по схеме $\pm A \pm B$, что существенно расширяет возможности их применения для решения различных измерительных задач, особенно при автоматическом контроле размеров деталей. Такие преобразователи используют в нутромерах, скобах, контрольных приспособлениях, контрольно-сортировочных автоматах, многомерных устройствах для ручного и автоматического послеоперационного контроля, а также для контроля размеров деталей на стойке. На базе ИП выпускают многочисленные индуктивные приборы с аналоговым и цифровым отсчетом, а также с USB-интерфейсом для непосредственного подключения к компьютеру.

Хотя метрологические характеристики приборов с ИП позволяют проводить измерения в нанодиапазоне (менее 100 нм), большинство таких приборов используют в цехах и контрольных пунктах на машиностроительных, автомобильных и подшипниковых заводах для контроля деталей, имеющих допуски, которые соответствуют стандартам [6, 7] и не находятся в нанодиапазоне. Поэтому калибровку и поверку таких ИП и приборов с ИП проводят по концевым мерам длины класса точности 1 или 0 [8]. В метрологических центрах применяют высокоточные индуктивные приборы, работающие в нанодиапазоне и предназначенные для сличения и поверки концевых мер длины. Индуктивные преобразователи таких приборов аттестуют и калибруют при помощи концевых мер длины класса точности К [8].

При всех достоинствах ИП диаметром 8 мм они имеют два серьезных недостатка, которые снижают надежность и достоверность их показаний. Конструктивный недостаток ИП обусловлен малым диаметром корпуса. Выполненные в таком корпусе шариковые направляющие с шарами диаметром 0,68 мм не могут обеспечить точную работу. Шары быстро изнашиваются, теряют круглую форму, смещаются, что приводит к увеличению погрешности. Кроме того, в таком маленьком корпусе трудно надежно закрепить кабель. При движениях кабеля, неизбежных в эксплуатации, происходит смещение настройки ИП. Тонкий корпус может быть легко пережат при закреплении ИП в стойке, что ухудшает перемещение штока и приводит к дополнительной погрешности. Значение диаметра корпуса 8 мм было выбрано неслучайно. Конструкторы всегда стремились к уменьшению размеров приборов, и существует очень старый стандарт на посадочный диаметр, равный 8h6, измерительных индикаторов, головок и преобразователей. В настоящее время никаких

серьезных обстоятельств для сохранения посадочного диаметра 8 мм у ИП нет. Если какой-то производитель отойдет от этого стандарта и начнет выпускать ИП диаметром, например 9 или 10 мм, то они станут значительно качественнее конструктивно и надежнее в эксплуатации.

Другой недостаток состоит в том, что ИП не имеют материального носителя размера в отличие, например, от штангенциркуля. Контролируемый размер, соответствующий перемещению штока и якоря, отображается выходным электрическим сигналом (напряжением), который преобразуется, усиливается, калибруется и выводится на аналоговую или цифровую шкалу. Соответствие выходного напряжения перемещению штока достигается при правильной и точной калибровке индуктивного прибора. Однако никогда нет уверенности в том, что калибровка и настройка нуля сохранены. Поэтому при эксплуатации приборов с ИП периодически (практически перед каждым измерением) проводят их настройку по образцам или плоскопараллельным концевым мерам длины. Причем этот недостаток ИП нельзя устранить, его следует учитывать при эксплуатации.

Выпускаемые и широко применяемые ИП диаметром 8 мм имеют хорошие метрологические характеристики, если при эксплуатации учитывать их некоторые недостатки.

Л и т е р а т у р а

1. **DIN 32876—1—1999.** Устройства электрические для линейных измерений. Часть. 1. Аналоговая регистрация измеряемых величин. Термины, определения, технические требования, испытания.
2. **Сорочкин Б. М.** Автоматизация измерений и контроля размеров деталей. Л.: Машиностроение, 1990.
3. **Соболев М. П., Этингоф М. И.** Автоматический размерный контроль на металлорежущих станках. Смоленск: Изд-во «Ойкумена», 2005.
4. **DIN EN 60529.** Классы защиты электрооборудования.
5. **ГОСТ 14254—96.** Степень защиты, обеспечиваемая оболочками (код IP).
6. **ISO 286—2:2010.** Технические требования к геометрической продукции. Система кодов ISO допусков на линейные размеры. Часть. 2. Таблицы классов стандартных допусков и предельных отклонений на размеры отверстий и валов.
7. **ГОСТ 25347—82.** Основные нормы взаимозаменяемости. Единая система допусков и посадок. Поля допусков и рекомендуемые посадки.
8. **ISO 3650:1998.** Геометрические характеристики изделий (GPS). Эталоны длин. Эталонные блоки.

Дата принятия 16.03.2012 г.