

VORBEREITUNG: FERROMAGNETISCHE HYSTERESIS

FREYA GNAM, GRUPPE 26, DONNERSTAG

1. INDUKTIVITÄT UND VERLUSTWIDERSTAND EINER LUFTSPULE

Messung. Der Widerstand Z einer Spule im Wechselstromkreis (Impedanz) kann als Reihenschaltung aus einem induktiven und einem ohmschen Widerstand betrachtet werden.

$$Z = R_L + i\omega L$$

Den Betrag der Impedanz bezeichnet man als Scheinwiderstand:

$$|Z| = \sqrt{R_L^2 + (\omega L)^2} = \frac{\hat{U}_L}{\hat{I}} = \frac{U_{eff}}{I_{eff}}$$

Ein Vorwiderstand R und die Spule L werden im Versuch in Reihe geschaltet. Wir bestimmen die Induktivität der Spule, indem wir bei einer angelegten Wechselspannung die Spannungsamplitude am Widerstand und an der Spule messen. Die Spuleninduktivität lässt sich aus der Zeitdifferenz zwischen den Nulldurchgängen bestimmen.

Die Spannung an der Spule beträgt

$$\begin{aligned} U_L(t) &= ZI(t) \\ U_L(t) &= |Z|e^{i\varphi}\hat{I}e^{i\omega t} = \hat{U}e^{i(\omega t + \varphi)} \end{aligned}$$

φ ist die Phasenverschiebung und gibt den Winkel an, um den der Strom der Spannung umhinterher ist.

Wir messen die Spannungsamplitude am Widerstand und an der Spule und berechnen daraus die maximale Stromstärke:

$$\hat{I} = \frac{\hat{U}}{R}$$

Die Induktivität der Spule beträgt:

$$L = |Z| \frac{\sin \varphi}{\omega}$$

Der Verlustwiderstand der Spule beträgt:

$$R_L = |Z| \cos \varphi$$

Verlustwiderstand und Eigeninduktivität einer Spule ohne Kern sollten unabhängig vom Erregerstrom sein, da im Vakuum bzw. in Luft keine ferromagnetischen Effekte auftreten können.

Erwartungswerte. Das Magnetfeld einer kurzen Spule beträgt $B = \mu_0 I \frac{n}{l} k$. Der Korrekturfaktor k berücksichtigt die Geometrie des Feldes. Damit ergibt sich für die Induktivität:

$$L = n^2 \mu_0 k \frac{A}{l}$$

Der ohmsche Widerstand des Drahts beträgt:

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

Die Drahtwiderstandsverlustleistung berechnet sich zu:

$$P = RI_{eff}^2$$

2. INDUKTIVITÄT UND VERLUSTWIDERSTAND EINER SPULE MIT GESCHLOSSENEM EISENKERN

Wir bringen nun einen Eisenkern in die Spule ein. Die Induktivität der Spule mit Eisenkern beträgt:

$$L_r = n^2 \mu_0 \mu_r \frac{A}{l}$$

Die relative Wechselfeld-Permeabilität $\mu_r = \frac{L}{L_r}$ entspricht dem Verhältnis der Induktivitäten der Spule mit und ohne Eisenkern. Sie beträgt:

$$\mu_r = \frac{Ll}{n^2 \mu_0 A}$$

Es ist zu erwarten, dass die Induktivität und der Verlustwiderstand durch den Eisenkern stark ansteigen. Zudem sind die Eigenschaften der Spule nun vom Erregerstrom abhängig.

3. FERROMAGNETISCHE HYSTERESIS UND UNMAGNETISIERUNGSKURVE

Indem man B über H aufträgt, erhält man eine Magnetisierungskurve. Der Verlauf ist abhängig von Material, Temperatur und Vorgeschichte. Die Hysteresisschleife der Spule im Wechselstromkreis ist oszillographisch aufzuzeichnen. Das Integral $\oint Bdh$ gibt den Flächeninhalt der Hysteresisschleife wieder. Daraus werden die Unmagnetisierungsarbeit pro Volumen und die relative Wechselfeld-Permeabilität ermittelt.

$$\text{Unmagnetisierungsarbeit : } \oint Bdh = \frac{W_{mag}}{V}$$

$$\text{Unmagnetisierungsleistung : } P_{mag} = \frac{W_{mag}}{T_{zyklus}} = W_{mag} f V$$

$$\text{Verlustwiderstand : } R_{mag} = \frac{U_{eff}}{I_{eff}} = \frac{P_{mag}}{I_{eff}^2}$$

Für jeden Punkt der Hysteresisschleife gilt:

$$B = \mu_0 \mu_r H$$

Aus einem Wertepaar B_1, H_1 lässt sich die relative Wechselfeld-Permeabilität bestimmen:

$$\mu_r = \frac{B_1}{\mu_0 H_1}$$

4. SÄTTIGUNGSINDUKTION, REMANENZ, KOERZITIVKRAFT, MAGNETISCHE HÄRTE, VERGLEICH EISEN – FERRIT

Ferrit-Kerne verwendet man für Transformatoren und Spulen, bei denen es auf große Permeabilität und geringe Verluste ankommt. Wegen ihrer geringen Leitfähigkeit weisen sie selbst bei hohen Frequenzen nur geringe Wirbelstromverluste auf. Die Sättigungsinduktion ist allerdings gering.

Man charakterisiert den Verlauf einer Magnetisierungskurve oft durch die Größen Remanenz und Koerzitivkraft nach vorheriger Sättigung, Sättigungsinduktion und Anfangspermeabilität. Remanenz und Koerzitivkraft sind von der Vorgeschichte des Materials abhängig.

Remanenz : Die Ausrichtung der ferromagnetische Materialbezirke bleibt beim Abschalten des äußeren Feldes teilweise bestehen.

Koerzitivkraft : Feldstärke des äußeren Gegenfeldes, das wirken muss, um $B_m = 0$ zu erreichen.

Sättigungsinduktion : $B_S = B_1 - \mu_0 H_1$

Betrachtet man die Hysteresiskurven für einen Eisenkern und einen Ferritschalenkern auf, so kann man einen Sättigungseffekt erkennen. Remanenz, Koerzitivkraft, Entmagnetisierungsverlustleistung und Sättigungsinduktion sind zu bestimmen.