

TRANSDUCTORES

1. DEFINICIONES. CLASIFICACION.

Un transductor es, simplemente, un dispositivo que proporciona una salida utilizable en respuesta a una magnitud física, propiedad o condición específica que se desea medir. Generalmente se trata de un dispositivo utilizado para convertir un fenómeno físico en una señal eléctrica.

Los transductores se conocen con nombres diferentes en las distintas disciplinas técnicas: sensores (de presión, de fuerza, de temperatura), detectores, galgas, captadores, sondas, etc.

En el caso de los transductores que proporcionan como salida una señal eléctrica, se pueden distinguir genéricamente las siguientes partes:

- sensor (o sonda), en contacto con la magnitud física.
- mecanismos auxiliares.
- captador, que proporciona una cierta señal eléctrica.
- preamplificador o acondicionador de la señal.

La descripción de un transductor se basa generalmente en la mayoría o todas de las consideraciones siguientes:

- 1) ¿Qué se intenta medir? (magnitud).
- 2) ¿Cuál es el principio operativo de la porción eléctrica del transductor con en el que se origina la salida? (principio de transducción).
- 3) ¿Qué elemento del transductor responde directamente a la magnitud que se mide? (elemento sensor).
- 4) ¿Qué prestaciones o ventajas especiales se incorporan en el transductor?.
- 5) ¿Cuáles son sus principales características?
 - rango de operación.
 - sensibilidad.
 - compatibilidad ambiental: temperatura, presiones, tamaño, restricciones de montaje...
 - robustez.

- características eléctricas de la señal de salida.

A partir de la descripción anterior surge una primera clasificación de los transductores: según el método de transducción o según la variable que son capaces de medir. A nivel introductorio, parece más apropiada una clasificación atendiendo al primero de los criterios.

El grupo más importante de transductores es quizás el de parámetro variable, que se caracterizan por proporcionar una salida relacionada con la variación de un determinado parámetro eléctrico pasivo, originada a su vez por la variación del fenómeno físico que se desea medir. Son de gran robustez y simplicidad de construcción.

Por otra parte podemos definir los transductores llamados activos o autogeneradores, que son aquéllos que producen una señal eléctrica (sin necesidad de alimentación externa) cuando son estimulados por alguna forma física de energía: electromagnéticos, piezoeléctricos, fotovoltaicos, termoeléctricos. Aquéllos que necesitan de algún elemento adicional en la transducción, son los transductores pasivos.

2. TRANSDUCTORES DE PARAMETRO VARIABLE.

2.1. CAPACITIVOS: convierten un cambio de la magnitud a medir en un cambio de capacidad.

Dado que la capacidad de un condensador de placas paralelas es aproximadamente proporcional a $(\epsilon \cdot A)/d$, variando cualquiera de estas cantidades se obtiene un cambio en la capacidad: por tanto, puede ocasionarse por el movimiento de uno de los electrodos, acercándose o alejándose del otro (variación de "d"); por la variación del área de las placas ("A") o por cambio del dieléctrico situado entre las dos placas ("ε"). Suelen emplearse para medir desplazamientos o como indicadores de nivel de líquido (dieléctrico variable).

2.2. RESISTIVOS: convierten un cambio en la magnitud a medir en un cambio en la resistencia.

Los cambios en la resistencia pueden realizarse por diferentes medios, como por movimientos en el contacto móvil de un reostato, por aplicación de esfuerzos mecánicos, por cambios de temperatura, etc.

Potenciométricos: convierten un cambio en la magnitud a medir en un cambio en la relación de tensiones (divisor de tensión), mediante un cambio en la posición de un contacto móvil sobre un elemento resistivo en cuyos bordes se ha aplicado una excitación. Se utilizan para medir desplazamientos tanto lineales como angulares. Son pasivos.

Galgas extensiométricas: son un ejemplo de transductores pasivos que usan la variación de la resistencia eléctrica de los hilos como mecanismo capaz de detectar las fuerzas a que son sometidos.

