



8. PREIZKUŠANJE FEROMAGNETNIH SNOVI

V feromagnetiku ugotavljamo odnos med:

- magnetno indukcijo \vec{B} ali magnetno polarizacijo \vec{J} , redkeje namagnetenostjo \vec{M} ,
- in jakostjo magnetnega polja \vec{H} .

Povezave:

- makroskopski pogled na magnetenost, ki se obravnava kot dodatno polje zaradi tokovnih zank.

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{J} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M} = \mu_0 (\vec{H} + \kappa_m \vec{H}) = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H}$$

- mikroskopski pogled izhaja iz celotnega magnetnega momenta na enoto prostornine:

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{m}}{V}$$





- **makroskopski pogled** na magnetenost:

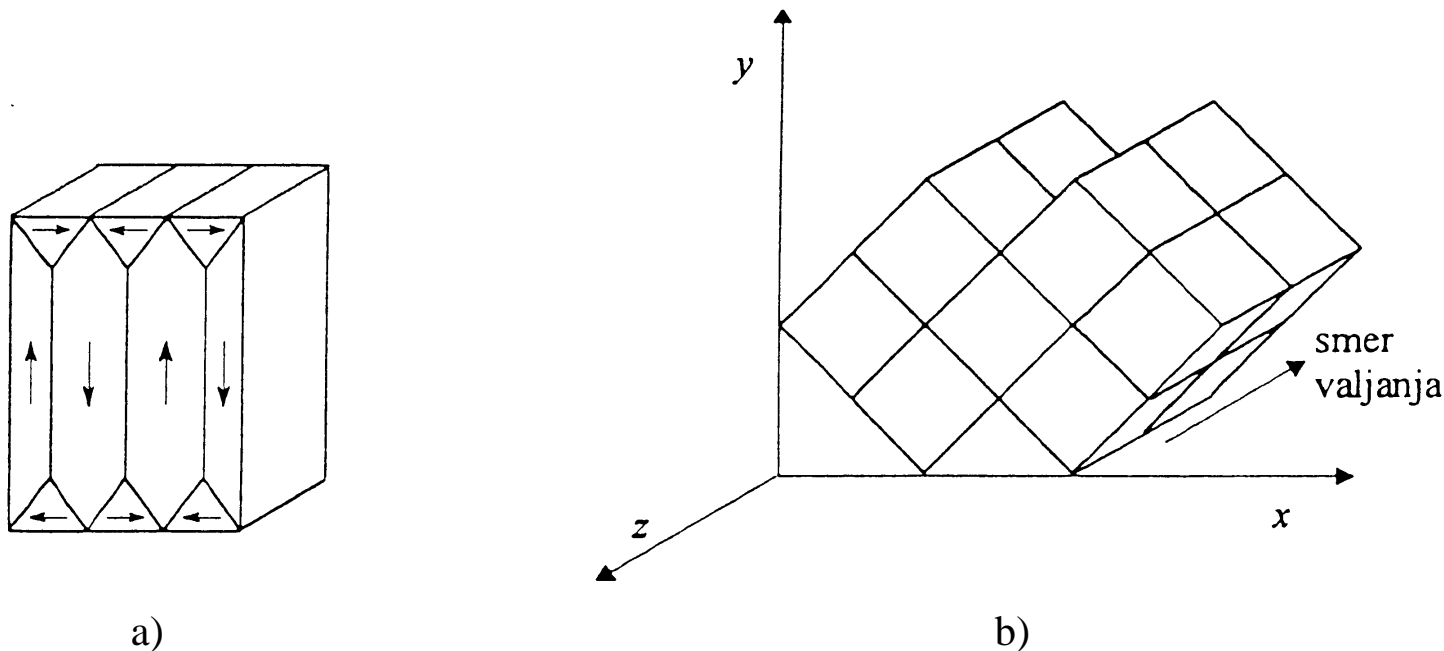
$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{J} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M} = \mu_0 (\vec{H} + \kappa_m \vec{H}) = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H}$$

- μ_0 - magnetna konstanta ali **permeabilnost vakuuma**
 - $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$
 - κ_m - magnetna **susceptibilnost**,
 - $\mu_r = 1 + \kappa_m$ - **relativna permeabilnost**,
 - μ - **absolutna permeabilnost**.
- **mikroskopski pogled** na magnetenost: $\vec{M} = \frac{\sum \vec{m}}{V}$
 - $\vec{m} = i\vec{A}$ - **magnetni moment** elementarne **tokovne zanke** s **ploščino** \vec{A} , v kateri teče **tok** i .
 - magnetni moment označuje **magnetni dipol**, kot **izvor** magnetnega polja.





