



Úloha č. 6

Určování ztrát magnetika z hysterezní smyčky

1 Teoretický úvod

V elektrických strojích a přístrojích se používají magnetické materiály pro usměrnění magnetického toku. Charakteristickými parametry jsou pro tyto materiály např. permeabilita μ , koercitivní intenzita H_C nebo remanentní indukce B_r . Z těchto materiálů se sestavují magnetické obvody, u kterých jsou jedním z důležitých parametrů ztráty, což je energie přeměněná na teplo.

1.1 Ztráty v magnetických obvodech

V magnetických obvodech rozlišujeme tři druhy ztrát. Jsou to ztráty hysterezní, ztráty vířivými proudy a přídavné ztráty. První dva druhy ztrát lze spočítat. Přídavné ztráty lze určit pouze jako rozdíl celkových ztrát a součtu prvních dvou zmíněných druhů ztrát, což popisuje vztah

$$P_{Fe} = P_h + P_v + P_p \text{ (W)}, \quad (1)$$

kde P_{Fe} – celkové ztráty v magnetickém obvodu (v železe), P_h – hysterezní ztráty, P_v – ztráty vířivými proudy a P_p – přídavné ztráty.

1) **Hysterezní ztráty** jsou způsobeny střídavou magnetizací, kdy v důsledku existence hystereze dochází při přemagnetování ke spotřebování energie. Čím větší je plocha hysterezní smyčky, tím jsou tyto ztráty větší. Hysterezní ztráty jsou tedy úměrné ploše statické hysterezní smyčky a lze je v praxi snížit pouze volbou materiálu s menší hysterezní smyčkou. Hysterezní ztráty je možné určit dle vztahu:

$$P_h = f \cdot V \cdot S_s \text{ (W)}, \quad (2)$$

kde f (Hz) je frekvence magnetického pole, V (m^3) je objem feromagnetika a S_s (m^2) je plocha statické hysterezní smyčky.

2) **Ztráty vířivými proudy** jsou způsobeny vířivými proudy (Foucaultovy proudy), které vznikají v důsledku elektrické vodivosti magnetického materiálu. Pokud vložíme elektrický vodič do proměnného magnetického pole, tak se v tomto vodiči indukuje napětí a v závislosti na velikosti jeho odporu jím protéká proud. Ztráty vířivými proudy lze v praxi snížit dvěma způsoby. První možností je sestavení magnetického obvodu ze vzájemně izolovaných plechů. Druhou možností je zvýšení odporu materiálu, což se u ocelových plechů realizuje přidáním křemíku (Si). Mluvíme pak o křemíkových ocelích. Křemík však zvyšuje křehkost



materiálu, proto se do dynamoplechů (určené pro elektrické motory – větší mech. namáhání) přidává pouze do 2,5 % Si a do transformátorových plechů do 4 % Si.

Ztráty vířivými proudy lze vypočítat na základě vztahu:

$$P_V = \frac{4}{3} \cdot \frac{V}{\rho} \cdot f^2 \cdot d^2 \cdot B^2 \text{ (W)}, \quad (3)$$

kde f (Hz) je frekvence magnetického pole, V (m³) je objem feromagnetika, ρ (m³/kg) je jeho hustota, d (m) je jeho tloušťka a B (T) je indukce magnetického pole.

3) **Přídavné ztráty** jsou způsobeny dalšími vlivy, jako je například nedostatečné stažení magnetického obvodu, okrajové jevy. Nelze je samostatně kvantifikovat.

Abychom mohli sledované materiály porovnávat, zavádíme tzv. **měrné ztráty p** . Vzhledem k tomu, že ztráty jsou závislé na magnetické indukci a na frekvenci, jsou vždy doplněny o údaj, při jaké indukci a frekvenci byly měřeny ($p_{1,7/50}$ jsou měrné ztráty při indukci 1,7 T a frekvenci 50 Hz). Měrné ztráty se stanoví dle vztahu

$$p = \frac{P_{Fe}}{V \cdot \rho} \text{ (W} \cdot \text{kg}^{-1}\text{)}, \quad (4)$$

kde p – měrné ztráty, P_{Fe} – celkové ztráty, V – objem magnetika a ρ – hustota magnetika.

