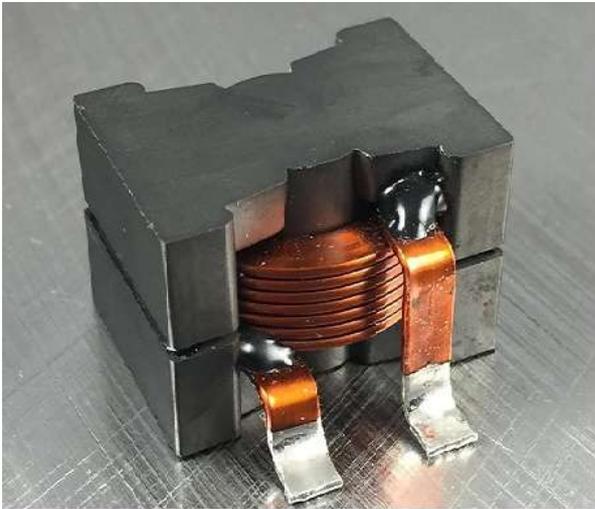


CALCULO DE INDUCTORES DE POTENCIA



El cálculo y la fabricación de los componentes magnéticos de los convertidores, es una de las tareas que mayor rechazo provoca entre los técnicos y aficionados a la electrónica de potencia. En realidad, no es una labor tan difícil, si se conocen los conceptos básicos del campo magnético, y las propiedades de los principales materiales ferromagnéticos.

Este artículo pretende familiarizar al lector con los inductores de potencia, y ofrece una sencilla metodología de cálculo, que creo puede ser útil para profesionales y aficionados.

Los elementos inductivos constituyen una parte fundamental en Electrónica de potencia, resulta casi imposible prescindir de ellos en cualquier aplicación real, por ello todo aquel que quiera incursionar en este mundo debe familiarizarse con los conceptos fundamentales de la teoría del campo magnético y las propiedades de los materiales ferromagnéticos usados para la fabricación de inductores y transformadores.

Los transformadores y autotransformadores se usan para transmitir la energía eléctrica hacia los circuitos secundarios, y permiten modificar o no su amplitud y fase. Los inductores se usan para almacenar la energía, esa es la principal diferencia entre ellos.

Los transformadores se fabrican con núcleos ferromagnéticos de alta permeabilidad magnética relativa μ_r alcanzando valores de varias decenas de miles. El material empleado se elige fundamentalmente en dependencia de la frecuencia de trabajo. Desde listones de acero electrotécnico para las frecuencias más bajas, hasta una gran variedad de materiales basados en polvo prensado de diferentes tipos de aleaciones (ferritas) para las frecuencias más altas, pasando por materiales de última generación a base de nanos cristales, partículas pulverizadas, materiales amorfos y otras tecnologías revolucionarias, que están logrando disminuir drásticamente el volumen de los inductores y transformadores. Es muy importante la correcta elección del tipo de núcleo para cada aplicación, ya que cada una de ellas ha sido optimizada para un rango de frecuencia específico, con su correspondiente μ_r , Inducción Magnética máxima B_m y nivel de pérdidas por histéresis y corrientes parásitas. Ya hay disponibles anillos magnéticos con entrehierro distribuido, destinados a la fabricación de inductores de potencia, capaces de almacenar grandes cantidades de energía.

En general, cualquier material magnético usado para la fabricación de inductores y transformadores debe cumplir lo mejor posible con las siguientes exigencias:

- Alto valor de la permeabilidad magnética relativa μ_r , tanto inicial como máxima. Este parámetro incide directamente en el número de espiras mínimo necesario para alcanzar la inductancia requerida

- Debe ser magnéticamente blando, lo que implica que se magnetice y desmagnetice fácilmente, con bajas pérdidas por histéresis
- Tener un alto valor de inducción magnética de saturación B_s , lo que permite disminuir el tamaño de los equipos electrónicos
- Tener alta resistencia al paso de la corriente eléctrica, para minimizar las corrientes parásitas
- Mantener las propiedades magnéticas ante grandes variaciones de la temperatura de trabajo
- Tener un bajo coeficiente de magnetostricción, para disminuir las vibraciones y hacer estable su funcionamiento bajo fuertes campos magnéticos
- Mantenerse estable ante cambios de temperatura, presentar una temperatura de Curie elevada
- Etc.