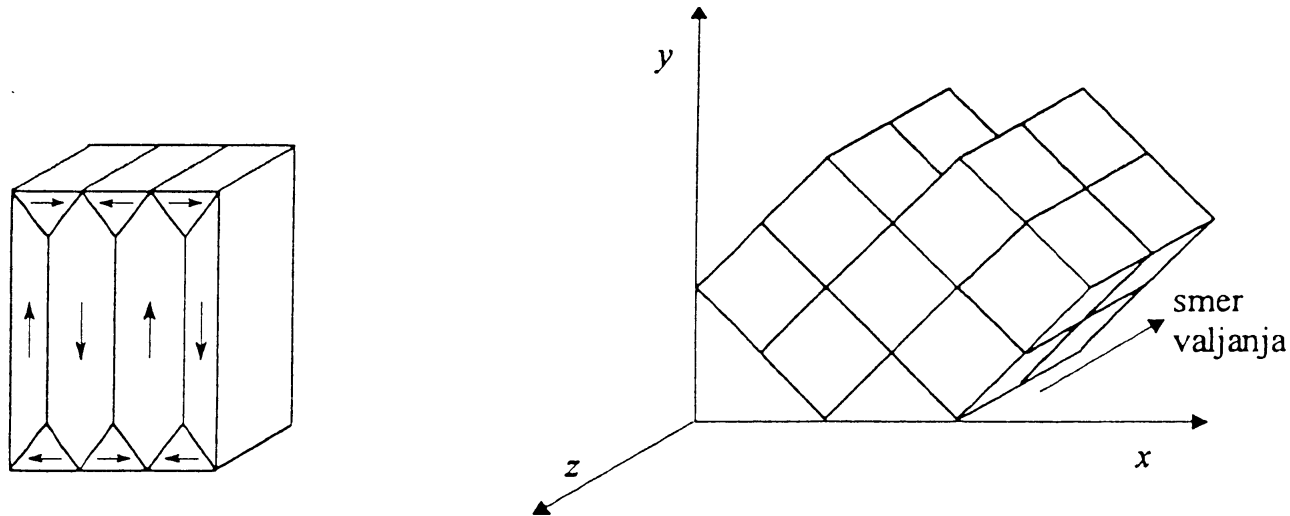
Za feromagnetno snov je značilno, da so **magnetni momenti atomov znotraj določenih (Weissovih) območij** – domen praktično **razvrščeni v isto smer**.



Slika 8.1 Domene v nevtralnem feromagnetiku in Gossova tekstura

V kristalu **nevtralnega feromagnetika** se magnetni **pretok zaključí v samih domenah** (a).

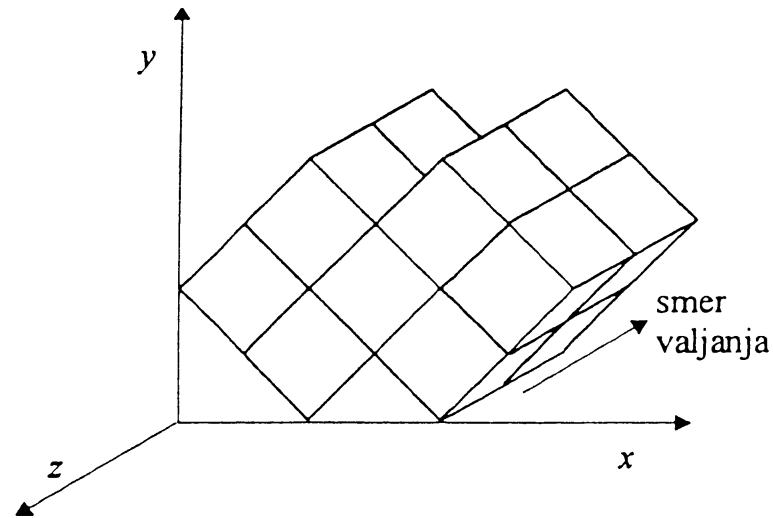
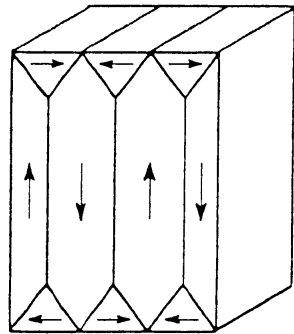




V zunanjem magnetnem polju začne domena vzporedna polju naraščati na račun drugih.

- **z večanjem polja se začno magnetni momenti domene obračati v smeri polja,**
 - **ko so vsi vzporedni s poljem, je magnetenje zaključeno → magnetno nasičenje.**





Kos železa (feromagnetika) je sestavljen iz velike množice majhnih kristalov.

- so različno **orientirani** – **različna tekstura**.
- **Gossova tekstura** orientirane silicijeve železne pločevine je magnetno **anizotropna**.
- **lažje se magneti v smeri valjanja (os z)**





Krivulja, ki **povezuje magnetno indukcijo B** (ali J ali M) in **jakost magnetnega toka H** je

magnetilna krivulja ali magnetilnica:

- $B-H$, $J-H$ in $M-H$ magnetilnice

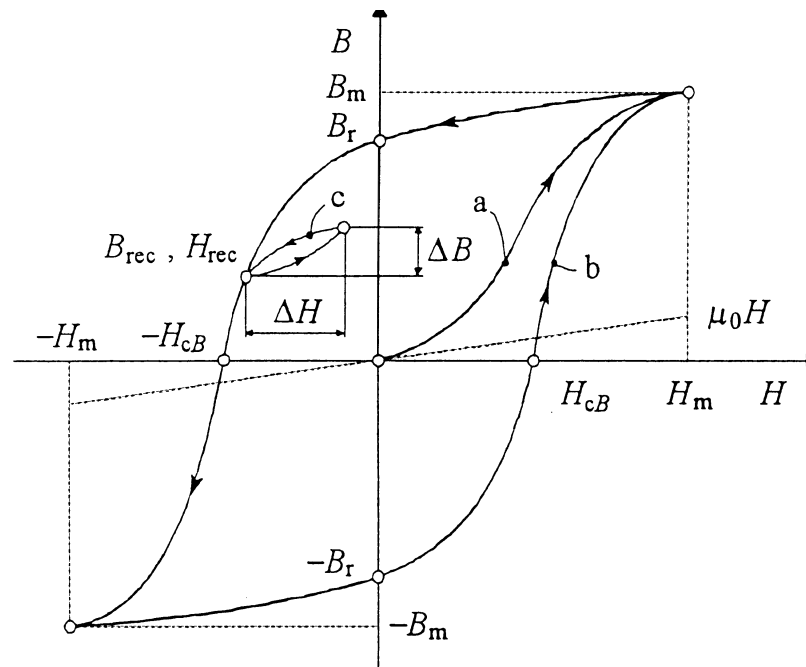
Magnetilnice feromagnetnih snovi so **nelinearne**. Ločimo:

- **statične** magnetilnice,
 - **spreminjanje jakosti polja** ne vpliva na samo magnetilnico (nekaj Hz).
- **dinamične** magnetilnice,
 - magnetilnica se zaradi hitrosti spreminjanja polja spremeni.





