



## *8.3 Merjenje v izmeničnem magnetnem polju*

Območje uporabe feromagnetnih snovi leži **pri omrežni frekvenci in akustičnem področju.**

- zaradi **vrtilčnih tokov se povečajo izgube,**
- **oblike magnetnih krivulj se spreminjajo.**





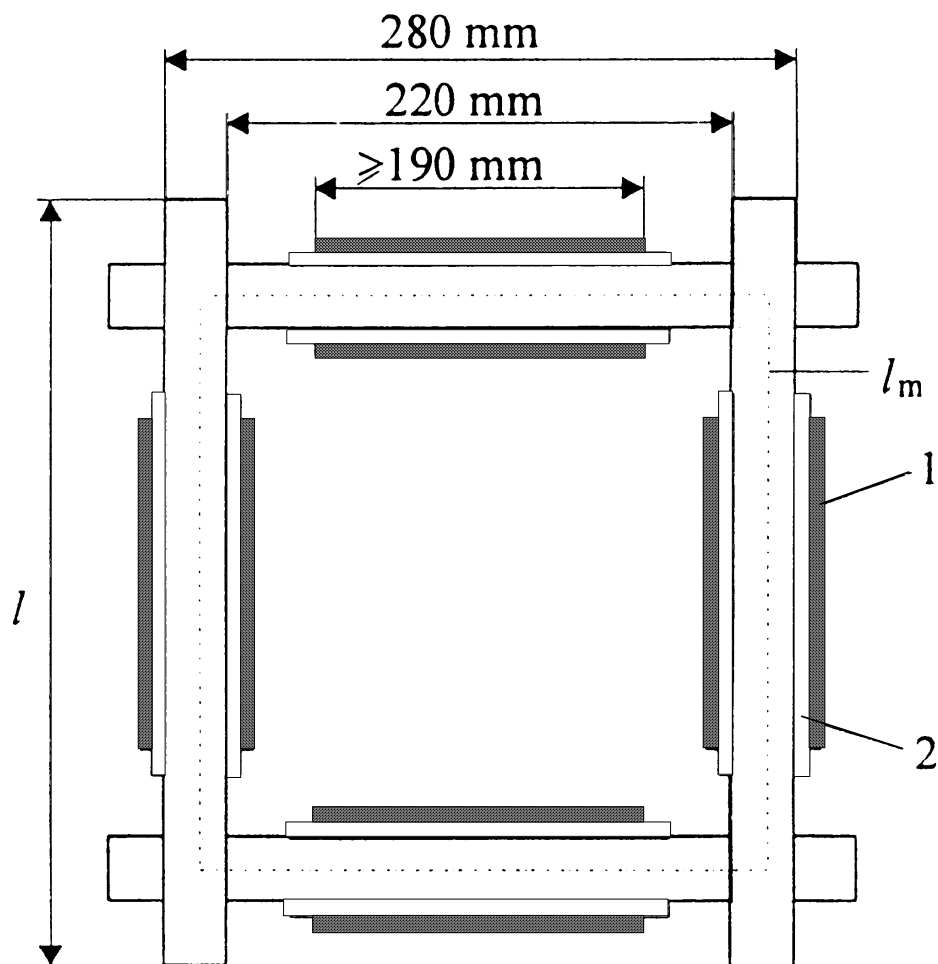
Pomembna je **vrsta magnetnega polja**:

- če je magnetilni tok izmeničen
  - histerezna zanka **je simetrična**  
**(normalna histerezna zanka)**,
- če je izmeničnemu toku dodamo še **enosmerni tok**
  - histerezna zanka **ni simetrična**  
**(superpozicijska histerezna zanka)**,
    - pri usmerniških transformatorjih, gladilnih dušilkah itn.
- če je feromagnetik v **rotirajočem m. polju**, rotacijske histerezne izgube padajo proti nič z naraščajočo indukcijo.





Za preizkušanje **feromagnetne pločevine** se uporablja (mali) **Epsteinov aparat**.



Magnetni krog se sklone po **magnetnih trakovih**, ki jih zložimo z dvojn timer prekrivanjem.

