

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239

Magnetická měření

Přednáška KET/ELM

J. Švarný



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

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Magnetická měření

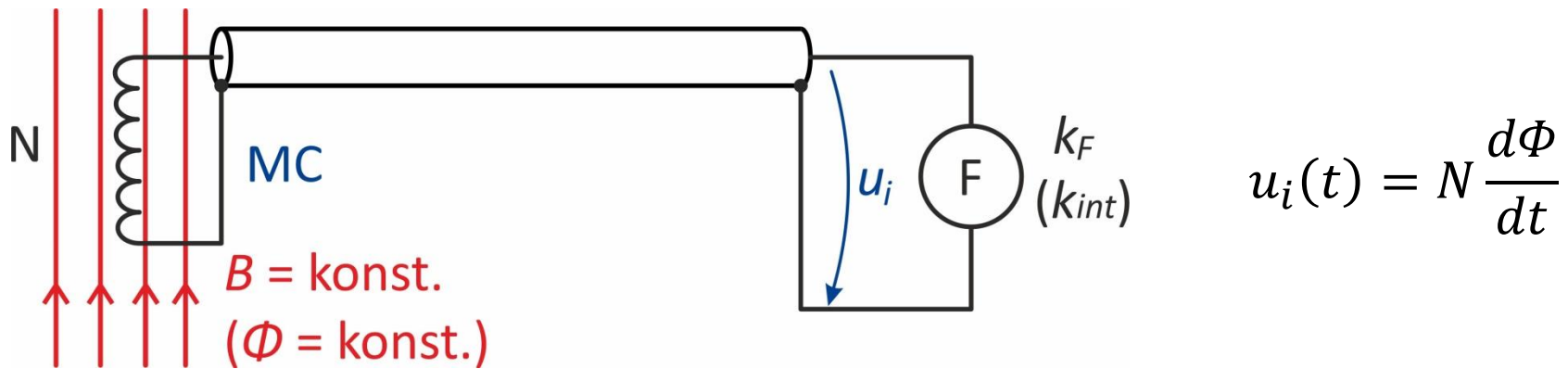
Obsah:

- Měření intenzity a indukce stejnosměrných magnetických polí
- Měření intenzity a indukce střídavých magnetických polí
- Měření statické hysterezní smyčky feromagnetik
- Měření dynamické hysterezní smyčky feromagnetik
- Měření ztrát v železe
- Literatura

Měření B a H stejnosměrných magn. polí

Měření fluxmetrem

Fluxmetr = voltmetr s integračním zesilovačem



$$u_i(t) = N \frac{d\Phi}{dt}$$

- Při otočení MC o 90° resp. vzniku nebo zániku pole:

$$B = \frac{1}{SN} k_F \Delta\alpha = \frac{1}{SN} k_{int} \Delta U_2$$

- Při otočení MC o 180° resp. komutaci pole:

$$B = \frac{1}{2SN} k_F \Delta\alpha = \frac{1}{2SN} k_{int} \Delta U_2$$

S ...plocha obepnutá závití MC

N ...počet závitů MC

k_F ...konstanta fluxmetru

$\Delta\alpha$...změna výchylky

k_{int} ...integrační konstanta integrátoru

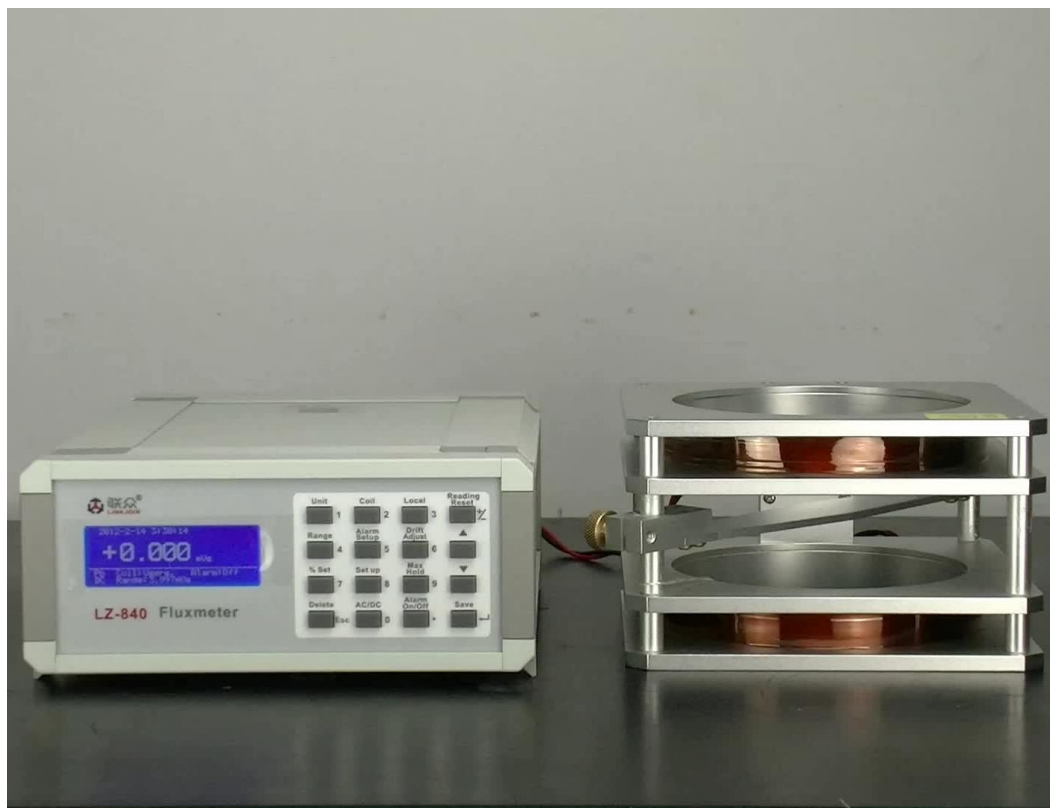
ΔU_2 ...změna napětí V-metru

Měření B a H stejnosměrných mag. polí

Měření fluxmetrem



Elektromechanický fluxmetr

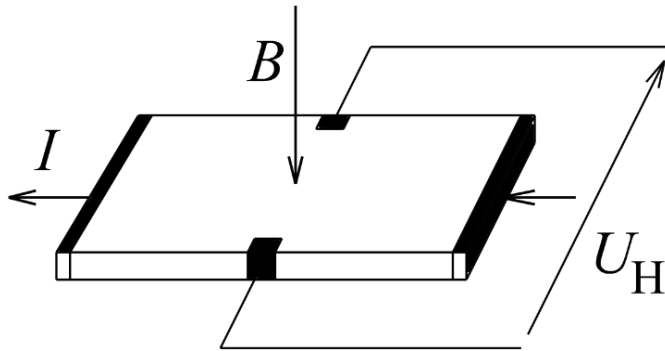


*Fluxmetr LZ840, Linkjoin
(<http://www.hystograph.com/>)*

Měření B a H stejnosměrných magn. polí

Měření Hallovoú sondou

Hallův jev – 1879



(<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d5/Halleffekt.svg>)

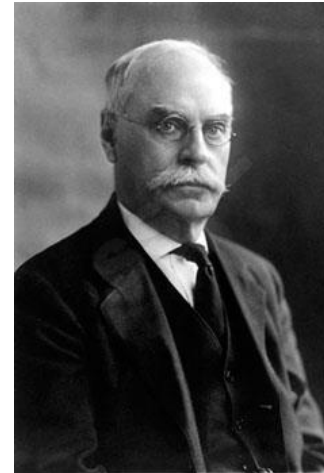
$$U_H = \frac{BI}{d} R_H$$

B ...měřená indukce

I ...pomocný DC proud

d ...tloušťka destičky

R_H ...materiálová konstanta



Edwin Hall
(1855-1938)