Značilnost magnetilnice je **histerezna zanka**:

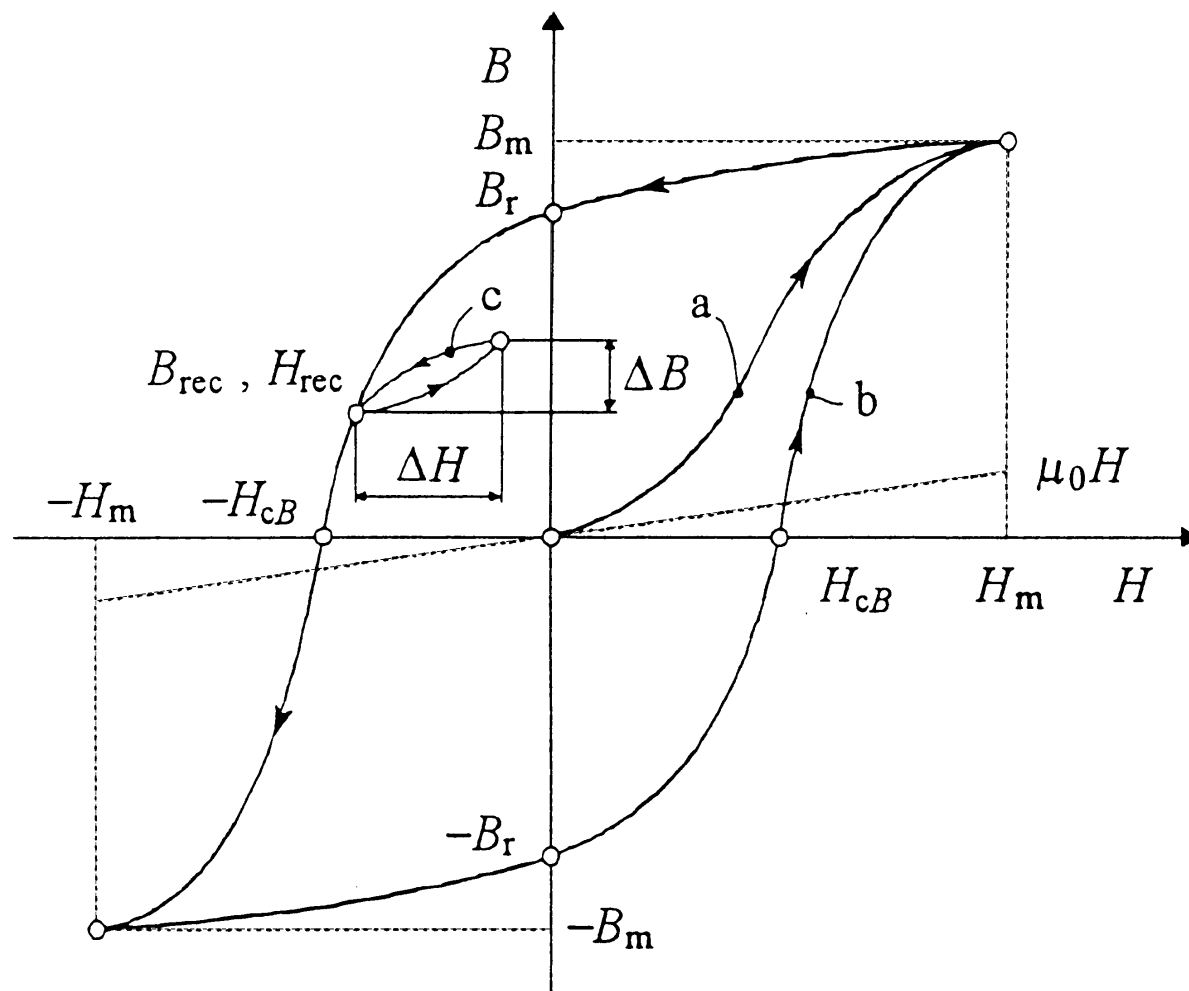


- Če nevtralen feromagnetik **izpostavimo** magnetnemu **polju** in ga **nato odstranimo**, indukcija ne pade nazaj na nič,
 - To preostalo vrednost imenujemo **remanenčna magnetna indukcija**.
- Če želimo **odpraviti remanenčno** magnetno indukcijo, moramo feromagnetik **izpostaviti nasprotno usmerjenem magnetnem polju s koercitivno poljsko jakostjo**.