Está claro, que no existe ningún material ideal que reúna fielmente todas las exigencias arriba mencionadas. Por ello, no existe un material universal que satisfaga todas las necesidades y pueda ser usado en todas partes y aplicaciones; en la mayoría de los casos, la optimización de un parámetro afecta a otros. Por ejemplo, es difícil mantener elevadas al mismo tiempo la permeabilidad magnética μ_r y la resistencia eléctrica del material, por lo que los núcleos destinados a la fabricación de inductores y transformadores de potencia a frecuencias por encima de 1MHz, presentan una μ_r muy por debajo de las 1000 unidades.

Es importante destacar, que los núcleos magnéticos con altos valores de μ_r , son buenos para la fabricación de transformadores, pero no para la fabricación de inductores, ya que no permiten almacenar grandes cantidades de energía.

Para almacenar grandes cantidades de energía se requiere la presencia de un entrehierro (Airgap), cuyo volumen mínimo en mm^3 debe ser debidamente calculado.

Las ferritas blandas convencionales, cuyo material base es el Mn-Zn y el Ni-Zn, presentan un elevado valor de la permeabilidad relativa, y su Inducción magnética de saturación B_s no supera los 0.5 T (5000 gauss). Estas ferritas no se recomiendan para la fabricación de inductores, debido a su bajo valor de B_s .

Para la fabricación de inductores, es mucho más aconsejable el uso de alguno de los siguientes materiales:

- **Núcleos MPP.** Una mezcla de Ni-Fe-Mo. Presentan gran estabilidad térmica y un buen comportamiento ante campos magnéticos fuertes. Presentan las menores pérdidas en comparación con cualquier otro material ferromagnético; su permeabilidad magnética efectiva alcanza las 200 μ . Este material presenta entrehierro distribuido, y está destinado a la fabricación de inductores en convertidores DC-DC, y filtros con elevado factor de calidad Q.

- **Núcleos High Flux.** Una mezcla de Fe-Ni. Presentan una alta inducción magnética de saturación $B_s = 1.5 T$ (15000 gauss). Su permeabilidad magnética puede alcanzar los 160 μ . Ideal para la fabricación de inductores, choques, transformadores de pulsos y flybacks.
- **Núcleos Sendust.** Una mezcla de Fe-Si-Al. Su inducción magnética de saturación $B_s = 1.0 T$ (10000 gauss). La permeabilidad magnética puede alcanzar 125 μ . Prácticamente carecen del fenómeno de magnetostricción, por lo que permiten fabricar inductores y transformadores que no generan ruido audible.
- **Núcleos Mega Flux.** Una mezcla de Fe-Si. Alcanzan la mayor inducción magnética de saturación B_s en comparación con todos los demás materiales descubiertos hasta la fecha. Llegando a los 1.6 T (16000 gauss). Su permeabilidad magnética no supera las 90 μ .

Al diseñar un inductor, es importante tener en cuenta la forma de onda de la corriente que por él circula. No es lo mismo trabajar en corriente alterna, que en corriente directa, o corriente alterna con componente de DC. El ciclo de magnetización puede ser simétrico o asimétrico. Al realizar el análisis es necesario considerar los valores instantáneos de voltajes y corrientes durante los procesos transitorios y régimen estacionario, para evitar la saturación del núcleo.

Los transformadores de potencia, generalmente trabajan solamente en ciclos simétricos de magnetización, ya que una mínima componente de corriente directa a través de cualquiera de sus devanados puede ser catastrófico para el funcionamiento de todo el convertidor. En la mayoría de los casos, el bobinado primario se conecta en serie con un capacitor de potencia, que garantiza el equilibrio de las áreas voltios / segundos en cada periodo, o dicho de otra forma bloquea el paso de la componente de corriente continua que pueda estar presente.

Entre los principales fabricantes de materiales magnéticos, podemos citar grandes marcas como *Epcos*, *TDK*, *Ferroxcube*, *Fair Rite*, *Magnetics*, *Gammamet*, *Chan Sung (CS)*, *Micrometals* entre otras. En sus Webs, estas compañías ofrecen todos los datos necesarios para la correcta selección y uso de sus núcleos.

Cálculo de un Inductor

Primeramente, calculamos el tamaño mínimo del entrehierro necesario para almacenar la energía, teniendo como datos la inductancia L del inductor, la corriente máxima de pico y la inducción magnética máxima permitida por el material usado como núcleo.

