



UN SIMPLE PUENTE PARA LA CALIBRACIÓN DE INDUCTORES PATRONES

Daniel Slomovitz, Carlos Faverio, Daniel Izquierdo, Alfredo Spaggiari

UTE, Laboratorio, Montevideo, Uruguay, labute@ute.com.uy

Resumen: Se presenta el diseño de un puente Owen destinado a la comparación de inductores patrones. El objetivo del trabajo es simplificar su construcción, para lo cual se ha reducido al mínimo sus componentes, tratando de usar elementos de uso general en laboratorios, sin que ello signifique sacrificar en demasía su desempeño.

Palabras clave: Alta precisión, estándar, inductor, puente, comparador.

1. INTRODUCCIÓN

Existen diferentes métodos para la calibración de inductores patrones, la mayoría basados en sistemas de puentes. Todos usan como elementos de referencia en sus ramas resistores y capacitores. Los más conocidos son los puentes propuestos por Maxwell-Wien, Hay y Owen [1]. La diferencia entre ellos reside en la ubicación de los resistores y capacitores en las diferentes ramas. Eso lleva a que algunos sean más prácticos que otros en medidas de altos o bajos valores de inductancia, o altos o bajos factores de mérito (Q). Sus circuitos básicos son simples, pero la implementación real es compleja. Eso se debe a que aparecen efectos parásitos, tales como capacidades, inductancias y mutuas parásitas. Algunas ramas poseen elementos variables, asociados a llaves, lo que agrega mayores resistencias y capacidades parásitas, de valores desconocidos, según la posición de las llaves.

En el caso analizado en este trabajo, de calibración de inductores patrones, algunos de los aspectos que complican la realización de estos puentes pueden ser evitados. En primer lugar, los valores de los inductores patrones son en décadas, y el apartamiento real de sus valores nominales suele ser muy pequeño. Esto lleva a que no sea necesario diseñar el puente para rangos continuos de valores. Basta diseñarlo para valores discretos (múltiplos de 10) con un

muy pequeño margen de ajuste. Típicamente, un rango de ajuste de $\pm 1\%$ suele ser suficiente. En lo que sigue se discute el diseño de un puente basado en estos principios.

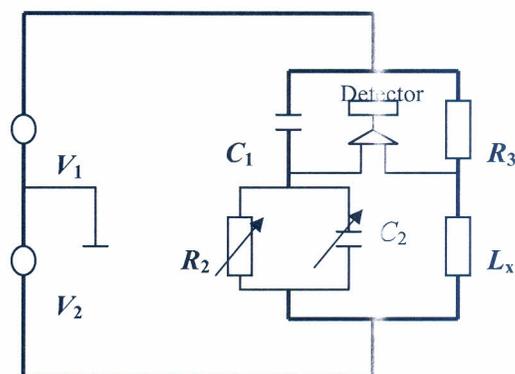


Fig. 1. Diagrama general del puente propuesto

2. DISEÑO GENERAL

Entre los diversos puentes, se ha elegido el puente de Owen, versión paralelo. Este puente (ver Fig. 1) tiene la ventaja de no contener ningún elemento en paralelo con la rama del capacitor patrón (C_1). Por tanto, todos los problemas de capacidades parásitas introducidas en esa rama son minimizados. Eso es importante para simplificar los blindajes y evitar la influencia de las referidas capacidades. Obviamente, esas capacidades serán trasladadas a otras ramas, en particular a la rama 2. En ésta se colocan los dos elementos de ajuste (C_2 y R_2). Por tanto, las capacidades parásitas estarán en paralelo con C_2 , modificando ligeramente su valor. Veremos a continuación que esto influye muy débilmente en el valor calculado de la inductancia. En cambio, de haberse usado un puente