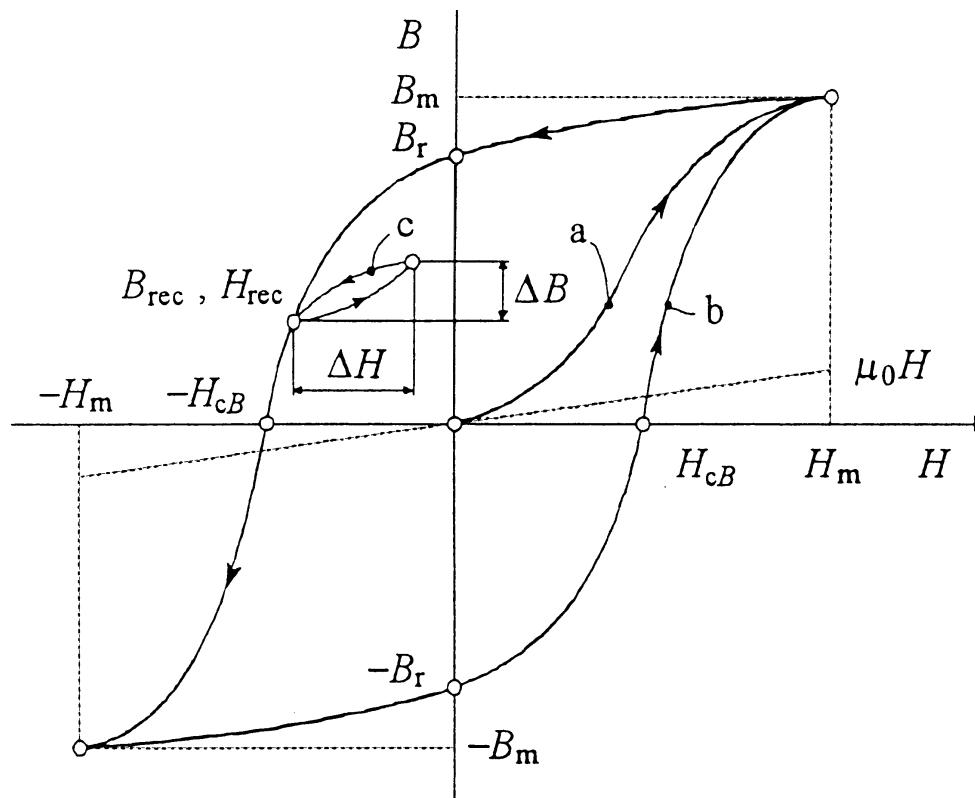


Po enem **ciklu spreminjanja** magnetnega polja se magnetna krivulja sklene → **histerezna ($B-H$) zanka**.



Slika 8.2 Krivulja prvega magnetenja ter histerezna in povratna zanka





Ločimo:

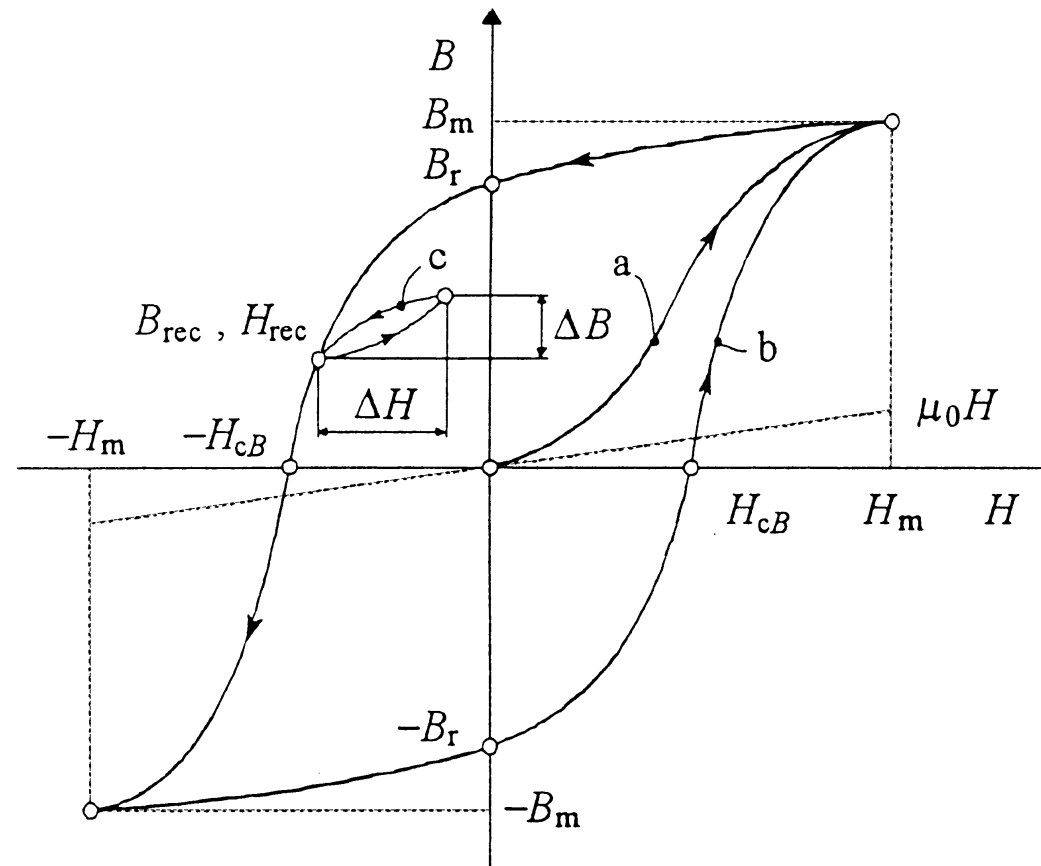
- **krivulja prvega magnetenja** ali deviška magnetilnica (a),
 - monotonno **naraščajoče magnetenje** iz nevtralnega (nemagnetnega) stanja
- **nasičenjska histerezna zanka**
 - izhaja iz stanja nasičenja
 - na njej leži **remanenca** B_r ($H = 0$)
in **koercitivnost** H_{cB} ($B = 0$).