La energía almacenada por un inductor, la podemos calcular como la suma de la energía W_{fe} almacenada en el campo magnético del núcleo y la energía W_{δ} almacenada en el entrehierro:

$$W_{total} = W_{fe} + W_{\delta} ; \quad (1)$$

$$W_{total} \approx \frac{B^2 \cdot l_{fe} \cdot A}{2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r} + \frac{B^2 \cdot \delta \cdot A}{2 \cdot \mu_0}$$

Donde

B es la inducción magnética en Tesla

l_{fe} es la longitud de las líneas magnéticas dentro del núcleo, en metros

δ es la longitud del entrehierro en metros

A es el área de la sección transversal del núcleo, en m^2

$\mu_0 = 4. \pi. 10^{-7} N/A^2$ permeabilidad magnética del vacío

Normalmente, para la fabricación de inductores se usan materiales magnéticos con altos valores de μ_r , por lo que casi la totalidad de la energía se almacena en el entrehierro, podemos despreciar W_{fe} y considerar que toda la energía almacenada por el inductor es:

$$W_{total} \approx \frac{B^2 \cdot \delta \cdot A}{2 \cdot \mu_0}$$

Por otra parte, sabemos que la energía almacenada por una bobina se puede calcular también por la fórmula:

$$W = \frac{L \cdot I^2}{2} ; \quad (2)$$

Si juntamos las dos últimas expresiones, entonces tenemos que el volumen mínimo del entrehierro requerido $V = \delta \cdot A$ se puede calcular por la fórmula

$$V_{\delta} \geq \frac{L \cdot I^2 \cdot \mu_0}{B^2} ; \quad (3)$$

Donde:

V_{δ} - Volumen del entrehierro en metros cúbicos

L - Inductancia del inductor en Henry

I - Corriente de pico en Amperios

B - Inducción máxima del campo magnético del núcleo en Tesla

$\mu_0 = 4. \pi. 10^{-7} N/A^2$ permeabilidad magnética del vacío

De aquí vemos, que para disminuir el tamaño de los inductores, debemos seleccionar materiales con altos valores de Inducción magnética B . Para la mayoría de las ferritas, su valor no sobrepasa los 300 mili Tesla, pero hay materiales especialmente

optimizados para ser usados como inductores, cuya inducción magnética alcanza hasta 1.6 T.

Una vez conocido el volumen del entrehierro V_{δ} podemos elegir el núcleo magnético apropiado para la fabricación del Inductor. Lo más sencillo sería seleccionar un material con entrehierro distribuido, en cuyo caso solo habría que mirar en el datasheet y buscar un núcleo con un volumen de entrehierro mayor o igual al resultado de nuestro cálculo.

No siempre se tiene a mano uno de estos núcleos, por lo que lo más habitual es usar un núcleo de ferrita del tipo EE, EI, P, Rm , etc. y añadirle un entrehierro δ artificial.

La sección transversal del núcleo debe ser lo suficientemente grande, para que el entrehierro δ no sobrepase 1.5 mm, ya que entonces la permeabilidad magnética efectiva del núcleo caería demasiado, y se necesitarían muchas espiras para conseguir la inductancia nominal. Un elevado número de espiras conlleva a mayores pérdidas en conducción, aumento de la capacitancia parásita, y aumento del tamaño del inductor.

Cuando hayamos elegido el núcleo, podemos calcular el número de espiras del inductor, partiendo de los siguientes datos:

$\delta = V_{\delta}/A_e$ – Longitud del entrehierro en metros

L – Inductancia del inductor en Henry

A_e – Sección transversal núcleo en m^2

μ_r – Permeabilidad magnética relativa del material del núcleo

$\mu_0 = 4. \pi. 10^{-7} N/A^2$ permeabilidad magnética del vacío

l_m – Longitud de las líneas magnéticas del núcleo en m

Calculamos la permeabilidad magnética efectiva del núcleo con entrehierro

$$\mu_{ref} = \frac{\mu_r \delta}{(1 + (\mu_r \cdot \frac{\delta}{l_m}))}; \quad (4)$$

Finalmente, el número de espiras N del inductor:

$$N = \sqrt{\frac{L \cdot l_m}{\mu_{ref} \cdot \mu_0 \cdot A_e}}; \quad (5)$$

El diámetro del alambre del devanado, depende del valor de la corriente efectiva I_{rms} y de la densidad S de la corriente permitida según las características de la bobina. El

valor de S suele fijarse entre $1.5 \dots 5 \text{ A/mm}^2$ dependiendo de las condiciones de refrigeración y el aumento de temperatura permitido.