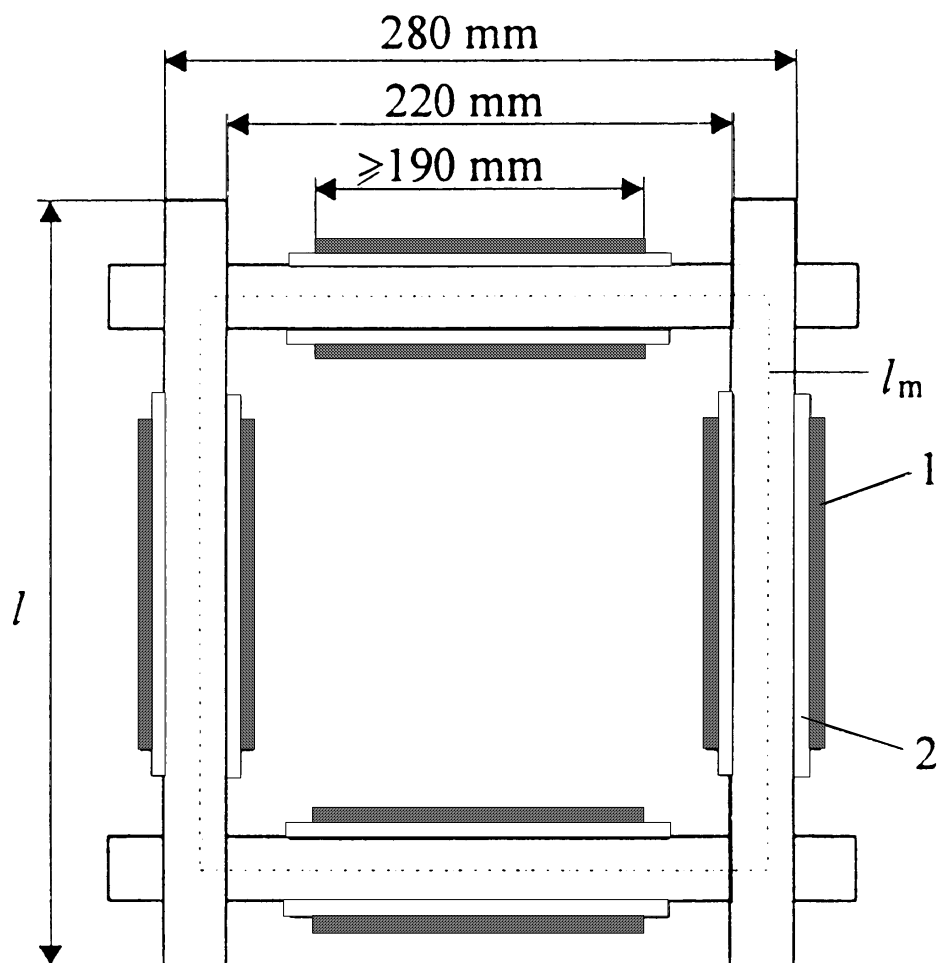
- srednja dolžina silnice:  $l_m = 0,94 \text{ m}$

**Vzbujamo s štirimi primarnimi tuljavami (1 – 700 ovojev) in merimo s sekundarnimi tuljavami(2).**

**Oblikovni faktor** sekundarne napetosti sme odstopati od 1,111 **le za  $\pm 1\%$**  (drugače je potrebna korekcija).

Slika 8.10 Mali Epsteinov aparat





Slika 8.10 Mali Epsteinov aparat

Za merjenje magnetne polarizacije v merjencu  $J$  potrebujemo **kompenzacijo** magnetnega pretoka v vzorcu,

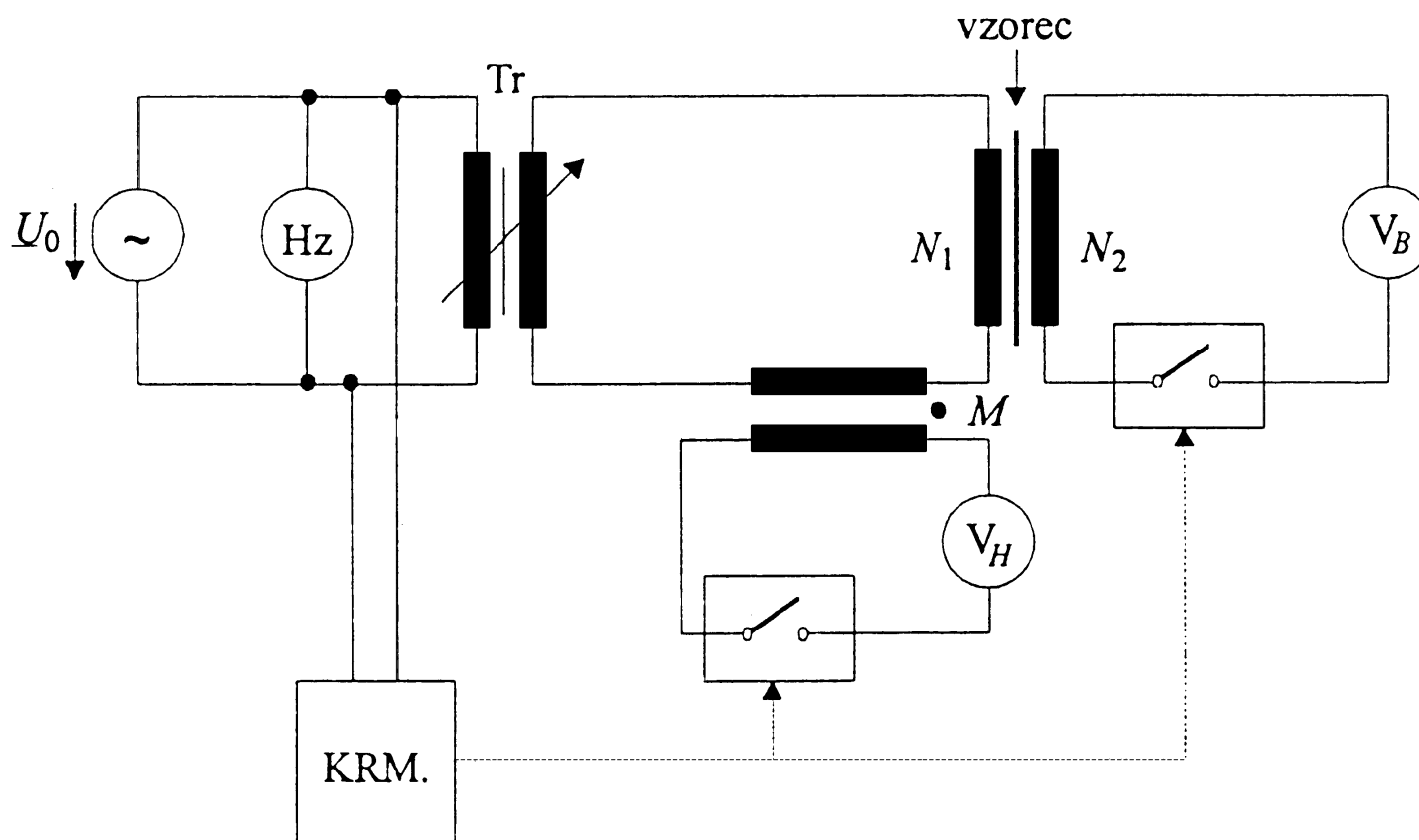
- z **medsebojno induktivnostjo**  $M_c$  kompenziramo vrednost indukcije, kadar vzorca ni v aparatu.