1.2 Hysterezní smyčka

Hysterezní smyčka je závislost magnetické indukce B na intenzitě magnetického pole H (BH křivka). Z hysterezní smyčky se určují charakteristické hodnoty, kterými jsou standardně maximální hodnoty H_S (intenzita nasycení), B_m (magnetická indukce nasycení) a dále hodnoty, v kterých smyčka protíná osy x a y (viz obr. 3). Pokud se zvýší intenzita nad hodnotu H_S , tak magnetická indukce se již příliš nezvětšuje, dochází totiž k nasycení materiálu a další závislostí je jen přímka. Průsečík smyčky s osou x je remanentní (zbytková) indukce B_r , která v materiálu zůstává i po odstranění vnějšího magnetického pole. Průsečík smyčky s osou y je koercitivní intenzita H_C , která je potřebná k odmagnetování magnetika, tedy ke zrušení remanentní indukce. Čím je H_C větší, tím je magnetický materiál magneticky tvrdší, přičemž hraniční hodnotou mezi magneticky měkkými a tvrdými materiály je 1 kA.m⁻¹.



1.3 Určení ztrát z hysterezní smyčky

Jedna z metod využívaných pro určení hysterezních ztrát magnetického obvodu je založen na zobrazení hysterezní smyčky a určení její plochy. V rámci této metody je hodnocena dynamická hysterezní smyčka určovaná při střídavé magnetizaci (připojen zdroj střídavého napětí). Dynamická hysterezní smyčka je úměrná celkovým ztrátám. Jak je vidět z níže uvedeného schématu zapojení (Obr. 1), tak na využívaný osciloskop je přivedena veličina úměrnou proudem na primárním vinutí a veličinu úměrnou napětí na sekundárním vinutí umístěném na hodnoceném magnetickém obvodu. Osciloskop zobrazuje pouze napětí, a tak proud na primárním vinutí je potřeba převést na napětí pomocí proměnného odporu. Tím se zároveň nastavuje měřítko na osciloskopu v ose x.

Pozn.: Statická hysterezní smyčka se měří při stejnosměrném napětí a sestavuje se bod po bodu.

1.4 Vztahy pro výpočet charakteristik magnetických materiálů

Vztah pro výpočet maximální magnetické indukce B_m

$$U_{ef} = 4,44 \cdot f \cdot S \cdot N_2 \cdot B_m \text{ (V)} \rightarrow B_m = \frac{U_{ef}}{4,44 \cdot f \cdot S \cdot N_2} \text{ (T)}, \quad (5)$$

kde U_{ef} (V) je napájecí napětí, f (Hz) je frekvence střídavého pole ($f = 50$ Hz), S (m^2) je plocha průřezu magnetického obvodu, N_2 (-) je počet závitů sekundárního vinutí a B_m (T) je maximální magnetická indukce.

Vztah pro výpočet intenzity nasycení magnetického obvodu H_s

$$I_{ef} = \frac{H_s \cdot l_s}{N_1} \text{ (A)} \rightarrow H_s = \frac{I_{ef} \cdot N_1}{l_s} \text{ (A} \cdot \text{m}^{-1}\text{)}, \quad (6)$$

kde I_{ef} (A) je napájecí proud, H_s ($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$) je intenzita nasycení, N_1 (-) je počet závitů primárního vinutí a l_s (m) je délka střední siločáry magnetického obvodu.

Kalibrační vztahy (přepočet napětí měřených pomocí osciloskopu)

$$\frac{U_x}{U_{x(H_s)}} = \frac{H}{H_s} \text{ a } \frac{U_y}{U_{y(B_m)}} = \frac{B}{B_m}, \quad (7)$$



kde H je hodnota intenzity magnetického pole odpovídající libovolnému napětí U_x změřeného na osciloskopu ve směru osy x a B je hodnota magnetické indukce odpovídající libovolnému napětí U_y změřeného na osciloskopu ve směru osy y .

Vztah pro výpočet magnetických ztrát p

$$p = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{f}{\rho} \cdot (H_0 + \sqrt{2} \cdot H_{45}) \cdot B_m \quad (\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}), \quad (8)$$

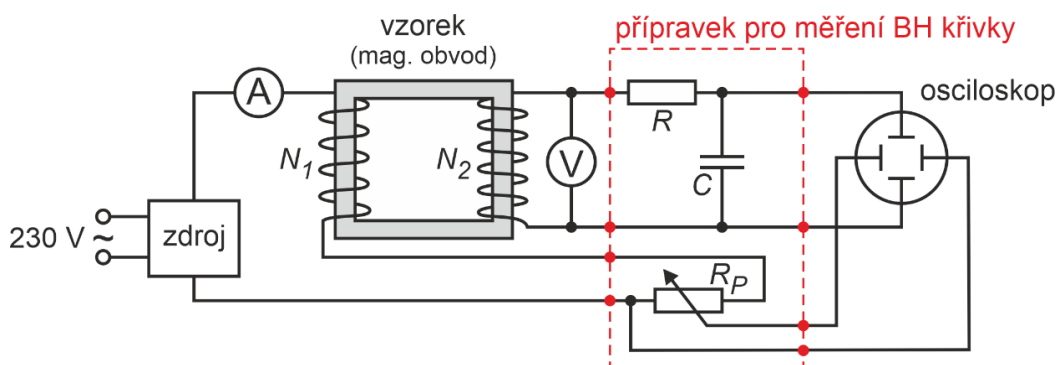
kde ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) je hustota magnetika, H_0 a H_{45} jsou hodnoty intenzity magnetického pole získané z hysterezní smyčky s využitím kalibračních vztahů.