Si a un hilo conductor se le somete a un esfuerzo de tracción, se alarga, aumentando su longitud proporcionalmente a la carga aplicada (mientras no se supere el límite elástico del

material). Simultáneamente, con este aumento de longitud hay una ligera reducción de la sección transversal del hilo y dado que la resistencia de un conductor es $R = r_0 \cdot L/S$ (donde r_0 es la resistividad del material), ambos factores contribuyen al aumento de la resistencia del material. Habría que añadir también el efecto piezorresistivo.

Consisten normalmente en un hilo resistivo doblado en forma de rejilla, que se suele pegar al objeto en el que se van a medir esfuerzos y deformaciones. Las aplicaciones de las galgas son numerosas: puentes, grúas, vigas, edificios, etc. y las medidas se suelen hacer con algún tipo de puente de Wheatstone, en el que uno, dos o incluso los cuatro brazos son galgas. Como las variaciones de deformación son dinámicas, al puente se le hace trabajar en modo "no equilibrado", esto es, se obtiene una salida proporcional a la variación de resistencia de la galga.

Termorresistivos: todo este grupo de transductores se basan en el principio físico de variación de resistencia con la temperatura. Sin embargo, en función de que los materiales usados sean metales o semiconductores, el comportamiento de los mismos es bastante diferente.

Los termómetros de resistencia se basan en el principio de que la resistencia de un metal varía con la temperatura de acuerdo con la ecuación:

$$R = R_0(1 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 + \dots + a_nT^n)$$

Esta ecuación pasa a ser lineal si todos los términos en T^2 y de potencias superiores se hacen despreciables. Esto es cierto para algunos metales sobre un limitado rango de temperaturas, de modo que en esos casos, la relación funcional pasa a ser:

$R = R_0(1 + \alpha T)$ siendo α el coeficiente de temperatura.

El platino es uno de los metales en que esta relación es más lineal, y ello permite su utilización como patrón internacional de temperaturas entre -190°C y 660°C . Otros metales usados en aplicaciones que requieren una menor exactitud son el cobre (-200 a 260°C) y el níquel (-200 a 430°C).

En el campo de los semiconductores se han desarrollado sensores de temperatura constituidos por óxidos metálicos de cromo, cobalto, hierro, manganeso, níquel, etc. en los que la resistencia depende de la temperatura de acuerdo con la ecuación de Steinhart-Hart simplificada:

$$1/T = 1/(\ln R - A) - C$$

donde A y C son constantes del modelo, obtenidas por ajuste.

Como se puede observar en esta relación, existe un coeficiente de temperatura negativo, que da nombre a los dispositivos de este grupo, llamados NTC o termistores. Al tener un valor importante de este coeficiente de temperatura, se puede obtener una sensibilidad mayor que otros transductores.

Sus principales ventajas son su relativamente bajo coste y su pequeño tamaño. Como

inconvenientes podíamos citar su bajo tiempo de respuesta, así como grandes tolerancias de fabricación. También señalar que la corriente que circula por la NTC debe ser baja para que la variación de la resistencia no sea debida a la disipación que genera la propia corriente (autocalentamiento).

Además de utilizarse en termometría, encuentran aplicaciones en circuitos de compensación térmica, para la estabilización de tensiones y corrientes.

Por otro lado, las PTC o resistencias de coeficiente de temperatura positivo, constituídas por elementos semiconductores de titanato de bario, se caracterizan por modificar su estructura cristalina a una cierta temperatura (50 a 140°C), correspondiéndole un cambio brusco en su resistencia. Por debajo de la temperatura crítica, la resistencia es baja (del orden de centenares de ohmios), y por encima de la misma, la resistencia es muy alta (del orden de decenas de megaohmios).

Este comportamiento las hace fundamentalmente útiles en la detección de umbrales de temperatura, es decir, se comportan como interruptores que se abren y se cierran en las proximidades de esa temperatura umbral.