# Dinamična histerezna zanka in komutacijska magnetilnica



Magnetno indukcijo  $B$  in jakost magnetnega polja  $H$  merimo s **sinhronskim stikalom** in **voltmetrom**, ki se odziva na enosmerno komponento.



Slika 8.11 Merjenje dinamične histerezne zanke





Pri **normalni** histerezni zanki imamo **simetrijo III. vrste**.

$$B(t) = \frac{U_B(t)}{2fN_2A}$$

- $U_B(t)$  - napetost voltmetra,
- stikalo je sklenjeno od  $t - T/2$  do  $t$ ,
- $A$  – presek vzorca:

$$A = \frac{m}{4l\rho_m}$$

- $m$  - masa vzorca,
- $\rho_m$  - gostota feromagnetika





**Jakost magnetnega polja določimo preko magnetilnega toka:**

$$H(t) = \frac{I(t)N_1}{l_m}$$

- sam magnetilni tok je :  $I(t) = \frac{U_H(t)}{2fM}$

$$H(t) = \frac{N_1 U_H(t)}{2fM l_m}$$

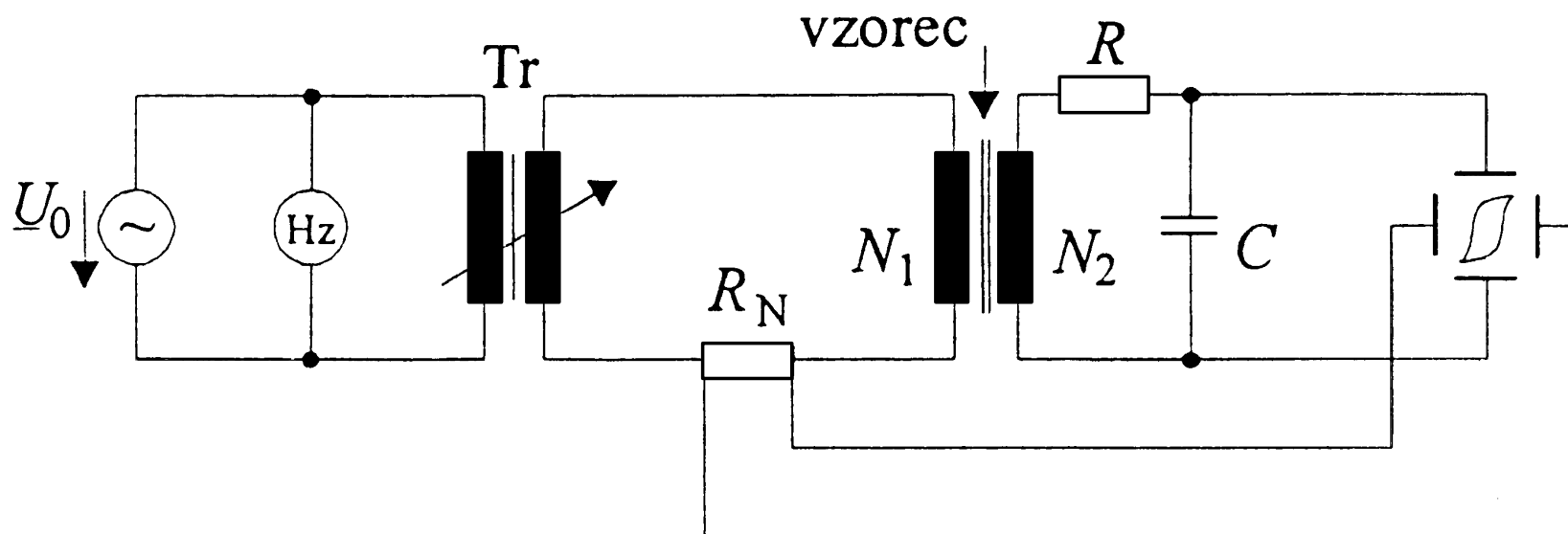
S krmilnim vezje **določimo trenutek vklopa** znotraj periode:

- posnamemo trenutne vrednosti  $H(t)$  in  $B(t)$  in od tod **skonstruiramo dinamično histerezo zanko.**





## Opazovanje histerezne zanke z osciloskopom



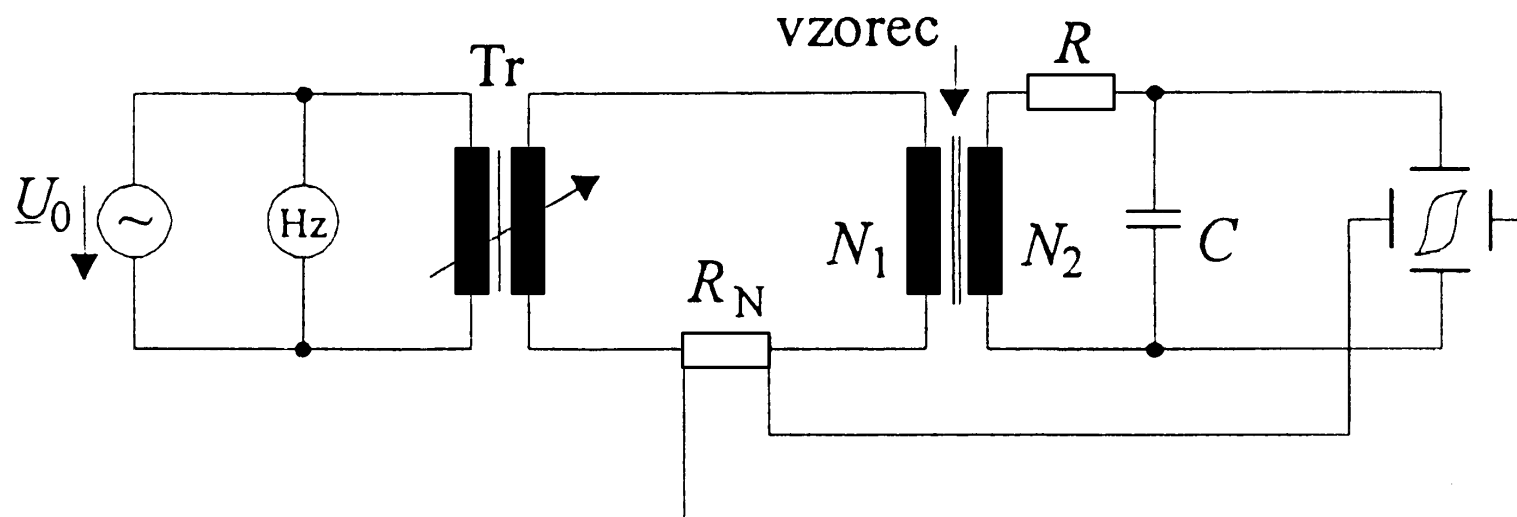
Slika 8.12 Opazovanje histerezne zanke z osciloskopom

Jakost magnetnega polja  $H$  opazujemo preko padca napetosti na upor  $R_N$ :

$$u_{R_N} = iR_N = \frac{R_N l_m}{N_1} H(t)$$







Magnetno indukcijo  $B$  dobimo z integracijo inducirane napetosti ( $\propto dB/dt$ )

- če je  $u_C \ll u_i$ , imamo:  $u_C = \frac{1}{C} \int i dt \approx \frac{1}{C} \int \frac{u_i}{R} dt$  in

- kar da:  $u_C = \frac{N_2 A}{RC} B(t)$   $u_i = -N_2 A \frac{dB}{dt}$

S transformatorjem  $Tr$  lahko nastavimo **različno velike** histerezne zanke.

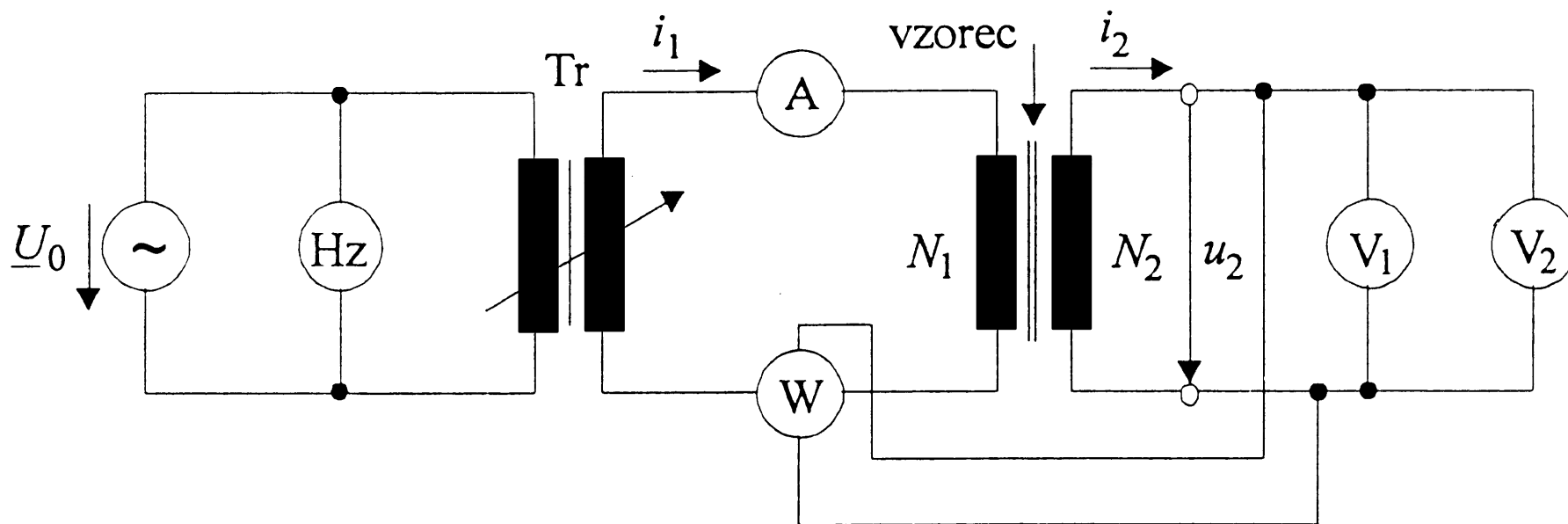
- Če **povežemo vrhove** zank dobimo **dinamično komutacijsko magnetilnico**.