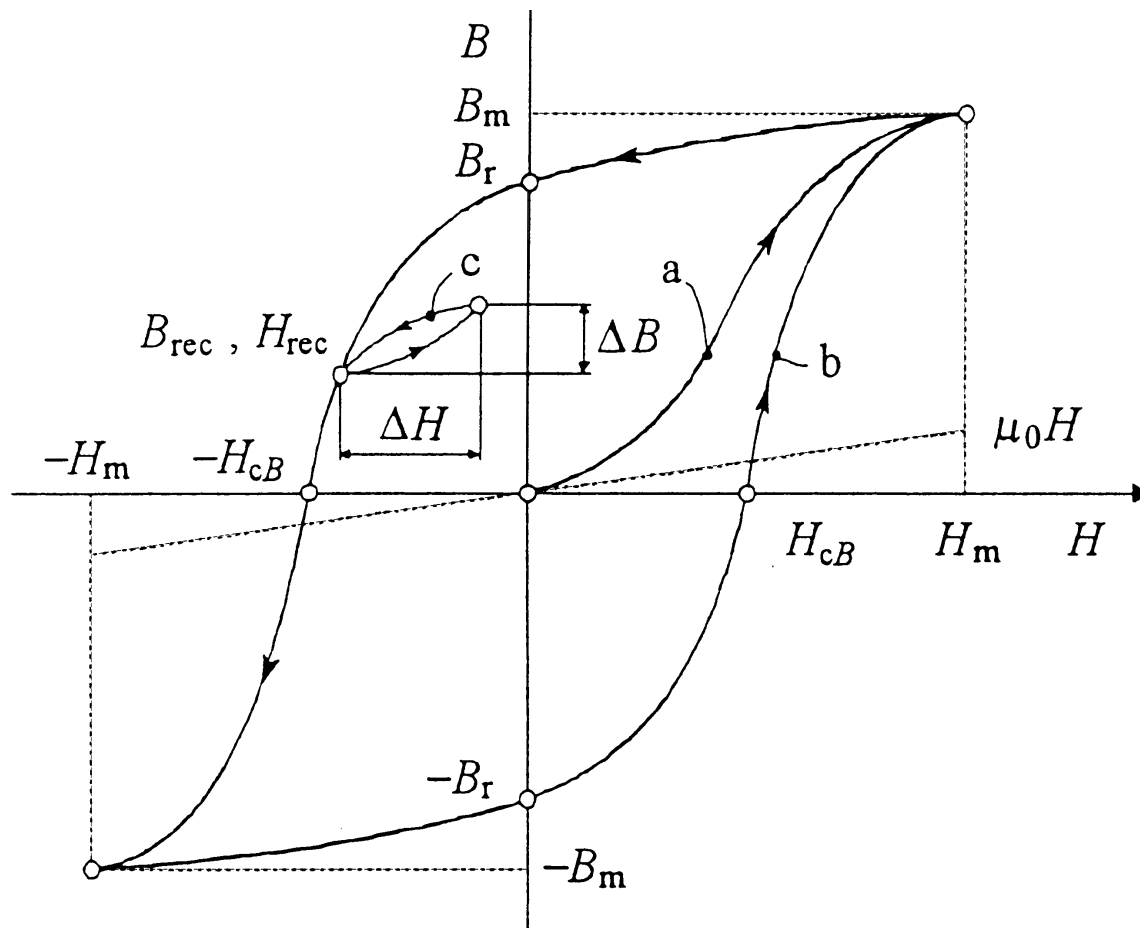
Za trdomagnetne snovi (za trajne magnete) je odločilen del histereze v drugem ali četrtem kvadrantu:

- razmagnetilna krivulja (od B_r do H_{cB})



Značilen je tudi **maksimalen produkt** BH_{\max} na razmagnetilni krivulji.





Če v točki (B_{rec}, H_{rec}) popustimo in ponovno povečamo jakost m. polja za ΔH se magnetna indukcija spreminja po **povratni krivulji (c)**.

- razmerje $\Delta B/\Delta H$ določa **povratno permeabilnost** μ_{rec} (značilen podatek za trdomagnetni material).





Energija, ki je potrebna za en obhod zanke je sorazmerna njeni površini,

$\oint H dB$ - spremeni se v toplotno energijo

- enota za H je: A/m ,
- enota za B je: $T = Vs/m^2$
- enota za energijo za **en hiterezni cikel na enoto prostornine** je tako: J/m^3

Če je f obhodov histerezne zanke v časovni enoti in ima snov gostoto ρ dobimo **specifične izgube** P_s v W/kg .





Z večanjem frekvence f se dodajajo še **vrtnične izgube**

- zaradi spreminjanja m. pretoka se **v snovi inducira napetost**, ki požene t.i. **vrtnične tokove** na ohmski upornosti feromagnetika.
- **histerezna zanka** je zaradi vrtničnih izgub **večja** kot statična zanka.

Specifične izgube P_s so sestavljene iz :

- **histereznih izgub** P_h in
- **vrtničnih izgub** P_e .

$$P_s = P_h + P_e = \frac{f}{\rho} \oint H dB$$

Pomembna je tudi **oblika magnetenja** (B in H).

- vrtnične izgube so ponavadi podane za sinusno obliko

Pri **zelo nizkih** B in **visokih frekvencah** (telekomunik.) pridejo do izraza preostale izgube (absorbcijske itd.).





8.1 Merjenje magnetne indukcije in jakosti magnetnega polja

Magnetno indukcijo merimo s tuljavico, ki naj bo tesno navita na merjenec.