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot I_{rms}}{\pi \cdot S}}, \text{ en mm} \quad (6)$$

En la página de cálculos de la Web www.ledoelectronics.com pueden disfrutar de un Apple que le permite realizar todos estos cálculos de una forma rápida y sencilla.

Cálculo de pérdidas

Las pérdidas de potencia provocan el calentamiento del inductor. Tenemos las pérdidas en el cobre y las pérdidas en el núcleo.

$$P_{Total} = P_{Cu} + P_{Core}; \quad (7)$$

Las pérdidas en el cobre P_{Cu} tienen que ver con la resistencia del alambre de la bobina al paso de la corriente:

$$P_{Cu} = I^2 \cdot R; \quad (8)$$

A altas frecuencias es necesario considerar el efecto pelicular, que hace que disminuya el área efectiva del conductor, por lo que se recomienda minimizarlo, bobinando con múltiples hilos de menor diámetro, o usar hilo de Litz en lugar de conductor macizo.

La profundidad de penetración de la corriente en metros:

$$Penetracion = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \sigma}};$$

Donde: $\omega = 2\pi \cdot f$ es la frecuencia angular;

μ – Permeabilidad magnética del material del conductor;

σ – Conductividad del material del conductor;

Las pérdidas magnéticas P_V son la suma de las pérdidas en la magnetización del núcleo (histéresis) y las pérdidas provocadas por las corrientes parásitas. Ambas aumentan considerablemente a medida que aumenta la frecuencia de trabajo del inductor.

La siguiente tabla muestra el valor de P_V dado por los fabricantes para los materiales más comunes en el mercado:

Tabla1. Pérdidas magnéticas por volumen.

MATERIAL	$P_V \left(\frac{W}{cm^3} \right) - 25 \text{ kHz}$	$P_V \left(\frac{W}{cm^3} \right) - 100 \text{ kHz}$	$P_V \left(\frac{W}{cm^3} \right) - 500 \text{ kHz}$
N27	0.15 (100 °C 200 mT)	0.92 (100 °C 200 mT)	
N87	0.05 (100 °C 200 mT)	0.37 (100 °C 200 mT)	0.25 (100 °C 50 mT)
N30	0.75 (100 °C 200 mT)	0.45 (100 °C 200 mT)	
3F3	0.05 (100 °C 200 mT)	0.08 (100 °C 100 mT)	0.18 (100 °C 50 mT)
3C90	0.08 (100 °C 200 mT)	0.08 (100 °C 100 mT)	
CF-139	0.05 (100 °C 200 mT)	0.08 (100 °C 100 mT)	0.18 (100 °C 50 mT)