## Specifične izgube

Če nas zanimajo le **izgube** (ne oblika histerezne zanke) jih merimo **z vatmetrom**.

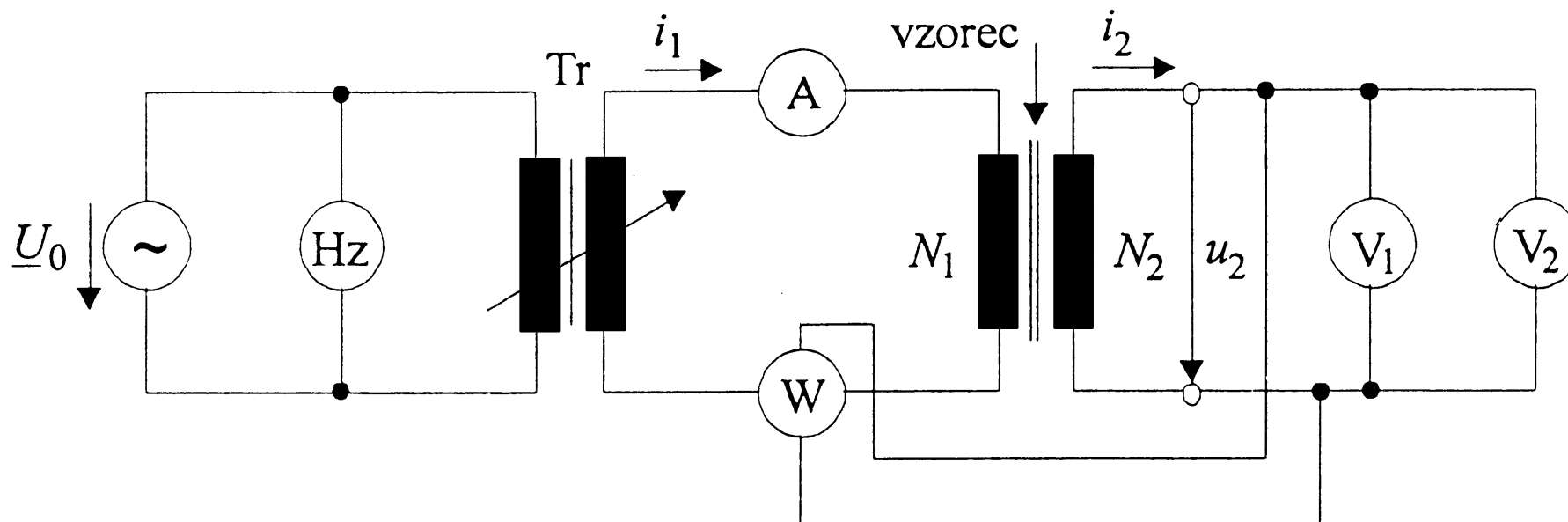


Slika 8.13 Merjenje izgub z vatmetrom

Izgube podajamo:

- pri **sinusnem poteku** magnetne indukcije,
- z določeno **maksimalno vrednostjo** (neorientirana pločevina do  $B_m = 1,5\text{T}$ , orientirana do  $B_m = 1,8\text{T}$ ),
- v frekvenčnem območju od 15Hz do 100Hz.