Maxwell-Wien, donde el resistor variable está en paralelo con el capacitor patrón, las capacidades parásitas se sumarían directamente a dicho capacitor, causando errores de primer orden. Las ecuaciones del puente propuesto son

$$Q = \frac{1}{R_2 C_2 \omega} \quad (1)$$

$$L = \frac{R_2 R_3 C_1}{1 + \frac{1}{Q^2}} \left(1 + \frac{D}{Q} \right) \quad (2)$$

siendo D la tangente delta del capacitor patrón C_1 . El aspecto complicado de la ecuación (2) surge de haber usado el puente en su versión paralelo (C_2 en paralelo con R_2) conjuntamente con un modelo serie del inductor bajo ensayo. Si se hubiera usado el modelo paralelo para el inductor, el resultado hubiera sido el tradicional $L=R_2 R_3 C_1$ (despreciando D), pero esto en general no es posible pues la mayoría de los inductores patrones refieren sus valores al modelo serie. Usar el puente en su versión serie también simplificaría (2), pero en tal caso al quedar el capacitor C_2 en serie con R_2 impediría una construcción de cuatro terminales para los resistores, elementos que influyen en el resultado en forma directa. Tanto R_1 como R_2 pueden medirse externamente fácilmente, disponiéndose de los cuatro bornes de cada resistor en el panel frontal del puente. Al usarse la versión paralelo del puente conjuntamente con la versión serie del inductor, se eliminan las desventajas señaladas. En contrapartida, la ecuación (2) muestra que el valor de inductancia dependerá, además de los valores de las ramas del puente, de la frecuencia, a través de Q y D . Si bien esta condición no es deseable, tampoco afecta la incertidumbre del resultado en forma significativa. En conclusión, se propone usar un esquema de puente de Owen diseñado para modelos paralelos de inductores, con modelos tipo serie, por la ventaja de evitar capacidades parásitas en paralelo con el capacitor patrón, principal fuente de incertidumbre, y mantener la conexión de los resistores en la versión de cuatro terminales.

En referencia a los valores de las ramas, el puente se diseñó para la medida de inductores patrones entre 1 mH y 100 H, aunque este trabajo se centra en el rango de 10 mH. El capacitor patrón es externo al puente y su valor es de 10 nF, R_3 vale 100 Ω , el resistor R_2 posee un resistor fijo de 10100 Ω más tres décadas que varían entre 0 Ω y 111.1 Ω , con resolución de 0.1 Ω , y C_2 es un capacitor variable continuo de 1000 pF en paralelo con un capacitor fijo (1000 pF). Esto permite medir inductores (a 1 kHz) con un Q mínimo de 7, suficiente para los inductores patrones que se disponen. Si fuera necesario medir inductores con menores Q , habría que aumentar ligeramente el valor máximo del resistor de décadas de R_2 . Para otros rangos, deberá cambiarse los valores del capacitor patrón C_1 y del resistor R_3 .

Como detector de cero se usa un amplificador de bajo ruido, en cascada con un filtro pasa-banda cuya frecuencia central coincide con la de la fuente (1 kHz) y un osciloscopio (Tektronix TDS 3012). Este último se usa en el modo FFT, de manera de medir exclusivamente la componente fundamental, y conjuntamente con el filtro, lograr un rechazo muy grande a los componentes armónicos. El conjunto logra sensibilidades del orden de unos pocos microvolt, suficientes para resolver el cero con incertidumbres cercanas a 10 $\mu\text{H}/\text{H}$.

3. ELEMENTOS PARÁSITOS

Las mayores capacidades parásitas están en la rama 2, asociadas al resistor variable R_2 , pues éste consta de varias décadas de resistores con sus llaves correspondientes. Para reducir la influencia de esta capacidad, la parte variable (tres décadas) está conectada en el punto más cercano a tierra de esta rama. Esa capacidad parásita afecta al valor de C_2 , el cual a su vez influye en el resultado de la inductancia. Sin embargo, el peso relativo es bajo, atenuándose, aproximadamente, en un factor $1/Q$. Capacidades parásitas del orden del picofarad, afectan el resultado en unos 20 $\mu\text{H}/\text{H}$. La rama R_3 influye en similar forma respecto a sus capacidades parásitas, pero en este caso por ser un resistor fijo, ellas son mucho menores. Las resistencias parásitas de las llaves, estimadas en algunos miliohm, alteran el resultado en el orden del $\mu\text{H}/\text{H}$.