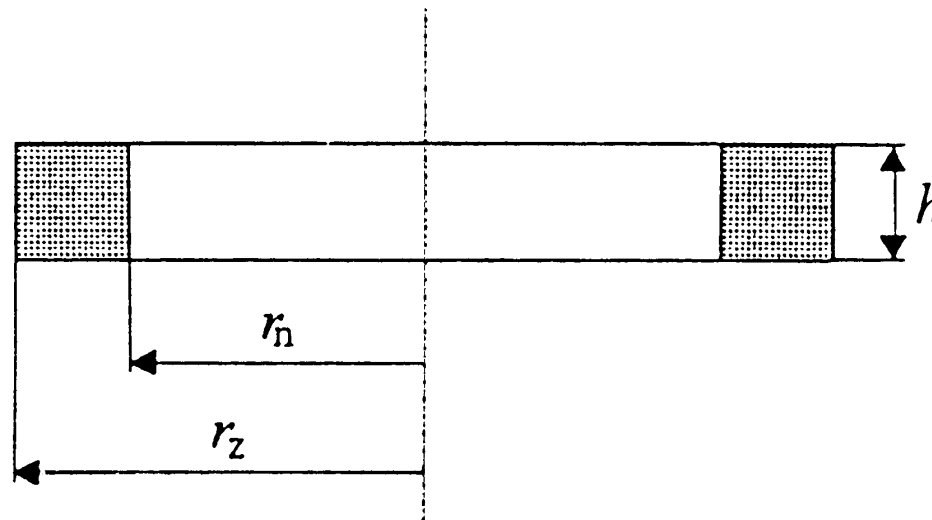
Jakost magnetnega polja pa merimo:

- a) **prek magnetilnega toka,**
- b) ali merjenja magnetne **indukcije v zraku B_0 tik ob merjencu.**





a) prek magnetilnega toka



Slika 8.3 Toroid

Kadar je magnetni **krog sklenjen v materialu** (toroid ali trakovi zloženi v krožno obliko), določimo **H iz magnetilnega toka in srednje dolžine silnice.**

$$H = \frac{\oint \vec{H} d\vec{s}}{l_{\text{sr}}} = \frac{IN}{l_{\text{sr}}}$$

- za toroid velja: $l_{\text{sr}} = 2\pi \frac{(r_z - r_n)}{\ln(r_z/r_n)}$

- če $(r_z - r_n) \leq r_z/5$ potem: $l_{\text{sr}} = \pi(r_n + r_z)$





b) Z merjenjem B_0 tik ob merjencu lahko ugotovimo H v merjencu, ker **prehaja tangencialna komponenta jakosti polja zvezno iz enega sredstva (feromagnetik) v drugo (zrak).**

$$H = \frac{B_0}{\mu_0}$$

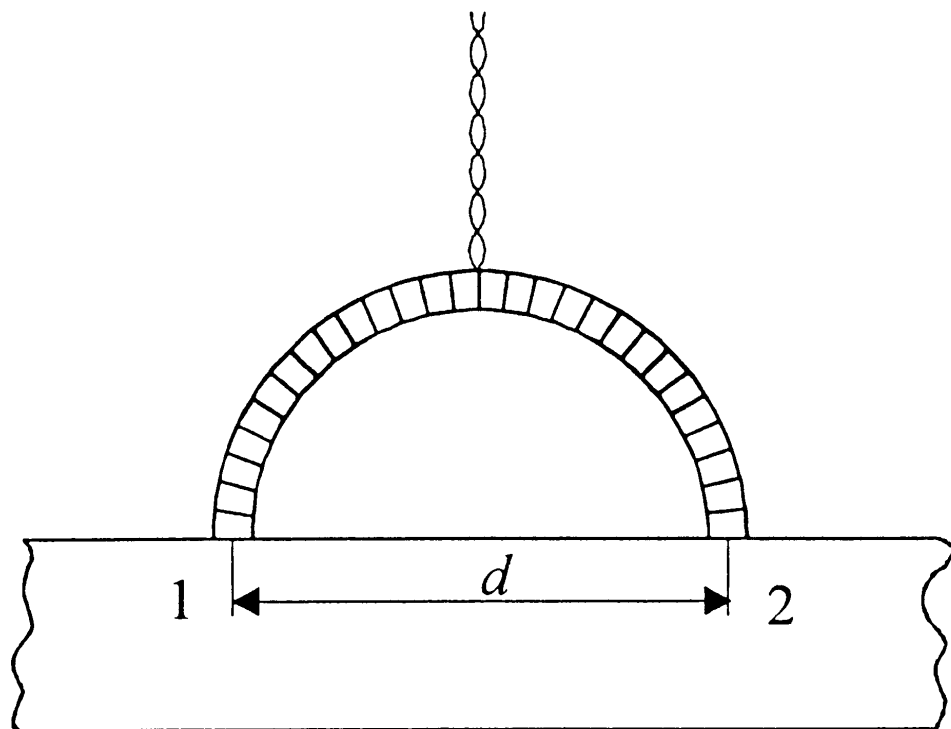
- B_0 merimo s Hallovo sondo ali indukcijsko tuljavico,
- če se merjencu **ne moremo dovolj približati**, merimo na **več razdaljah in ekstrapoliramo.**



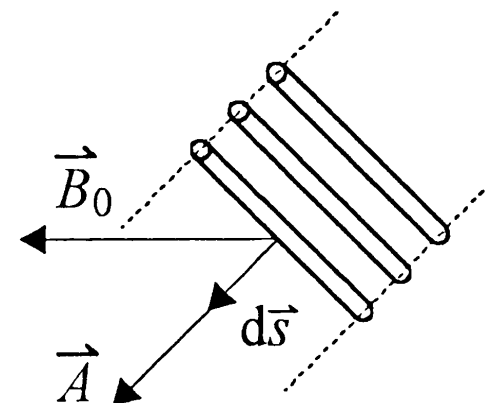


Merjenje jakosti magnetnega polja preko merjenja magnetne napetosti med dvema točkama na površini.