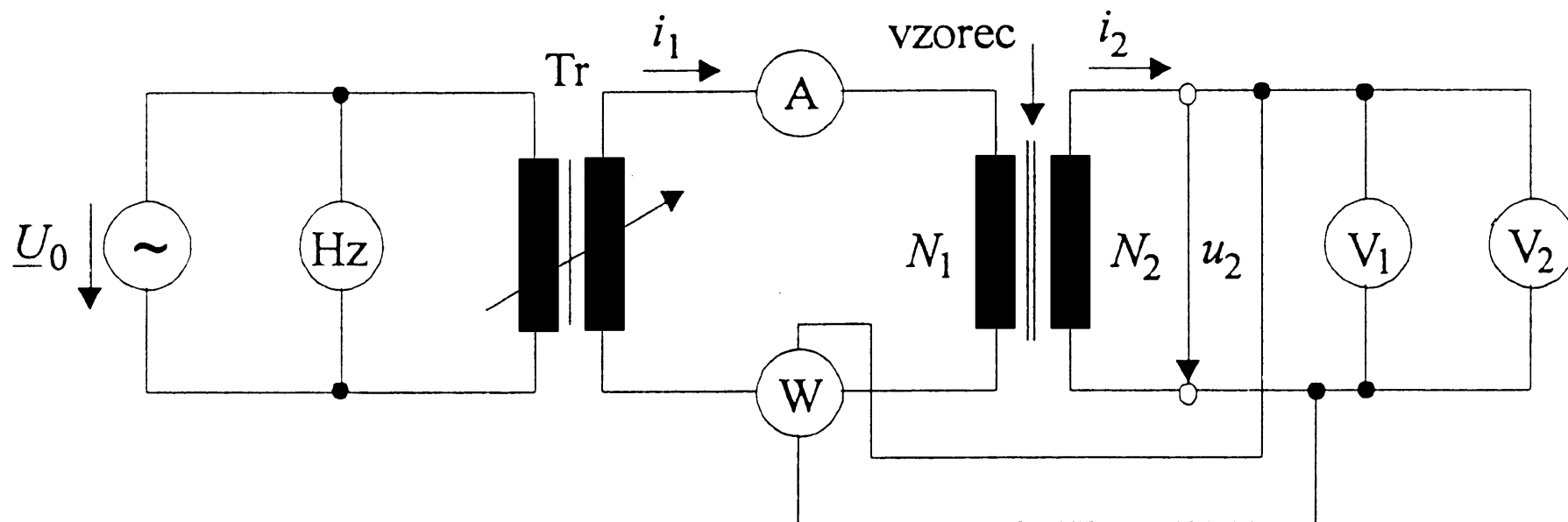




**Napetostna tuljavica** je priključena na **sekundarno navitje** Epsteinovega aparata,

- **izognemo** se padcu napetosti na magnetilnem navitju,
- z  $V_1$  (odziva se na usmerjeno vrednost) **nadziramo** **maksimalno vrednost**  $B_m$ ,
- z  $V_2$  (odziva se na efektivno vrednost) **nadziramo** porabo na sekundarju ( $R_i$  skupna upornost voltmetrov in napetostne veje vatmetra),





**Vatmeter kaže:**  $P_W = P_c + \frac{U_2^2}{R_i}$

**Celotne izgube feromagnetne pločevine so:**

$$P_W = P_c + \frac{U_2^2}{R_i} \rightarrow P_c = P_W - \frac{U_2^2}{R_i}$$

**in celotne specifične izgube:**  $P_s = \frac{P_c}{m_a} = \frac{1}{m_a} \left( P_W - \frac{U_2^2}{R_i} \right)$

$$m_a = l_m A \rho_m = m \frac{l_m}{4l} \quad - \text{ aktivna ali efektivna masa}$$





Za tanko pločevino v **območju akustičnih frekvenc** velja:

$$P_s = aB_m^n f + b \frac{d^2 B_m^2 F^2 f^2}{\rho} = P_h + P_e$$

**Specifične izgube** so sestavljene iz:

- **histereznih specifičnih izgub  $P_h$ ,**
  - opisuje jih **Steinmetzov zakon**,
    - za silicijevo železo je  $n \approx 1,6$ ,
  - **od frekvence so linearno odvisne.**
- **vrtničnih specifičnih izgub  $P_e$** 
  - spreminjajo se s kvadratom  $B_m$ , frekvence,.

$P_s$  ločimo na  $P_h$  in  $P_e$ :

- **s frekvenco** (pri  $f_1$  in  $f_2 \rightarrow P_h(f), P_e(f^2)$ )
- **s faktorjem oblike** (pri  $F_1$  in  $F_2 \rightarrow P_e(F^2)$ )