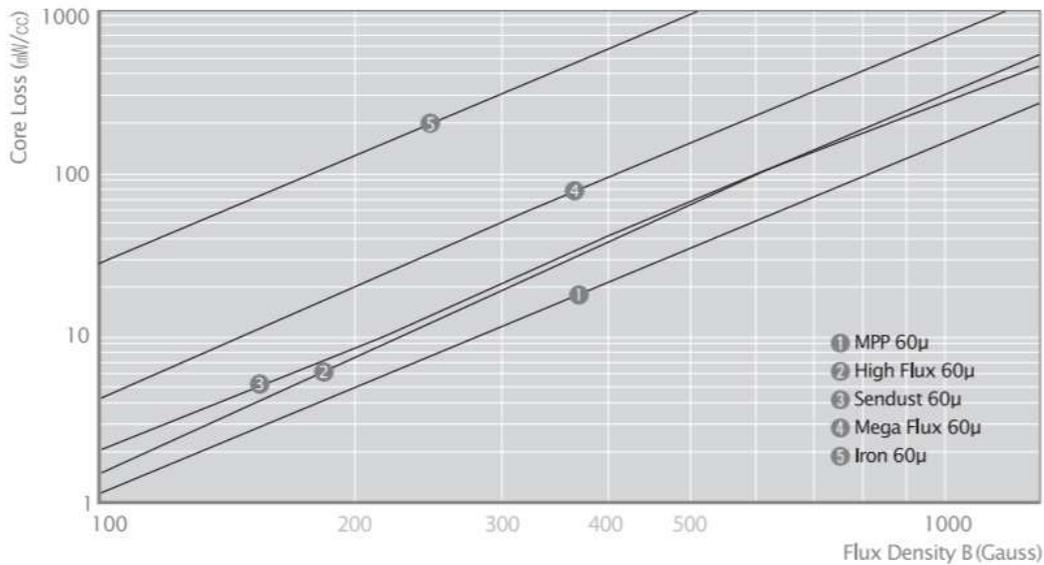


Fig.1. Pérdidas de los materiales especiales a 50 kHz. $P_V = \frac{mW}{cm^3}$

Es muy fácil estimar las pérdidas del núcleo, usando la tabla1 o el gráfico de la Fig.1. Solo hay que calcular el volumen del núcleo usado, V_{Core} en cm^3 o extraerlo de su hoja de datos (datasheet).

Entonces, las pérdidas magnéticas:

$$P_{Core} = V_{Core} \cdot P_V; \quad (9)$$

Donde: P_{Core} Pérdidas en el núcleo, en Vatios;

V_{Core} – Volumen del núcleo en cm^3 ;

P_V – Pérdidas relativas del material del núcleo. Se obtienen de la tabla1, del gráfico de la fig.1, o de la hoja de datos del material. Este valor depende de la frecuencia de trabajo y de la intensidad del campo magnético B .

Finalmente, calculamos las pérdidas totales del inductor, sumandos ambas pérdidas de acuerdo a la fórmula (7).

Ejemplo 1.

Veamos un ejemplo de cálculo de un inductor para un convertidor DC-DC buck que se alimenta de un rectificador trifásico conectado a la red de 380V AC, con una corriente máxima de salida de 15 A. Los cálculos del convertidor establecen que dicho inductor debe tener una inductancia $L = 240 \mu\text{H}$, y su corriente de saturación I_{sat} debe ser mayor de 15A .

Lo más eficiente sería seleccionar un núcleo toroidal del tipo High Flux o Sendust, con entrehierro distribuido, y un alto valor de B_s , lo que permitiría minimizar el volumen del inductor, y disminuir el ruido audible generado; sin embargo, tomaremos como núcleo para su fabricación, la configuración EE de Epcos con material N87, muy fácil de conseguir. Concretamente el E55/28/25, ya que hemos verificado que el modelo inferior E42/xx/xx se nos queda pequeño para la potencia requerida.

Entonces tenemos los siguientes datos para proceder con el cálculo:

Parámetro	valor	comentario
$L, \mu\text{H}$	240	Inductancia nominal del Inductor
I, A	15	Corriente nominal del Inductor
B_{max}, T	0.39	Inducción magnética máxima del material N87 a 100 °C
A_e, mm^2	420	Área de la sección transversal del núcleo
l_e, mm	124	Longitud de las líneas magnéticas
μ_e	1740	Permeabilidad efectiva del núcleo según hoja de datos

Calculamos el volumen del entrehierro:

$$V_{\delta} \geq \frac{L \cdot I^2 \cdot \mu_0}{B^2} = \frac{240 \times 10^{-6} \times 15^2 \times 4\pi \times 10^{-7}}{(0.39)^2} = 4.46 \times 10^{-7} \text{ m}^3 = 4.46 \times 10^2 \text{ mm}^3$$

Pueden verificar el resultado en la página de cálculos de mi web, en el apartado "Cálculo de Inductores"

Calculamos ahora la longitud del entrehierro requerido:

$$\delta = \frac{V_{\delta}}{A_e} = \frac{446 \text{ mm}^3}{420 \text{ mm}^2} = 1.062 \text{ mm}$$

Un valor que entra dentro de lo normal para este tamaño de núcleo. Valores por encima de los 2.5 mm no son aconsejables, ya que disminuiría demasiado la permeabilidad magnética efectiva, lo que dificultaría poder obtener la inductancia requerida; en ese caso sería necesario seleccionar un núcleo de mayor tamaño.

Para garantizar el entrehierro en el núcleo elegido, es necesario colocar entre sus dos partes, láminas separadoras con un espesor igual a la mitad del valor de δ obtenido en el cálculo anterior. Dichas láminas deben ser de un material no ferromagnético, y no conductor de la corriente eléctrica.

