

## 18. Měření rozptylového magnetického pole transformátoru

### 18.1. Teoretický rozbor

V oblasti tónových kmitočtů se intenzita magnetického pole nebo magnetická indukce ve vzduchu měří nejspíše pomocí cívky bez feromagnetického jádra. Jedná-li se o periodické průběhy s jedním průchodem nulou během periody, lze magnetickou indukci vypočítat ze vztahu

$$B_m = \frac{U_s}{4fSN}$$

kde

- $B_m$  – maximální hodnota složky měřené indukce  $B(t)$  kolmé k ploše  $S$  měřicí cívky [T]
- $U_s$  – aritmetická střední hodnota napětí  $U(t)$  (po dvoucestném usměrnění) indukovaného v měřicí cívce [V]
- $f$  – kmitočet základní harmonické měřeného napětí [Hz]
- $N$  – počet závitů měřicí cívky
- $S$  – plocha průřezu měřicí cívky [m<sup>2</sup>]

V případě, že  $B_m$  má harmonický průběh, lze velikost  $B_m$  určit z efektivní hodnoty  $U_{ef}$  indukovaného napětí podle vztahu

$$B_m = \frac{U_s}{4,44fSN}.$$

Maximální hodnotu intenzity magnetického pole  $H_m$  vypočítáme ze vztahu

$$H_m = \frac{B_m}{\mu_0}$$

### 18.2. Naměřené a vypočtené hodnoty

- Odpor měřicí cívky  $R_s = 3,6 \text{ k}\Omega$
- Rezonanční kmitočet  $f_r = 3,95 \text{ kHz}$
- Impedance měřicí cívky při kmitočtu  $f = 365 \text{ Hz}$ , zjištěna Ohmovou metodou z napětí  $U = 1,43 \text{ V}$  a proudu  $I = 0,34 \text{ mA}$ :

$$Z_m = \frac{U_m}{I_m} = \frac{1,43}{0,34 \cdot 10^{-3}} \Omega \doteq 4206 \Omega$$

- Indukčnost měřicí cívky:

$$L_s = \frac{1}{\omega} \sqrt{Z_m^2 - R_s^2} = \frac{1}{2\pi \cdot 365} \sqrt{4206^2 - 3600^2} \doteq 0,948 \text{ H}$$

- Parazitní kapacita závitů cívek určená z  $f_r$ :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_p}} \Rightarrow C_p = \frac{1}{4\pi^2 f_r^2 L_s} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 3950^2 \cdot 0,948} \text{ F} = 5,38 \text{ nF}$$

- Konstanta měřicí cívky  $K_{CH}$ . Zjištěná z proudu procházejícího Helmholtzovou cívkou  $I_{ef} = 1 \text{ A}$ , napětí indukovaném na měřicí cívce  $U_{ef} = 0,261$  a známé konstanty Helmholtzovy cívky je  $K_{HC} = 384,61 \text{ m}^{-1}$ :

$$K_{CH} = \frac{H_{max}}{U_{ef}} = \frac{\sqrt{2}I_{ef}K_{HC}}{U_{ef}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 1 \cdot 384,61}{0,261} \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{V}^{-1} \doteq 2084 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$$

$x$ [cm]	$U_{ef}$ [mV]	$H_x$ [A · m <sup>-1</sup> ]	$m_{C_x}$ [Wb · m]	$y$ [cm]	$U_{ef}$ [mV]	$H_y$ [A · m <sup>-1</sup> ]	$m_{C_y}$ [Wb · m]	$H_x/H_y$ [-]
10	190,0	395,96	$3,13 \cdot 10^{-6}$	10	152,0	316,77	$5,02 \cdot 10^{-6}$	1,25
15	69,0	143,80	$3,84 \cdot 10^{-6}$	15	45,0	93,78	$5,01 \cdot 10^{-6}$	1,53
20	30,0	62,52	$3,96 \cdot 10^{-6}$	20	19,0	39,60	$5,02 \cdot 10^{-6}$	1,58
25	16,0	33,34	$4,12 \cdot 10^{-6}$	25	9,6	20,01	$4,95 \cdot 10^{-6}$	1,67
30	9,3	19,38	$4,14 \cdot 10^{-6}$	30	5,6	11,67	$4,99 \cdot 10^{-6}$	1,66
35	6,0	12,50	$4,24 \cdot 10^{-6}$	35	3,6	7,50	$5,09 \cdot 10^{-6}$	1,67
40	4,0	8,34	$4,22 \cdot 10^{-6}$	40	2,6	5,42	$5,49 \cdot 10^{-6}$	1,54
45	2,8	5,84	$4,21 \cdot 10^{-6}$	45	2,0	4,17	$6,01 \cdot 10^{-6}$	1,40
50	2,0	4,17	$4,12 \cdot 10^{-6}$	50	1,6	3,33	$6,60 \cdot 10^{-6}$	1,25
55	1,5	3,13	$4,12 \cdot 10^{-6}$	55	1,3	2,71	$7,14 \cdot 10^{-6}$	1,15

### 18.2.1. Příklad výpočtu pro vzdálenost 10 cm

- Intenzita magnetického pole  $H_x$

$$H_x = K_{CH}U_{ef} = 2084 \cdot 190,0 \cdot 10^{-3} \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} = 395,96 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

- Coulombův magnetický moment  $m_{C_x}$

$$m_{C_x} = 2\pi H_x \mu_0 x^3 = 2\pi \cdot 395,96 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,1 \cdot 10^3 \text{ Wb} \cdot \text{m} = 3,13 \cdot 10^{-6} \text{ Wb} \cdot \text{m}$$

- Coulombův magnetický moment  $m_{C_y}$

$$m_{C_y} = 4\pi H_y \mu_0 y^3 = 4\pi \cdot 316,77 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,1 \cdot 10^3 \text{ Wb} \cdot \text{m} = 5,02 \cdot 10^{-6} \text{ Wb} \cdot \text{m}$$

### 18.3. Závěr

Měřením byly určeny následující parametry měřící cívky:

- Konstanta  $K_{CH} = 2084 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$
- Vlastní úhlový rezonanční kmitočet  $\omega_r = 24,8 \text{ kHz} \cdot \text{rad}$  ( $f_r = 3,95 \text{ kHz}$ )
- Indukčnost  $L_s = 0,948 \text{ H}$
- Parazitní kapacita mezi závitů  $C_p = 5,38 \text{ nF}$

Porovnáním Coulombových magnetických momentů pro osy  $x$  a  $y$  je vidět, že ve vzdálenosti 20 až 40 cm platí  $m_{C_x} \approx m_{C_y}$ , takže charakter měřené pole je blízký charakteru dipólového pole. Pro dané intenzity dipólového pole by mělo platit, že  $H_x/H_y = 2$ , což výsledky měření kvůli malé přesnosti splňují pouze přibližně.