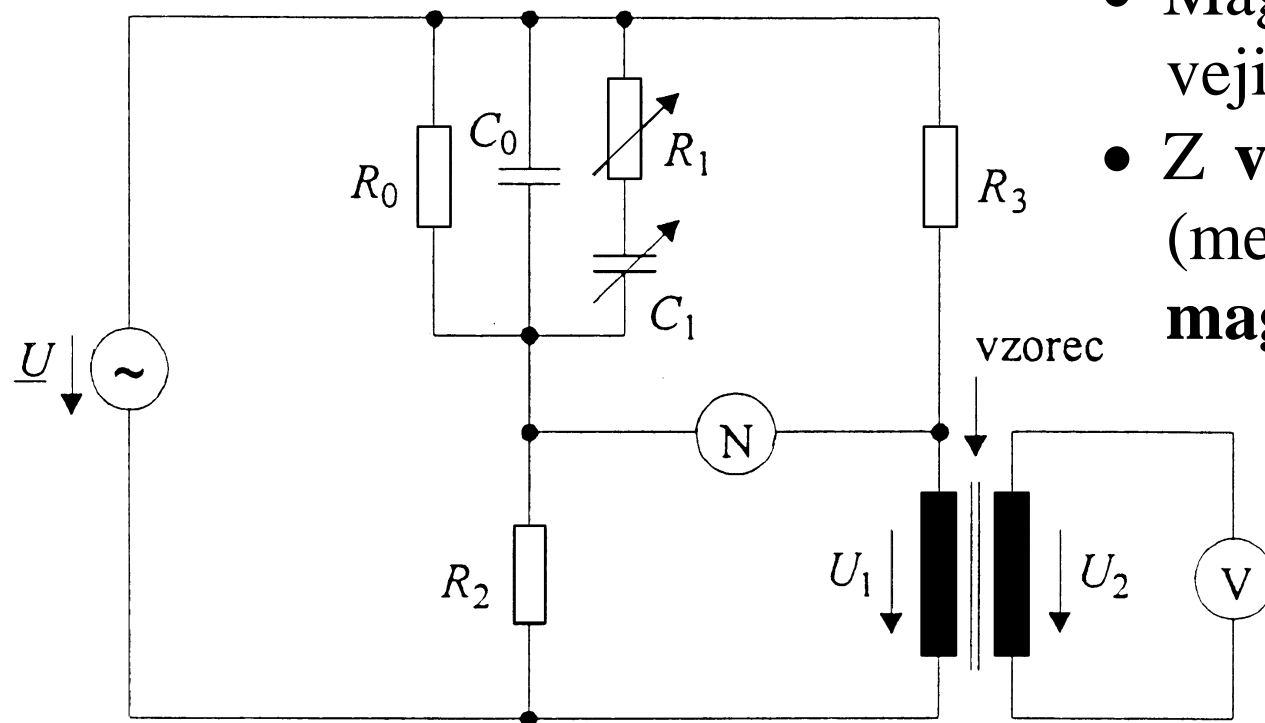




## Merjenje pri nizki magnetni indukciji

Pri vrednostih magnetne indukcije **nekaj** 10 mT (v telekomunikacijah) se uporablja **izmenične mostiče**.

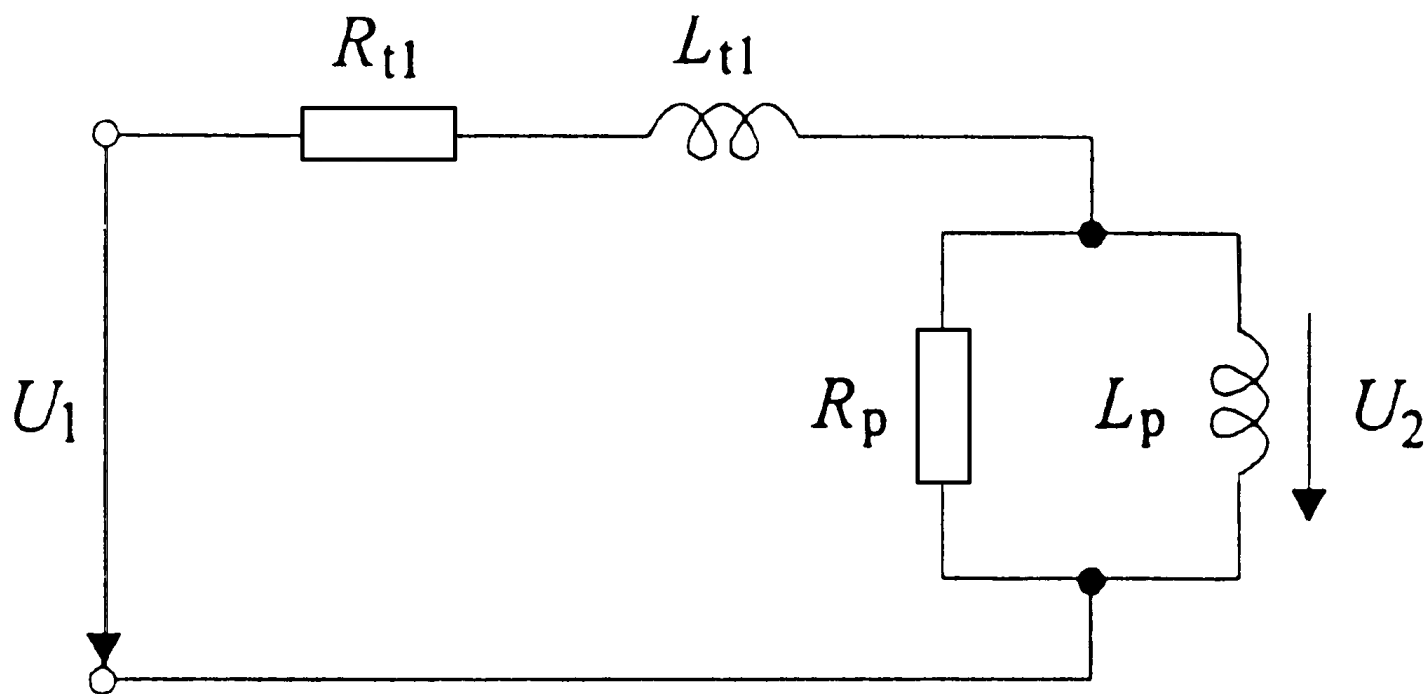
### Modificirani Hayev mostič



- Magnetilno navitje je v četrti veji,
- Z **voltmetrom** v sekundarnem (merilnem) navitju se **nadzira magnetna indukcija**,
- pri majhnih vrednostih zelo **malo odstopa od sinusne oblike**.