2 Zadání úlohy

- 1) S pomocí osciloskopu zmapujte hysterezní smyčky předložených vzorků magnetických obvodů tvořených magneticky měkkými materiály s označením Ei60 ($S = 99 \text{ mm}^2$, $N_1 = 200$ a $N_2 = 3900$) a M6X ($S = 105 \text{ mm}^2$, $N_1 = 200$ a $N_2 = 5200$).
- 2) Přepočítejte napětí z osciloskopu na hodnoty B a H a vytvořte grafy závislostí magnetické indukce na intenzitě magnetického pole pro oba magneticky měkké materiály.
- 3) Z hysterezních smyček materiálů Ei60 a M6X vypočítejte parametry potřebné pro dosazení do empirického vztahu pro výpočet jejich měrných magnetických ztrát.
- 4) Ze jištěných charakteristických hodnot vypočítejte měrné magnetické ztráty materiálů Ei60 a M6X a porovnejte je.

3 Používané přístroje a další laboratorní vybavení

- digitální dvoukanálový osciloskop
- digitální multimetry (ve funkci voltmetru a ampérmetru)
- autotransformátor a oddělovací transformátor (regulovatelný zdroj)
- přípravek pro měření hysterezní smyčky (BH křivky)



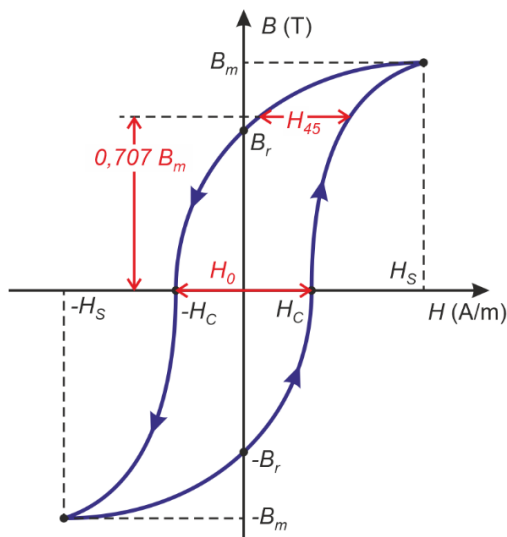
Obr. 1: Schéma zapojení obvodu pro měření hysterezní smyčky (BH křivky) magnetického obvodu.



Obr. 2: Reálné provedení zapojení pro měření magnetických ztrát z hysterezní smyčky.

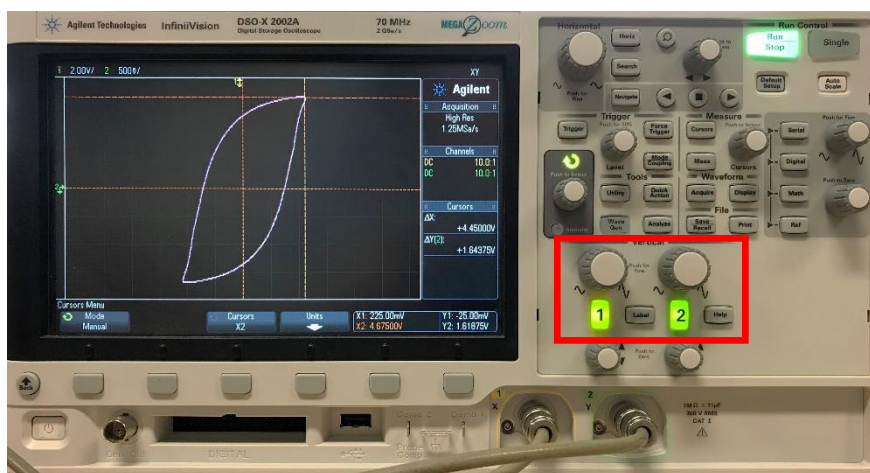
4 Postup měření

1. Zapojte obvod dle schématu na Obr. 1 a nechte zapojení zkontrolovat vyučujícím.
2. Zkontrolujte, zda je na multimetrech (voltmetr a ampérmetr) zvolený střídavý rozsah.
3. Osciloskop přepněte do režimu XY (pokud není již nastaveno).
4. Pomocí autotransformátoru dostatečně vybud'te hysterezní smyčku tak, aby bylo možno odečíst její charakteristické parametry vyznačené na Obr. 3.