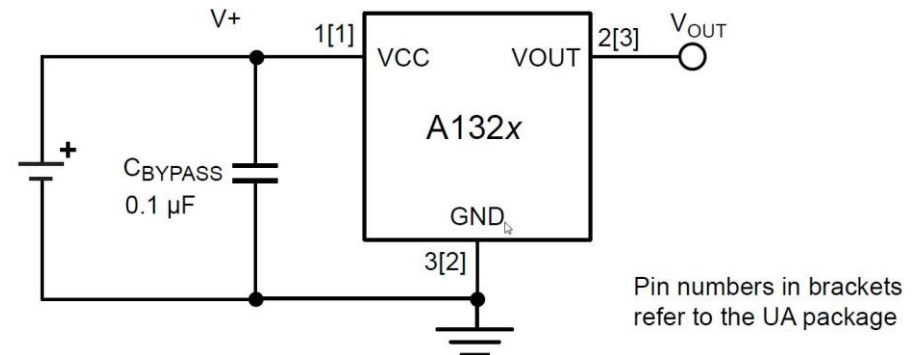
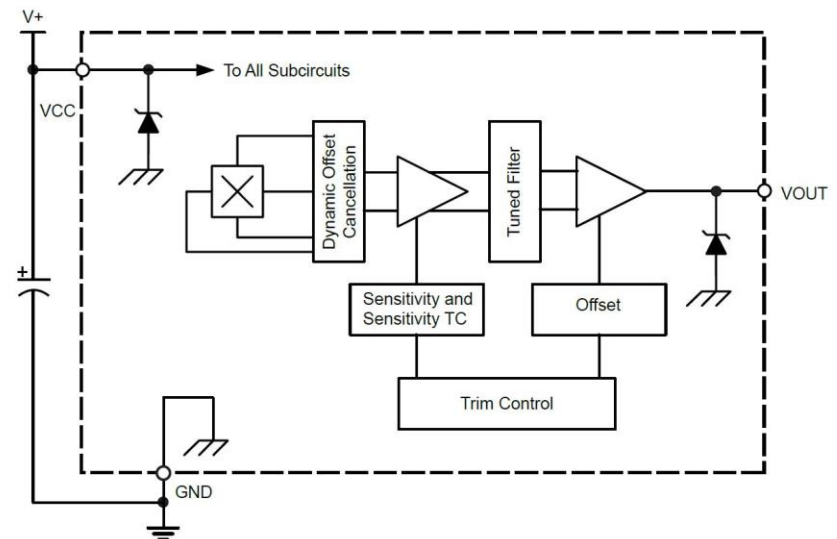
- Vhodné pro měření středně silných a silnějších polí ($\sim 10 \mu\text{T} \div \sim 10 \text{T}$).
- Frekvenční rozsah: DC až $\sim 10 \text{kHz}$
- Teplotní závislost

Měření B a H stejnosměrných magn. polí

Měření Hallovou sondou

Příklad: A1326, Allegro Microsystems, [2]

- Citlivost: 2,5 mV/G
- Linearita: $\pm 1,5 \%$
- Napájecí napětí: 4,5 V až 5,5 V
- Mezní frekvence: 17 kHz
- Minimalizace teplotního driftu vnitřní kompenzací

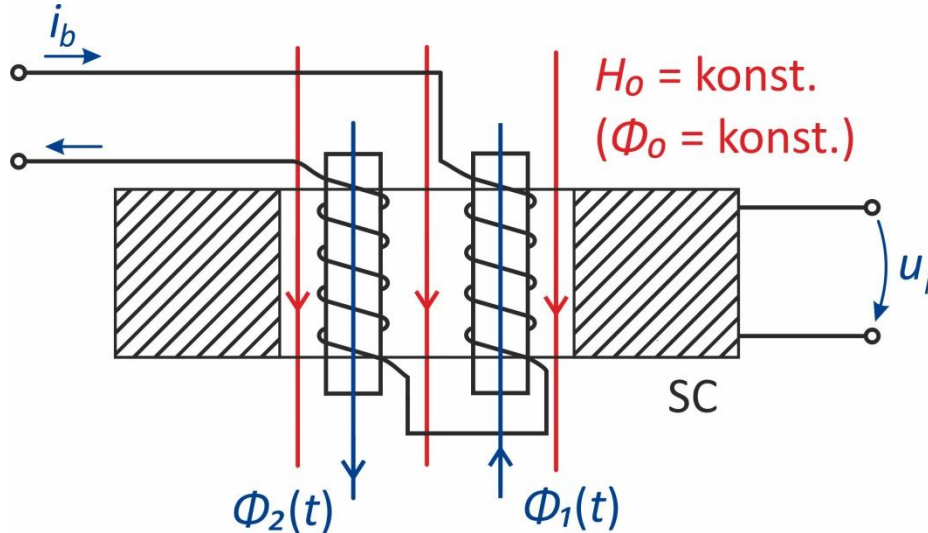


Typical Application Circuit

(převzato z Data Sheetu A1326, [2], www.allegromicro.com)

Měření B a H stejnosměrných magn. polí

Měření feromagnetickou sondou (tzv. Fluxgate sensor)