Calculamos la permeabilidad magnética efectiva del núcleo con entrehierro

$$\mu_{\text{ref}} = \frac{\mu_e}{(1 + (\mu_e \cdot \frac{\delta}{l_m}))} = \frac{1740}{(1 + 1740 \times \frac{1.062 \text{ mm}}{124})} = 109.42$$

Ahora ya podemos determinar el número de espiras necesario para obtener la inductancia nominal:

$$N = \sqrt{\frac{L \cdot l_e}{\mu_{ref} \cdot \mu_o \cdot A_e}} = \sqrt{\frac{24 \cdot 10^{-6} \text{Hn} \times 124 \times 10^{-3} \text{m}}{109.42 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 420 \times 10^{-6} \text{m}^2}} = 22.7 \text{ espiras}$$

$$N = 23 \text{ espiras}$$

Es importante destacar, que el número de espiras N obtenido, debe ser respetado. Si lo aumentamos para incrementar la inductancia, en ese mismo grado estaremos disminuyendo la corriente nominal del inductor, ya que la intensidad del campo magnético:

$$H = \frac{I \times N}{l_e}$$

Por último, calculamos el diámetro del alambre de cobre esmaltado con el que bobinaremos el Inductor:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot I_{rms}}{\pi \cdot S}} = \sqrt{\frac{4 \times 15 \text{A}}{\pi \times 5 \text{ A/mm}^2}} = 1.95 \text{ mm}$$

Hemos aplicado una densidad de corriente $S = 5 \text{ A/mm}^2$, ya que en los inductores con pocas espiras las condiciones de refrigeración del alambre son muy buenas.

El volumen del inductor calculado, podría disminuirse hasta cinco veces, si hubiésemos utilizado un anillo toroidal del tipo Sendust, High flux o Mega flux, los cuales por tener el entrehierro distribuido por todo el anillo, presentan una permeabilidad magnética efectiva por debajo de 180μ , pero su Inducción magnética de saturación B_s se encuentra entre los 1.2 y 1.6 Tesla.



Fig.2. Imagen del inductor construido acorde con los cálculos.

Mediciones prácticas de Inductores

Medición de la Inductancia

En muchas ocasiones es necesario poder medir los parámetros de un inductor desconocido, o comprobar otro que hayamos fabricado sobre un núcleo cuyos parámetros desconocemos, y hacerlo sin el uso de equipamiento sofisticado.

Esto es posible, se puede medir la inductancia L y la corriente de saturación de prácticamente cualquier Inductor usando un osciloscopio como instrumento fundamental. Se trata de métodos rudimentarios que permiten obtener estos parámetros con un error por debajo del 5%; precisión más que suficiente para garantizar la fiabilidad de nuestros convertidores.

La inductancia la podemos medir usando solamente un Osciloscopio, para ello conectamos en paralelo con

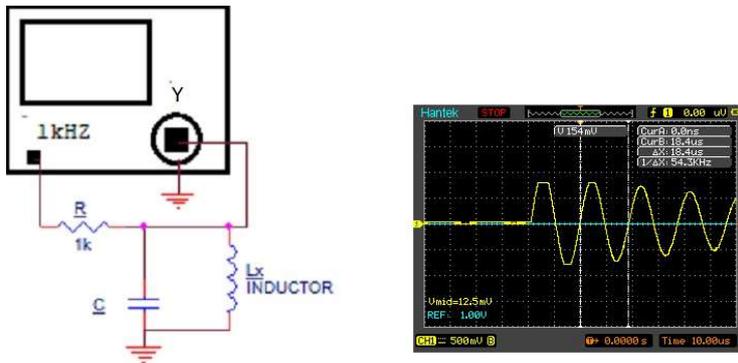


Fig.3. Medición de la inductancia de un Inductor usando un Osciloscopio.

el inductor Lx un capacitor de capacitancia conocida, y medimos la frecuencia de resonancia (oscilaciones amortiguadas que aparecen en la pantalla del osciloscopio. En caso de que el osciloscopio carezca de la típica señal de calibración, o en caso de que la inductancia de la bobina sea muy grande y la frecuencia de resonancia esté por debajo de los 5 kHz, entonces habría que usar otra fuente de señal para excitar el tanque resonante LxC, también se puede usar con este fin la salida de señal de sincronismo presente en muchos osciloscopios analógicos.