- Rogowskega tuljavica ali Chattock tuljavica,
 - podolgovata tuljavica navita v dveh plasteh (N ovojev) na telo enakomerne prereza dolžine l .



a)



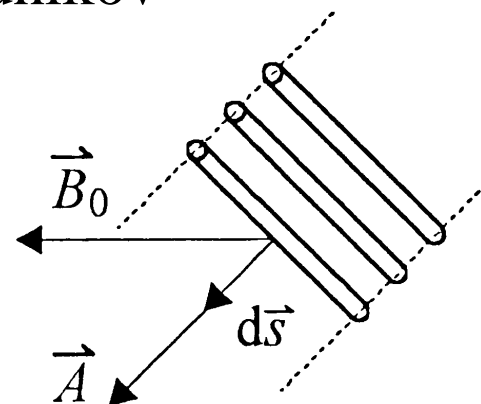
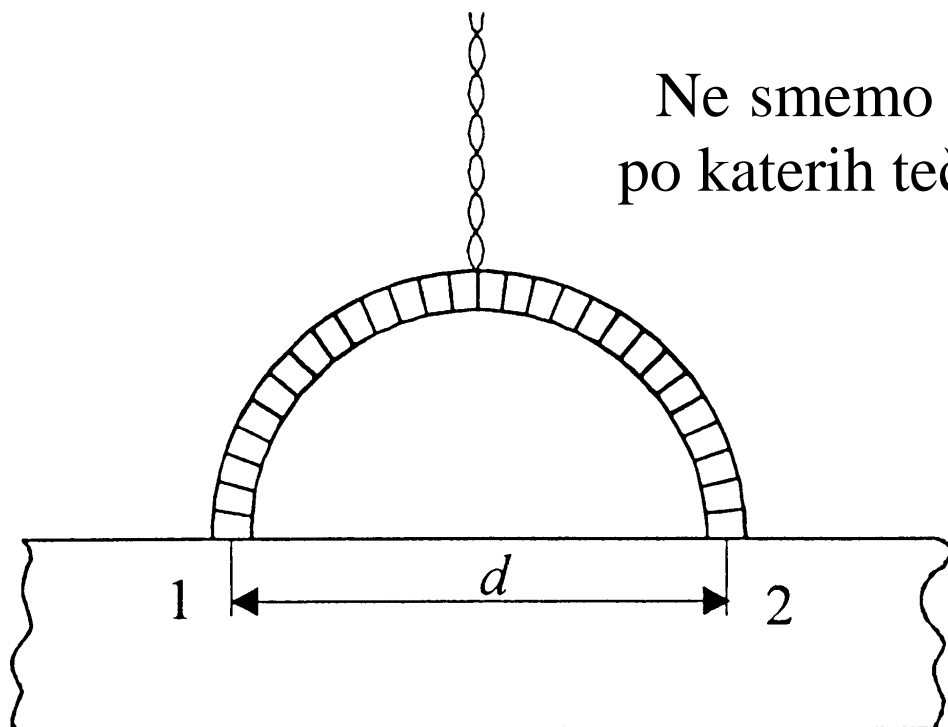
b)

Slika 8.4 Merilnik magnetne napetosti





Ne smemo objeti vodnikov
po katerih teče el. tok!



Na dolžini $d\vec{s}$ **objame magnetni sklep:** $d\Psi = \left(\frac{N}{l} ds\right) \vec{B}_0 \vec{A}$

- $\left(\frac{N}{l} ds\right)$ - število ovojev na dolžini ds ,
- $\vec{B}_0 \vec{A}$ - magnetni pretok skozi ovoj.

$$d\Psi = \left(\frac{N}{l} ds\right) (\mu_0 \vec{H}) \left(A \frac{d\vec{s}}{ds}\right) = \mu_0 A \frac{N}{l} \vec{H} d\vec{s}$$





$$d\Psi = \left(\frac{N}{l} ds \right) (\mu_0 \vec{H}) \left(A \frac{d\vec{s}}{ds} \right) = \mu_0 A \frac{N}{l} \vec{H} d\vec{s}$$

Če tuljavico odstranimo iz stalnega polja, se inducira napetostni impulz:

$$u_i = - \frac{d\Psi}{dt}$$

Ploščina je neodvisna od poti na kateri leži merilnik, temveč od razlike magnetnih potencialov med točkama 1 in 2:

$$\int_0^t u_i dt = -\mu_0 A \frac{N}{l} \int_1^2 \vec{H} d\vec{s} = \mu_0 A \frac{N}{l} (V_{m1} - V_{m2})$$

Če je polje v merjencu homogeno, je magnetna napetost:

$$\theta_{12} = V_{m1} - V_{m2} = Hd$$

- in iskana jakost magnetnega polja:

$$H = \frac{l}{\mu_0 ANd} \int_0^t u_i dt \quad \text{oz.} \quad H = \frac{l}{\mu_0 ANd} \cdot k_F y$$