- Klidový stav:

$$H_0 = 0 \Rightarrow \Phi_1(t) + \Phi_2(t) = 0$$

$$\Rightarrow u_i = 0$$

- Přítomno vnější pole:

$$H_0 \neq 0 \Rightarrow \Phi_1(t) + \Phi_2(t) \neq 0$$

$$\Rightarrow u_i \neq 0 \quad (U_{iRMS} \approx H_0)$$

Vlastnosti:

- Linearizaci je možno provádět kompenzačním vinutím.
- Měřicí rozsah:
 $\sim 100 \text{ pT}$ až $100 \text{ } \mu\text{T}$
- Frekvenční rozsah:
DC až $\sim 1 \text{ kHz}$

Měření B a H stejnosměrných magn. polí

Měření pomocí magnetorezistorů

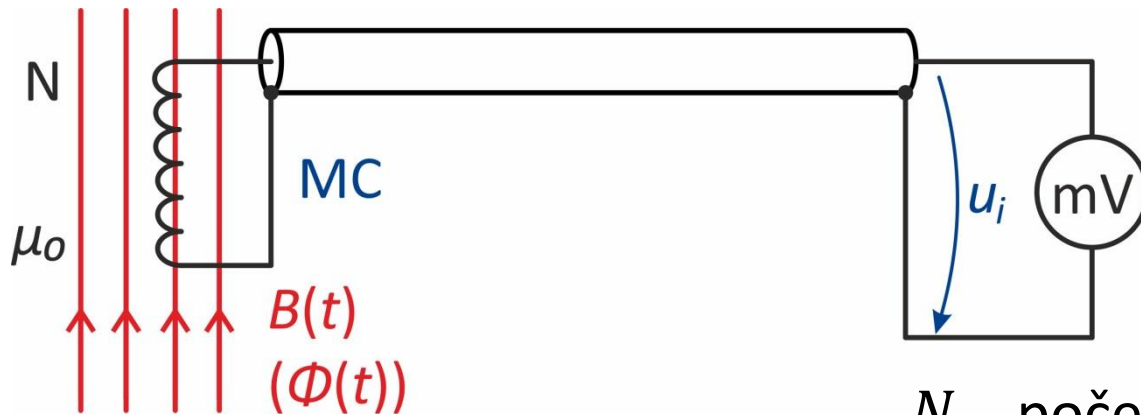
Tři typy:

- AMR (Anisotropic Magnetoresistive Sensor)
- GMR (Giant Magnetoresistive Sensor)
- SDT (Spin Dependent Magnetoresistive Sensor)

- Pro lineární aplikace (měření polí) jsou vhodné AMR senzory zejména v můstkovém provedení a s vnější kompenzací.
- Měřicí rozsah: ~ 100 nT až ~ 1 mT
- Frekvenční rozsah: DC až ~ 1 MHz

Měření B a H střídavých magn. polí

Měření snímací cívkou



Ve vakuu resp. ve vzduchu:

$$H_m = \frac{U_{av}}{4NS\mu_0 f}$$

Přístroj měří střední hodnotu usměrněného indukovaného napětí.

$$u_i(t) = N \frac{d\Phi}{dt}$$

$$U_{av} = |u_i(t)|$$

$$B_m = \frac{U_{av}}{4NSf}$$

N ...počet závitů MC

S ...plocha obepnutá závitů MC

f ...frekvence pole

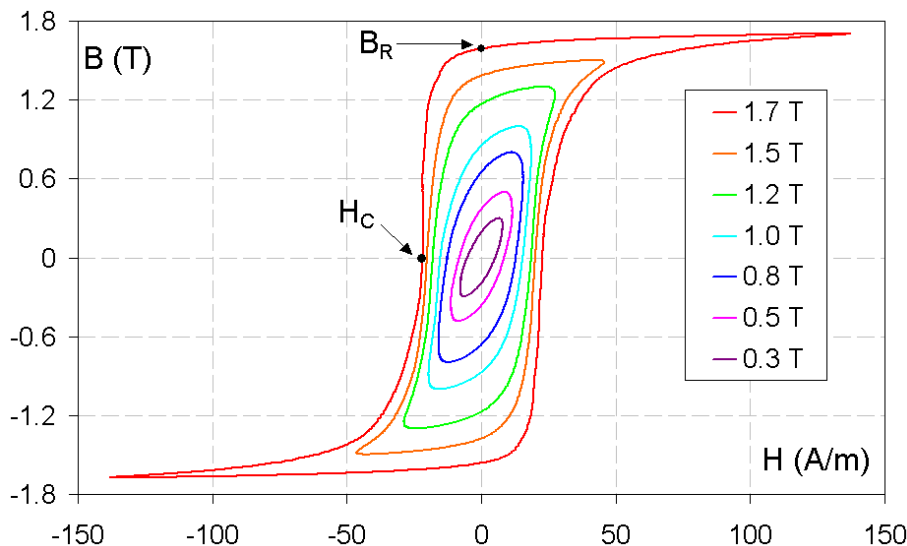
μ_0 ...permeabilita vakua
($4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$)