Obr. 3: Příklad hysterezní smyčky (zobrazené na osciloskopu v režimu XY) s vyznačením parametrů potřebných pro výpočet ztrát magnetika.

5. Z multimetrů odečtete hodnotu napětí a proudu pro zobrazenou hysterezní smyčku. Po odečtení napětí a proudu již neupravujte (autotransfornátorem a potenciometrem) tvar na osciloskopu zobrazené hysterezní smyčky.
6. Vycentrujte hysterezní smyčku posunem signálu X (kanál 1) a signálu Y (kanál 2) pomocí otočných regulátorů zvýrazněných na Obr. 4.



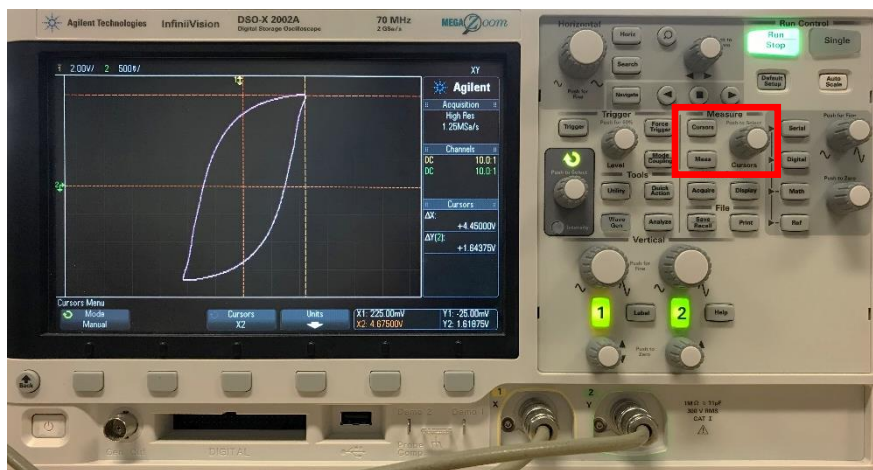
Obr. 4: Čelní panel osciloskopu – centrování hysterezní smyčky pomocí otočných regulátorů v červeném rámečku.



7. Na osciloskopu odečtete charakteristické hodnoty B_m (maximální magnetická indukce), H_S (intenzita nasycení), H_0 (šířka hysterezní smyčky v ose x) a H_{45} . Intenzita magnetického pole H_{45} neodpovídá intenzitě při remanentní indukci (B_r), ale jedná se o intenzitu při magnetické indukci $0,707 \cdot B_m$ (šířka hysterezní smyčky ve vzdálenosti $0,707 \cdot B_m$ od osy x).

Osciloskop zobrazuje zmiňované hodnoty jako napětí daného kanálu osciloskopu. Tyto hodnoty je nutné pro výpočet ztrát přepočítat. Aby bylo možné přepočítat hodnoty napětí z osciloskopu na hodnoty veličin magnetického pole (H a B), je třeba nejprve oceňovat osciloskop pomocí rovnic (5) a (6). Napětí a proud máte změřené pomocí voltmetru a ampérmetru. Ze vztahů vyjádříte a vypočtete hodnoty B_m a H_S .

8. Pro odečet charakteristických hodnot využijte otočný regulátor *Measure*, který umožňuje nastavování kurzorů (X_1 , X_2 , Y_1 , Y_2). Stiskem otočného regulátoru je možné vybírat mezi jednotlivými kurzory (viz Obr. 5).



Obr. 5: Čelní panel osciloskopu – nastavování kurzorů otočným regulátorem v červeném rámečku.

Z osciloskopu odečítáte hodnoty napětí U_X (ΔX) a U_Y (ΔY) pro příslušné body hysterezní smyčky pomocí měřicích kurzorů. Jedná se o napětí na kanálech 1 a 2 osciloskopu. Hodnoty magnetického pole získáte jako poměr napětí ve sledovaném bodě smyčky a napětí, které odpovídá maximu dané veličiny (viz kalibrační vztahy).



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



Podklady ke cvičení z předmětu KET/ELTM

FEL, ZČU v Plzni

9. Měrné ztráty vypočítejte pomocí vztahu (8). Další hodnoty nutné pro výpočet jsou délka střední siločáry $l_s = 360$ mm (délka magnetického obvodu vedená jeho středem) a hustota materiálu ρ , která je pro Ei60 $7750 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a pro M6X $7650 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.