Se ha tenido especial cuidado en blindar electrostáticamente la zona de alto potencial (unión entre C_1 y R_3) del resto del puente. Pequeñas capacidades parásitas podrían llegar a variar el resultado en órdenes que pueden llegar al 0.1%. Para ello, se encerró al resistor R_3 dentro de un recinto metálico, blindado del resto del puente. Todo el puente está encerrado en una pequeña caja metálica, la cual se usa como guarda, y un sistema activo ajusta a cero la diferencia de potencial entre guarda y tierra (tierra de Wagner). Existen varias propuestas para esto, desde algunas que usan una rama auxiliar de tipo R-C (propuesta original) hasta otras que usan elementos activos basados en amplificadores operacionales. Por simplicidad, en este caso se usó como fuente de tensión del puente un calibrador comercial (FLUKE 5500A), el cual posee dos salidas independientes, uniéndose a tierra su punto medio. Ajustando apropiadamente la magnitud de cada fuente y el ángulo entre ellas, se puede lograr que el potencial en las salidas al detector del puente sea el mismo que tierra (y por ende que el blindaje, el cual está unido a tierra). Esto elimina la necesidad de circuitos auxiliares y simplifica el armado del puente. La Fig. 2 muestra una fotografía del prototipo, donde sólo se usaron unos pocos elementos simples, disponibles fácilmente en laboratorios de calibración.

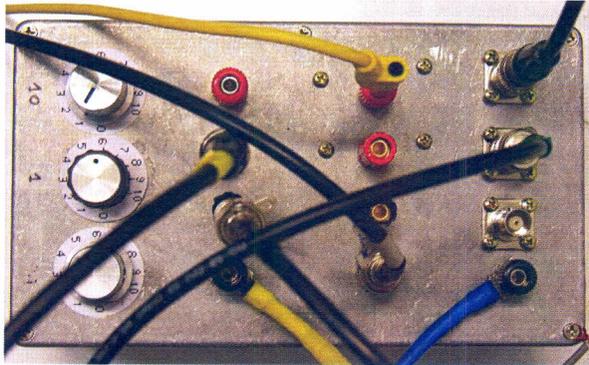


Fig. 2. Prototipo del puente

4. INCERTIDUMBRE

La incertidumbre en los resultados está fijada por la incertidumbre en los valores de las ramas de puente, más la influencia de los elementos parásitos. El objetivo es llegar a incertidumbres de algunas pocas decenas de $\mu\text{H}/\text{H}$. Todas las ramas resistivas fueron conectadas de manera de disponer exteriormente de cuatro bornes en cada una, lo que posibilita su medida con alta precisión previo al uso del dispositivo. De todas formas, los resistores fijos son de alta estabilidad (Vishay), y los resistores variables influyen poco en el resultado (resistores del 1% influyen en menos de 10 $\mu\text{H}/\text{H}$). Por esto no es necesario usar resistores de muy alta estabilidad en las tres décadas variables. El capacitor variable es uno de tipo comercial (Philips, modelo GM 4353), al cual se le conecta en paralelo un capacitor fijo. Su influencia en la incertidumbre es baja. Respecto al capacitor patrón, la medida final de inductancia depende directamente de este valor, tal como ocurre en cualquier tipo de puente similar. Es necesario contar con un patrón con incertidumbre apropiada a la incertidumbre que se espera lograr en la medida de inductancia. En el prototipo se usó un capacitor de 10 nF General Radio modelo 1409-L con una incertidumbre de 50 $\mu\text{F}/\text{F}$. Este se conecta con tres terminales, de manera de eliminar la capacidad parásita de los cables de conexión. El inductor a medir se conecta con cables coaxiales de muy baja inductancia, siendo su contribución a la incertidumbre total del orden de 10 $\mu\text{H}/\text{H}$, plenamente aceptable para la meta global de incertidumbre propuesta.

Un detallado análisis de incertidumbre y mayores datos del puente se presentarán durante el congreso.

REFERENCIAS

- [1] F. K. Harris, *Electrical Measurements*, London, Chapman & Hall, 1952.