Fotorresistivos o fotoconductores: convierten un cambio de la iluminación incidente sobre el material en un cambio de la resistencia (o conductancia) de dicho material.

Las LDR son elementos sensibles a la radiación de

determinada longitud de onda, que disminuyen su resistencia conforme aumenta la luminosidad incidente sobre ellas, pasando

por ejemplo desde 1000Ω hasta unos 100MΩ (resistencia en la oscuridad). Encuentran aplicaciones en fotografía, aparatos de televisión, sistemas de iluminación, detectores de presencia, etc.

Son también sensores muy sensibles y como inconvenientes podíamos citar su gran dependencia con la temperatura para bajas iluminaciones y su lentitud de respuesta ante una fuerte variación de la radiación luminosa.

Dentro de este grupo se puede incluir también el fotodiodo, aunque se estudiará dentro del tipo de transductores activos como generador fotovoltaico.

2.3. INDUCTIVOS: convierten un cambio de la magnitud en un cambio de la autoinductancia de un devanado único. La inductancia de una bobina depende de la manera en que las líneas de flujo magnético atraviesen sus arrollamientos.

Los cambios de inductancia pueden efectuarse mediante el movimiento de un núcleo ferromagnético interior al devanado (permeancia variable) o mediante cambios de flujo introducidos externamente en un devanado con un núcleo fijo (reluctancia variable). Estos cambios de inductancia se pueden medir como un cambio de amplitud en un puente de impedancias, o bien como un cambio de la frecuencia de resonancia de un circuito oscilante.

3. TRANSDUCTORES ACTIVOS

ELECTROMAGNETICOS: convierten un cambio de la magnitud a medir en una fuerza electromotriz (tensión de salida) inducida en un conductor, debida a un cambio en el flujo magnético en ausencia de excitación (basados en la ley de inducción de Lenz). El cambio en el flujo magnético se realiza usualmente por un movimiento relativo entre el electroimán y un imán o porción de material magnético. Dos típicos ejemplos de este tipo de transductores son los tacómetros (o tacogeneradores) de continua y alterna, tal y como se puede observar en las figuras de abajo.

FOTOVOLTAICOS: son transductores activos que convierten un cambio de la iluminación incidente sobre una unión semiconductor en un cambio en la tensión generada en dicha unión. El ejemplo más típico es el de las células solares fotovoltaicas (fotodiodos).

FOTOELECTRICOS: convierten la radiación incidente sobre algunos materiales (metales) en emisión de electrones, que pueden configurar una corriente eléctrica, añadiendo un generador externo y una resistencia.

TERMOELECTRICOS: convierten la diferencia de temperatura existente entre las uniones de dos materiales distintos seleccionados, en un cambio en la fuerza electromotriz generada (efecto Seebeck).

Este efecto se aplica en los termopares, que son quizás los elementos más utilizados en termometría. Estos transductores consisten en un par de barras o hilos de metales distintos unidos por uno de los extremos, que es el que se utiliza como unión caliente (sensora), mientras que el otro se utiliza como unión fría o de referencia. La temperatura de la unión de referencia puede ser cualquiera, sin embargo, usualmente se mantiene al punto de hielo. Para algunas aplicaciones puede utilizarse satisfactoriamente como referencia, la temperatura ambiente. En este caso, hay que corregir el valor observado, sumándole una tensión igual a la que se obtendría mediante una diferencia de temperaturas igual a la que hay entre la unión de referencia y 0°C:

$$E_T = E_{\text{observada}} + E_{\text{ref.}}$$

En la práctica, pueden aparecer también potenciales termoeléctricos en los propios terminales del sistema de medida, (a través del cual se obtendrá una tensión como función de la temperatura), especialmente cuando la carga se localiza a cierta distancia. Para solucionar este problema, lo que se suele hacer es utilizar hilo de extensión de termopar, en lugar de los típicos terminales de cobre.