Slika 8.14 Modificirani Hayev mostič

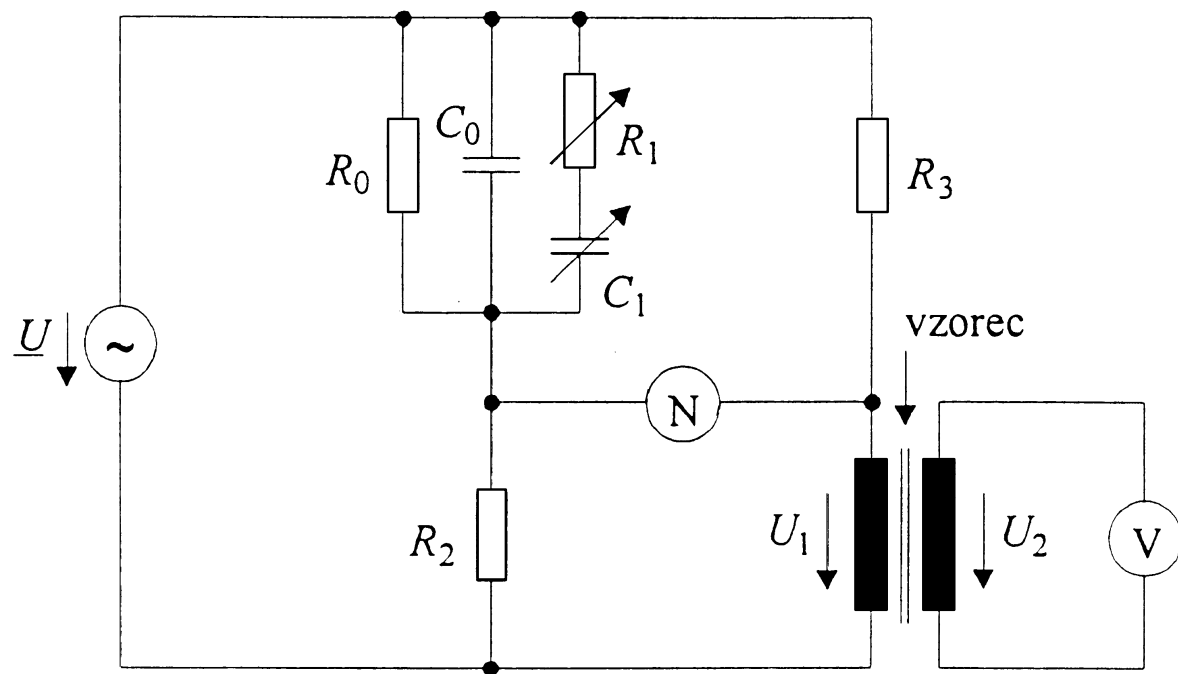




Slika 8.15 Nadomestno vezje za Epsteinov aparat

- $R_{t1}$  - ohmska upornost primarnega navitja,
- $L_{t1}$  - induktivnost, ko vzorca ni v aparatu,
- $R_p$  in  $L_p$  sta ekvivalentni vrednosti za preizkušani vzorec.





Mostič najprej **uravnovesimo brez vzorca** z elementoma  $R_0$  in  $C_0$ :

$$\underline{Y}_1 = \frac{1}{R_0} + j\omega C_0, \quad \underline{Z}_3 = R_3$$
$$\underline{Z}_2 = R_2, \quad \underline{Z}_4 = R_{t1} + j\omega L_{t1}$$

Nato **vložimo vzorec** v Epsteinov aparat in **uravnovesimo** z  $R_1$  in  $C_1$ :

$$\underline{Y}_1 = \frac{1}{R_0} + j\omega C_0 + \frac{1}{R_1 + 1/j\omega C_1}, \quad \underline{Z}_3 = R_3$$
$$\underline{Z}_2 = R_2, \quad \underline{Z}_4 = R_{t1} + j\omega L_{t1} + \frac{1}{1/R_p + 1/j\omega L_p}$$

Iz ravnovesnih pogojev dobimo:  $R_p = \frac{R_2 R_3}{R_1}$ ,  $L_p = R_2 R_3 C_1$







**Celotne izgube v jedru so:**

$$P_c = \frac{U_2^2}{R_p} = \frac{U_2^2 R_1}{R_2 R_3}$$

- $U_2$  je vrednost inducirane napetosti na  $R_p$  in  $L_p$  (pri pogoju  $R_v \gg R_{t2}$  in  $N_1 = N_2$ ).

**Relativno permeabilnost feromagnetika lahko določimo iz**

$$L_p = \mu_r \mu_0 \frac{N_1^2 A}{l_m}:$$

$$\mu_r = \frac{L_p l_m}{N_1^2 A \mu_0} = \frac{R_2 R_3 C_1 l_m}{N_1^2 A \mu_0}$$