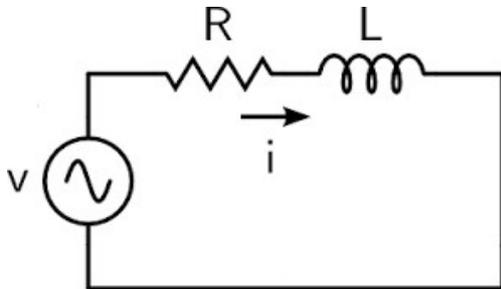
La instalación está representada en la Fig.1.8. La resistencia R solo se usa para limitar la corriente de la señal procedente de la salida de calibración. La instalación fue utilizada para comprobar el valor de la inductancia del Inductor fabricado con los cálculos del *ejemplo 1*. Se usó un capacitor de 33 nF, la frecuencia de resonancia fue de 54.3 kHz.

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} ; \quad L = \frac{1}{(2\pi \cdot f)^2 \cdot C} = \frac{1}{(2\pi \times 54.3 \times 10^3)^2 \times 33 \cdot 10^{-9}} = 260.5 \mu H$$

Al utilizar este método, hay que tener en cuenta que el inductor durante la medición se encuentra sometido a un campo magnético muy débil, y el núcleo ferromagnético presenta su permeabilidad magnética inicial. En el circuito real donde se use este inductor, su inductancia puede ser mayor o menor en dependencia de la intensidad del campo H.

La inductancia L de cualquier Inductor con núcleo ferromagnético no es una constante absoluta. Su valor fluctúa en dependencia de la intensidad del campo magnético H, la temperatura y otros factores externos.

Otra forma de medir la inductancia de un inductor, es conectarlo a una fuente de voltaje AC (Generador) en serie con una resistencia de valor conocido. Luego solo hay que aplicar la ley de Kirchoff y las fórmulas elementales para el cálculo de circuitos de corriente alterna. En todo momento, la suma de la caída de tensión en R más la caída de tensión en la bobina es igual al voltaje de la fuente de voltaje AC.



La caída de tensión en la resistencia $U_R = I \cdot R$ y la caída de tensión en la bobina (valor de pico)

$$U_L = I \cdot \omega L$$

Si conocemos la frecuencia de la fuente de alimentación, podemos calcular la inductancia de forma indirecta, midiendo las caídas de voltaje con un multímetro o un osciloscopio. Solo hay que adecuar la frecuencia de la fuente y el valor de la resistencia con el rango de la inductancia, de tal forma que las impedancias de R y L estén en el mismo orden. También es muy importante no usar resistencias bobinadas con elevado valor de inductancia parásita.

También es posible medir la inductancia, usando un circuito integrador LR conectado a una fuente de corriente continua mediante conmutadores electrónicos. En ese caso, calculamos L en función del tiempo de integración. Ese método es implementado en muchos medidores profesionales de inductancias.

Medición de la corriente de saturación

No menos importante es conocer con certeza la corriente de saturación de un inductor. Hay unos pocos convertidores que basan su funcionamiento en este fenómeno, e incorporan reactores saturables en sus circuitos. En el resto de los convertidores electrónicos de potencia, por el contrario, hay que evitar a toda costa que los inductores alcancen la saturación, ya que esto puede provocar la destrucción de los transistores y diodos de potencia.

Aquí trataremos un método que permite obtener la corriente de saturación de un inductor, usando el mínimo de equipamiento, con el objetivo de que pueda ser accesible a la mayoría de ustedes.

Material necesario para implementar la instalación:

- Un Osciloscopio de dos canales
- Un transformador convencional de red

- Una resistencia shunt de baja inductancia

Estos tres componentes constituyen lo básico imprescindible para ejecutar la medición de la corriente. Luego, la instalación puede ser perfeccionada notablemente, si además podemos permitirnos un Variac y un conmutador, para poder regular, conectar y desconectar la corriente a través del Inductor, de forma operativa.