Pozn.: Pro měření střídavých magnetických polí lze použít také Hallovu sondu, Fluxgate sensor a magnetorezistory v rámci uvedených frekvenčních rozsahů.

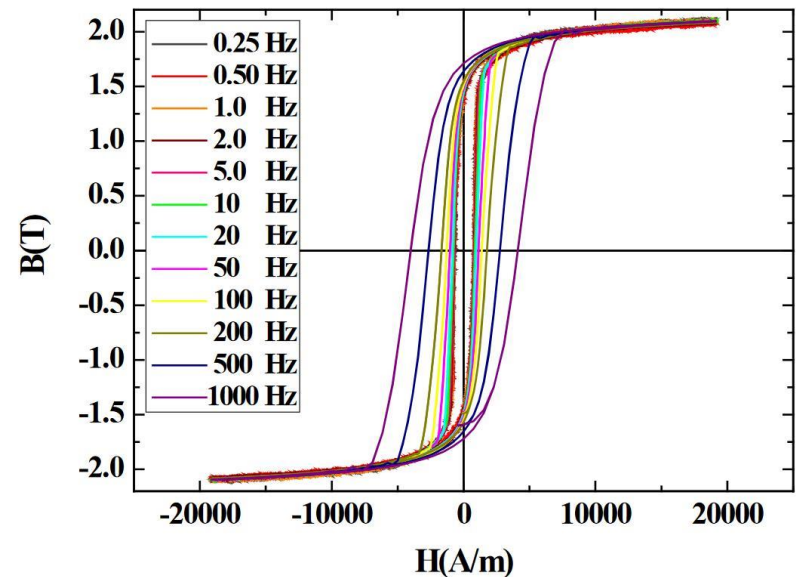
Měření hysteretzní smyčky feromagnetik

Tj. převedení magnetických veličin na jim úměrná napětí, která lze zaznamenat (osciloskop, zapisovač, měřicí karta v PC).

- Rozměry smyčky jsou závislé na velikosti buzení (intenzitě magnetického pole)
- Tvar smyčky je silně ovlivněn frekvencí magnetického pole. Plocha roste s frekvencí.