Un limitado número de combinaciones de metales han recibido aceptación internacional, de modo que los laboratorios de estándares se encargan de publicar tablas de los valores de las tensiones generadas como función de la temperatura, para cada tipo de termopar. Como podemos observar en la tabla adjunta, estas relaciones no son lineales.

PIEZOELECTRICOS: convierten un cambio en la magnitud a medir en un cambio en la carga electrostática o tensión generada por ciertos materiales (algunos cristales como el cuarzo y materiales cerámicos) cuando se encuentran sometidos a un esfuerzo mecánico (fuerzas de cizalladura, tensión o compresión). También se da el fenómeno inverso, es decir, cuando se aplica una tensión eléctrica a un material piezoeléctrico, se obtiene una deformación. Se suelen utilizar en aplicaciones dinámicas (acelerómetros sísmicos), si bien este principio se puede utilizar en cualquier situación en la que la variable a medir se pueda convertir en una fuerza que resulte en la deformación de un cristal adecuado.

4. OTROS TIPOS DE TRANSDUCTORES.

Dentro de este último apartado, vamos a describir algunos transductores que por su naturaleza no encajan en los grupos anteriormente estudiados, pero que por sus numerosas aplicaciones, interesa conocerlos.

TRANSDUCTORES DIGITALES.

En el sentido estricto, este tipo de transductores deberían medir una magnitud física y producir a la salida un código digital. Ya que pocos dispositivos dan una salida digital en respuesta a un fenómeno natural, es difícil encontrar transductores puramente digitales, quizás los codificadores digitales (encoders) serían la mejor excepción. Sin embargo, son más numerosos los transductores que producen un tren de pulsos digitales en respuesta a un determinado fenómeno físico, son los llamados transductores cuasi-digitales.

La medida de posiciones lineales y angulares (codificadores de posición) ha sido hasta el momento el campo con más desarrollos de transductores digitales, pudiendo distinguir entre los codificadores incrementales, que son del tipo cuasi-digital, y los codificadores absolutos, que son puramente digitales.

Codificadores incrementales.

Un codificador incremental está basado en un elemento lineal o un disco que se desplaza solidario al objeto cuya posición se desea determinar. Dicho elemento está constituido por patrones de dos tipos (caracterizados por propiedades diferentes), dispuestos de forma alternativa y equidistante. De este modo, un incremento de posición produce un cambio definido en la salida, que se detecta mediante algún dispositivo sensor o cabeza de lectura, capaz de discernir esa propiedad cambiante con la posición, tal y como se observa en la figura siguiente.

Las propiedades empleadas para la diferenciación de los patrones pueden ser magnéticas, eléctricas (codificadores de contacto) u ópticas. En cualquier caso, la salida básica es en forma de tren de pulsos con un ciclo de trabajo del 50%.

Los codificadores ópticos son los más comunes debido a la exactitud que se consigue en su

fabricación y al uso de LEDs, y encuentran aplicaciones en diferentes campos de la ingeniería: robótica, plotters, ratones, cabezales de lectura de discos magnéticos, máquinas-herramienta, etc.

Los codificadores suelen consistir en un par de discos, uno de los cuales es fijo mientras que el otro gira solidario al cuerpo cuyo desplazamiento queremos medir. Cada uno de los discos es básicamente opaco, pero se define una serie de ventanas en su interior. El fijo tiene una única ventana por donde pasa la luz emitida, y el segundo tiene dos pistas de ventanas equiespaciadas a lo largo del disco, de modo que la pista interna está desplazada (una anchura de media ventana) respecto de la externa. Dos detectores de luz están situados detrás del segundo disco de forma que cada uno de ellos está alineado con una de las pistas.

Conforme el segundo disco gira, la luz alternativamente entra y deja de hacerlo en los detectores, coincidiendo con el paso de ventanas y regiones opacas, respectivamente. Los pulsos obtenidos son enviados a un contador que proporciona la cuenta correspondiente a la posición alcanzada relativa a una referencia inicial. El disco externo da información primaria referida a la magnitud de la rotación, pero no consigue ninguna información relativa al sentido de giro, que sí se puede obtener gracias a la existencia de la pista más interna.