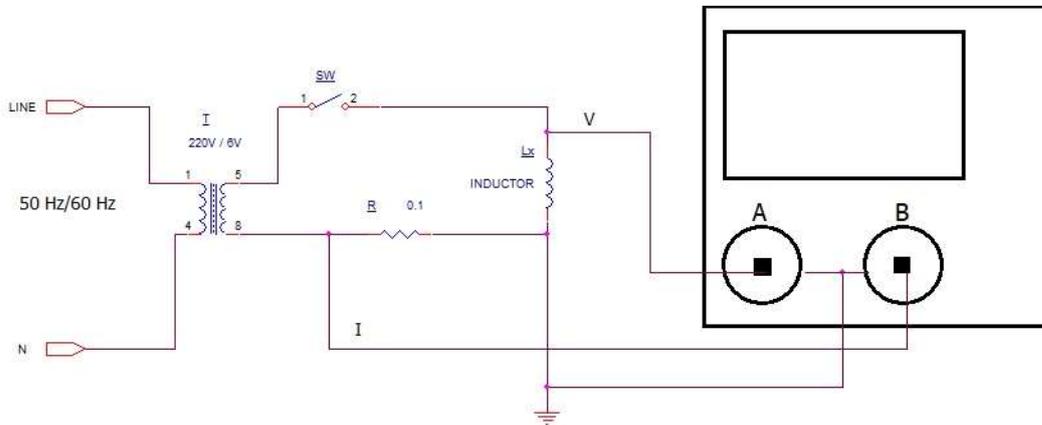


Fig.4. Medición de la corriente de saturación de un Inductor con el mínimo de recursos.

El transformador T debe ser capaz de proveer en el secundario una corriente mayor que la corriente de saturación del inductor que se quiera medir. La resistencia R hace la función de shunt para censar la corriente, su valor debe adecuarse a la corriente del inductor, y debe tener buena estabilidad térmica y baja inductancia parásita.

El método de medición es muy sencillo. Solo hay que detectar en la pantalla del Osciloscopio el instante cuando el inductor comienza a saturarse. Se ve claramente, ya que la caída de voltaje en el inductor cae bruscamente (señal del canal A) y aumenta la pendiente de la corriente (señal canal B)

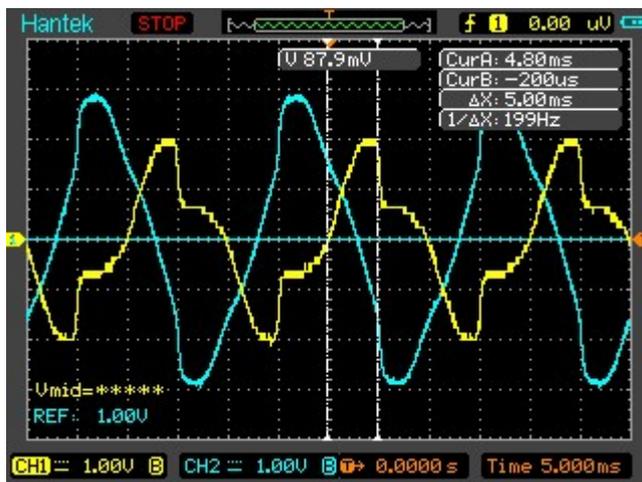


Fig.5. Apreciación del momento de saturación en la pantalla del Osciloscopio.

Entonces, la corriente de saturación la calculamos como:

$$I_{sat} = U_B/R$$

Donde U_B es el voltaje del canal B en el momento en que se inicia la saturación, y R es el valor del Shunt usado para medir la corriente.

Los parámetros del transformador T y la resistencia R deben seleccionarse teniendo en cuenta que la corriente no debe ser menor que la corriente de saturación del inductor, por cuestiones obvias, pero tampoco debe superarla en más de diez veces.

Los materiales ferromagnéticos pueden sufrir cambios irreversibles en sus propiedades, si son sometidos a campos magnéticos excesivos.



Fig.6. Estación experimental.

Conclusiones:

La inductancia no es el único parámetro importante de un inductor de potencia. Es el volumen del entrehierro, quien permite almacenar toda la energía del campo magnético. El cálculo del entrehierro es vital para la obtención de un inductor óptimo.

A medida que aumenta la frecuencia de trabajo, se requieren mejores materiales, para minimizar las pérdidas, los materiales con entrehierro distribuido son una buena opción.

La inductancia, y la corriente de saturación de un inductor pueden ser medidas por métodos rudimentarios basados en el uso de un osciloscopio.

Bibliografía:

- 1. Kalantarov PL. "Raschot Inductibnostei". Editorial Energia 1964.*

2. *COEY, J.M.D. 2010. Magnetism and magnetic materials. Cambridge. Cambridge University.*
3. *Catálogo CSC "Magnetic Powder Cores".*
4. *Hoja de datos materiales magnéticos.*