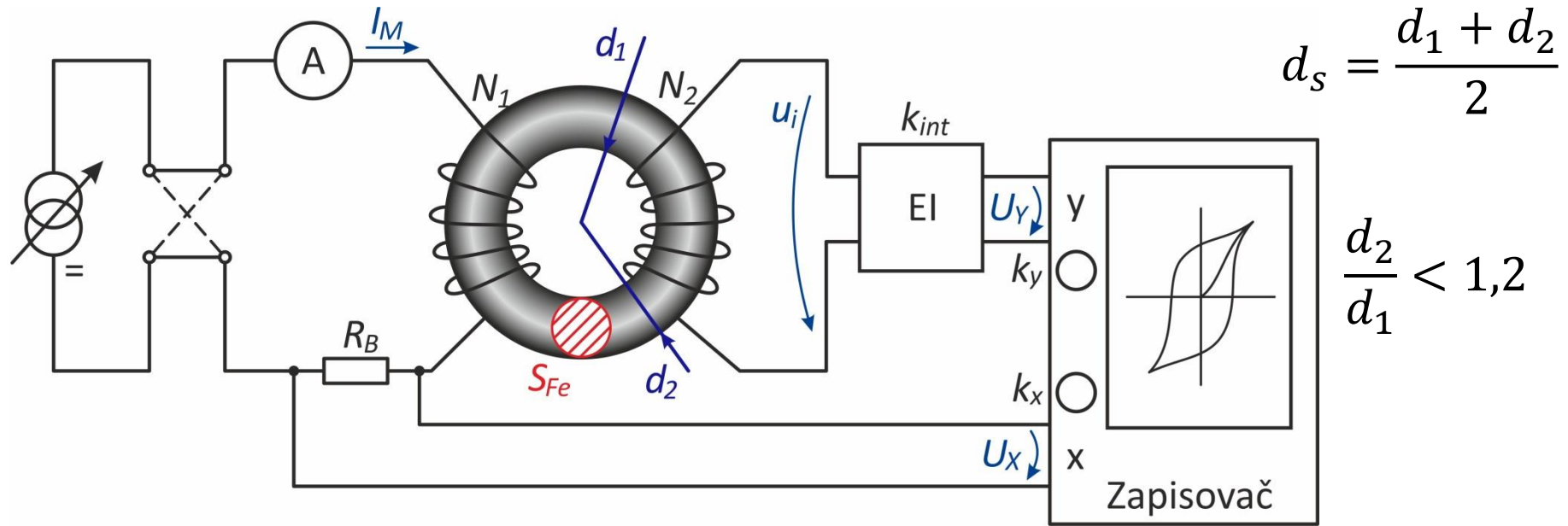


(převzato z: By Zureks - Own work, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=797050>)



(převzato z [3])

Měření statické hysterzní smyčky



- Měřítko zapisovače pro osu x:

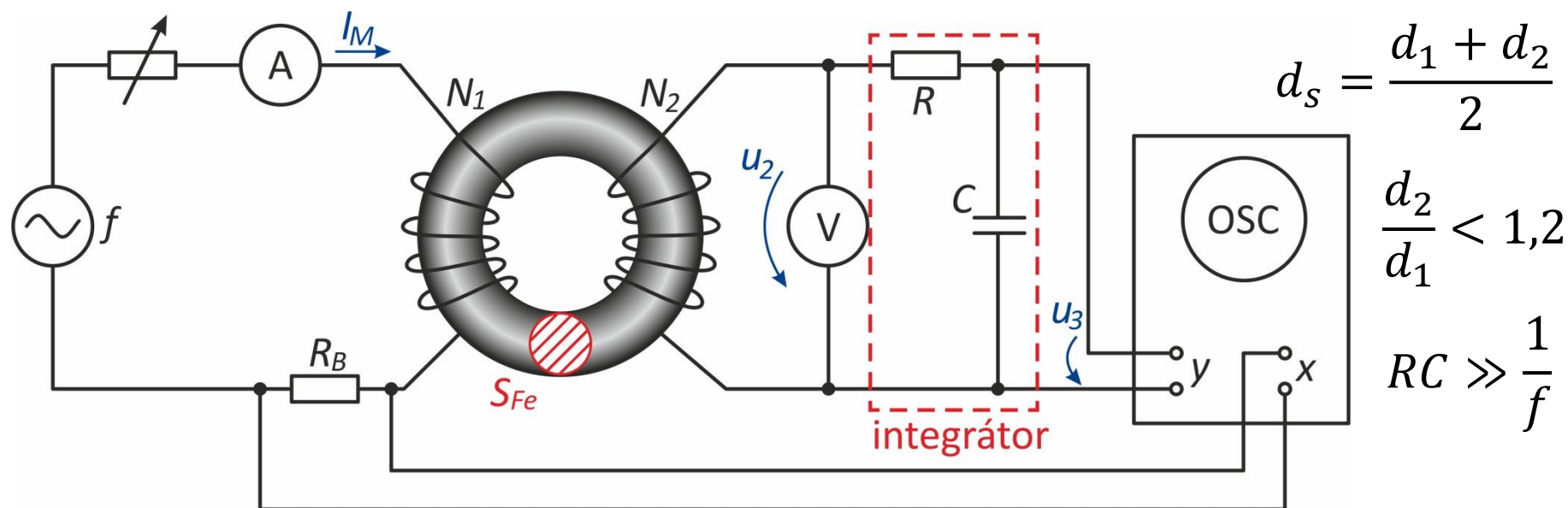
$$m_x = \frac{H_m}{l_{Hm}} = \frac{N_1 k_x}{R_B \pi d_s} \quad (\text{A} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1})$$

- Měřítko zapisovače pro osu y:

$$m_y = \frac{B_m}{l_{Bm}} = \frac{k_{int} k_y}{S_{Fe} N_2} \quad (\text{T} \cdot \text{mm}^{-1})$$