En función del sentido de giro, los pulsos correspondientes a esta segunda pista están adelantados o atrasados respecto a los primeros. La salida de un sencillo circuito digital (por ejemplo, un biestable tipo D activado por flanco), que analiza la relación entre los dos trenes de pulsos, puede servir para controlar la entrada up/down de un contador bidireccional, determinándose una posición absoluta del movimiento.

Codificadores absolutos.

Este tipo de codificadores, a diferencia de los incrementales, proporcionan una salida digital de un determinado número de bits, relacionada directamente con la posición absoluta del desplazamiento.

La apariencia de estos elementos es bastante similar al anterior, cambiando básicamente el diseño de los patrones de ventanas en el disco móvil, tanto en cuanto a su disposición como a su número de pistas (que suele ser de cuatro o mayor). Consecuentemente, se necesita un detector por pista, que da un "1" cuando la energía es detectada y un "0", en caso contrario. Las salidas digitales de cada uno de los detectores se combinan para dar un determinado código.

Mientras esta disposición es perfectamente válida en teoría, aparecen problemas en la práctica debido a dificultades de fabricación, especialmente cuando el número de pistas se hace grande, ya que es difícil conseguir que los límites de las ventanas en cada pista estén perfectamente alineados entre sí. Cualquier mala alineación significa que los detectores conmutarán en diferentes instantes de tiempo, dando lugar a códigos de salida erróneos (por ejemplo, en un codificador de 4 bits, puede producirse un 1111 en el tránsito entre 0111 y 1000).

Para superar esta dificultad, en la práctica se usan dos soluciones diferentes. La primera de ellas es añadir una pista externa adicional, conocida con el nombre de pista anti-ambigüedad, que junto con el detector correspondiente actúa como habilitador de la salida digital, evitando los posibles defectos en los límites de los sectores. La segunda es algo más simple y económica, ya que lo único que hace es utilizar un patrón de ventanas de acuerdo a un código especial, conocido como código de Gray y que se caracteriza por cambiar un solo bit de una representación digital a la siguiente, esto es, de una posición angular a la contigua. La traducción de código Gray a binario debe ser realizado bien por una lógica externa o por un computador.

Los codificadores angulares, tanto los incrementales como los absolutos, pueden ser usados también para medir velocidades. Un método es observar la variación producida en la posición en un intervalo fijo de tiempo y a partir de ella, calcular la velocidad. El otro es fijar dos posiciones absolutas, y calcular la velocidad a partir del tiempo transcurrido entre ambas.

TRANSDUCTORES DE ALCANCE.

Los transductores de alcance (range transducers) proporcionan una técnica muy usada de medidas de desplazamientos lineales de un cuerpo respecto de algún límite fijo. La característica común de estos sistemas es que cuentan con un emisor de energía, un detector de energía y un medio electrónico de medida del "tiempo de vuelo" de la energía entre el emisor y el detector. La forma de energía puede ser tanto ultrasonidos como luz.

En sistemas de ultrasonidos, la energía es transmitida en forma de trenes de pulsos de alta frecuencia (por encima de los 20KHz, límite de las audibles) y suelen emplear cerámicas piezoeléctricas, tanto para generadores como para receptores. Normalmente se usan para medidas de hasta unos 5 ó 10 metros (en el aire). Debido a las dificultades en la medida del tiempo de vuelo con suficiente resolución, estos sistemas no son muy utilizados para distancias menores de 300mm.

Los ultrasonidos encuentran también aplicaciones en: detección de presencia, sonar, medida de nivel de líquidos, aplicaciones médicas, formación de imágenes, etc.

En sistemas ópticos suele trabajarse con un fuente de luz láser. La alta velocidad de la luz en el aire, permite obtener medidas de larga distancia con una resolución razonable (telémetro láser).