N_1, N_2 ...počty závitů
 k_x, k_y ...konst. zapisovače v ose x a y (V/mm)
 d_s ...střední \emptyset jádra (m)
 R_B ...snímací odpor (Ω)
 k_{int} ...konst. integrátoru
 S_{Fe} ...průřez jádra (m^2)

Měření dynamické hysterezní smyčky



- Měřítka osciloskopu pro osu x:

$$m_x = \frac{2H_m}{a} = \frac{2\sqrt{2}I_{RMS}N_1}{\pi d_s a} \quad (A \cdot m^{-1} \cdot div^{-1})$$

- Měřítka osciloskopu pro osu y:

$$m_y = \frac{2B_m}{b} = \frac{2U_2}{4,44fS_{Fe}N_2b} \quad (T \cdot div^{-1})$$

I_{RMS} ...budicí proud (A)
 N_1, N_2 ...počty závitů
 d_s ...střední \emptyset jádra (m)
 a, b ...šířka resp. výška smyčky (div)
 U_2 ...napětí na V-metru (s usm., $k_{tv} = 1,11$)
 f ...měřicí frekv. (Hz)
 S_{Fe} ...průřez jádra (m²)

Měření ztrát v železe

Určení ztrát z plochy hysterezní smyčky:

$$P_{Fe} = fV_{Fe}S_{BH} \quad (W; Hz, m^3, TA/m)$$

resp.

$$P_{Fe} = fV_{Fe}S_{div}m_xm_y \quad (W; Hz, m^3, div^2, A \cdot m^{-1} \cdot div^{-1}, T \cdot div^{-1})$$

f ...měřicí frekvence

V_{Fe} ...objem vzorku

S_{BH} ...plocha smyčky (v magn. veličinách !)

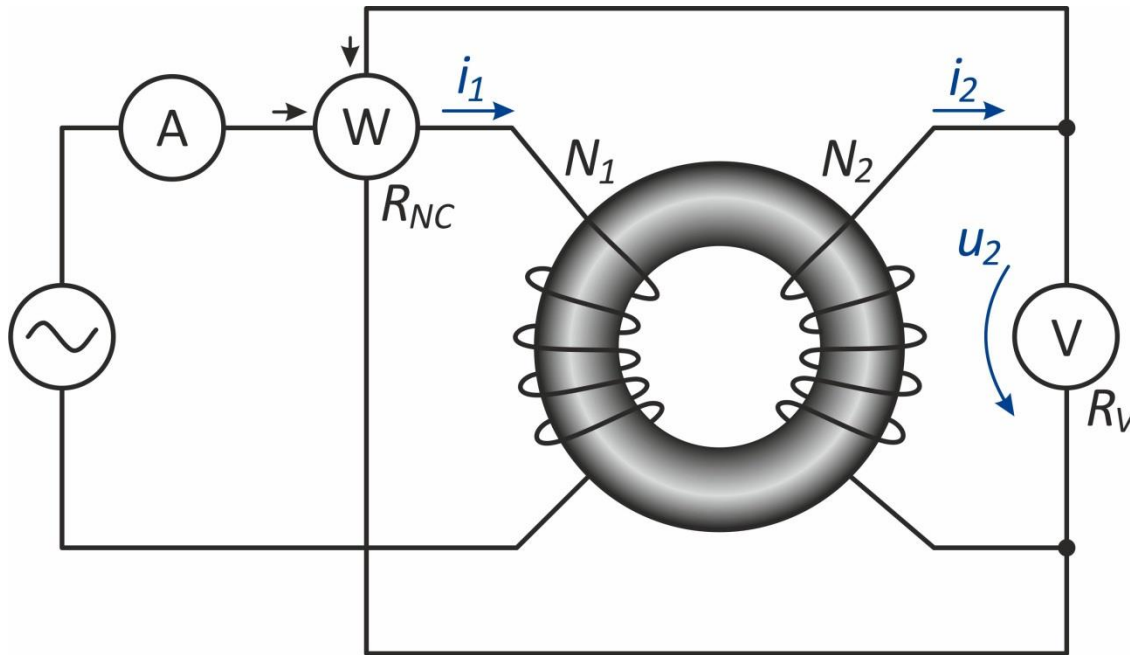
S_{div} ...plocha smyčky v dílcích rastru obrazovky osciloskopu

m_x ...měřítko osy x osciloskopu

m_y ...měřítko osy y osciloskopu

Měření ztrát v železe

Určení ztrát přímým měřením pomocí W-metru:



N_1, N_2 ...počty závitů

P^* ...výstupní údaj W-metru (W)

U_2 ...RMS napětí na snímacím vinutí (V)

R_V ...vnitřní odpor V-metru (Ω)

R_{NC} ...odpor napěťové cívky W-metru (Ω)

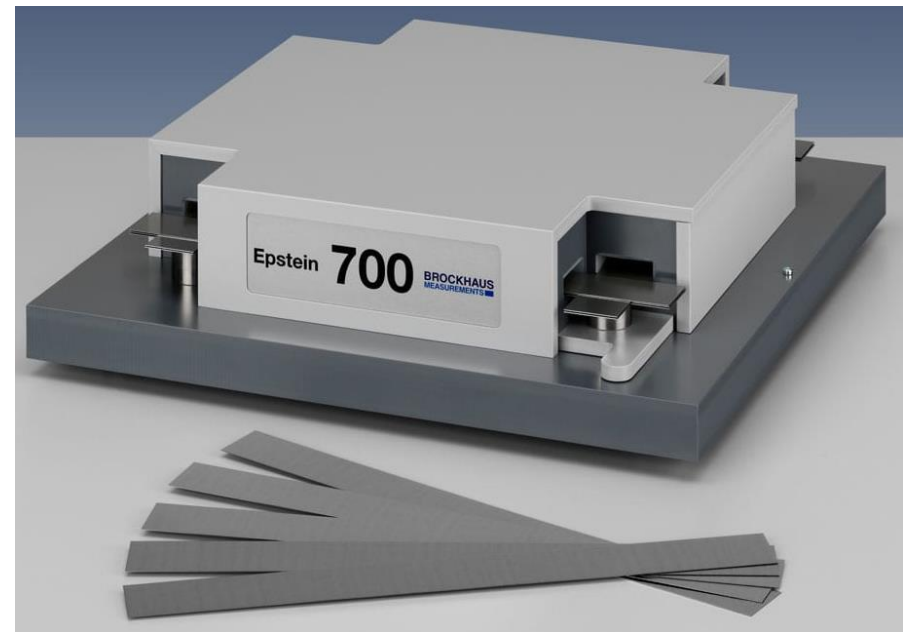
$$P_{Fe} = \frac{N_1}{N_2} P^* - \frac{U_2^2}{R_V} - \frac{U_2^2}{R_{NC}}$$

Měření ztrát v železe

Pro vzorky ve tvaru plechů se používá tzv. Epsteinův rám. **Epsteinův rám** = přípravek s budicím a snímacím vinutím (rovnoměrně rozloženým). Do dutin cívek jsou zasouvány měřené vzorky, tak, aby byl vytvořen uzavřený magnetický obvod.

Příklad: Epstein 700, Brockhaus Messtechnik

- Primární vinutí: 4x175 z
- Sekundární vinutí: 4x175 z
- Měřicí frekv.: 1 Hz až 150 Hz
- Intenzita: 1 A/m až 30 kA/m
- Hmotnost vzorku : 1 kg (max.)
- Rozměry testovaných plechů:
280 mm (min)
30 mm (max)



*Epstein 700, Brockhaus Messtechnik
(převzato z: <https://brockhaus.com>)*

Magnetická měření

Pro komplexní testování feromagnetik jsou vyráběny specializované **testovací systémy**, umožňující rychlou automatizovanou analýzu vzorků. Součástí systému je PC, který ovládá budicí a měřicí část, řídí chod celého testu a následně provádí vyhodnocení měřených dat.



*Průmyslový testovací systém MPF-100-1, Brockhaus Messtechnik,
(převzato z: <https://brockhaus.com>)*

Literatura

- [1] Haasz V.: Elektrická měření – přístroje a metody, ČVUT 2018
- [2] Allegro Microsystems: A1324, A1325, and A1326 Low-Noise Linear Hall-Effect Sensor ICs with Analog Output, Data Sheet, A1324-DS, Rev. 8, June 11, 2020, www.allegromicro.com
- [3] Grössinger P., Mehboob N., Zehetbauer M.: Frequency behavior of SPD treated soft magnetic materials, International Symposium on Advanced Materials (ISAM 2013), IOP Publishing, June 2014.
- [4] Fajt V.: Elektrická měření, SNTL/ALFA, 1987