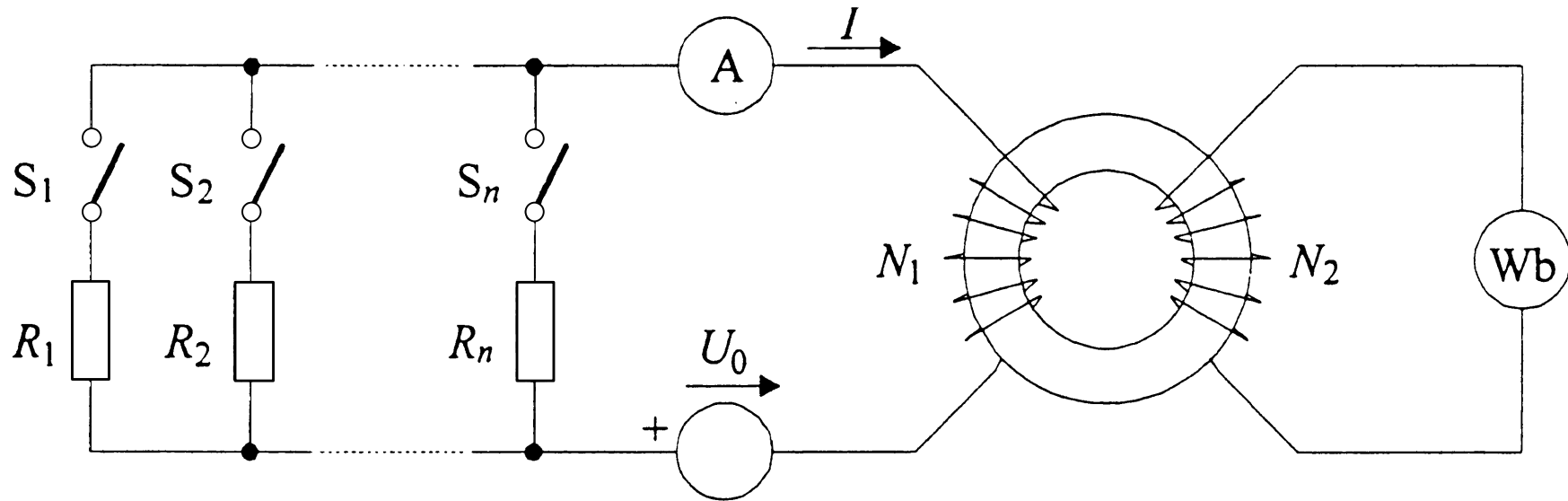


8.2 Snemanje statičnih magnetilnic



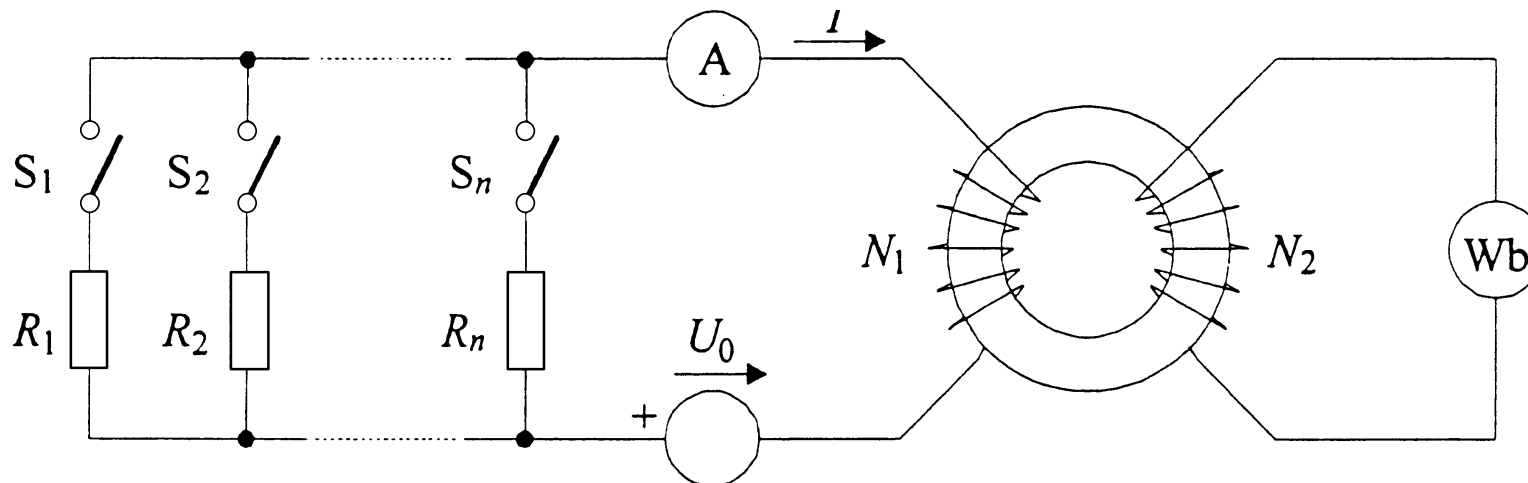
Za snemanje **deviške magnetilnice** potrebujemo:

- **enosmerni** napajalni vir,
- možnost **postopnega koračnega povečevanja** vzbujanja (preko stikal: S_1, S_2, \dots, S_n),
- meriti moramo **ploščine napetostnih impulzov** (npr. s fluksmetrom).



Slika 8.5 Snemanje krivulje prvega magnetenja





Če povečujemo tokove od nič na I_1, I_2, \dots, I_n se povečuje tudi jakost magnetnega polja: H_1, H_2, \dots, H_n : $H_k = \frac{I_k N_1}{l_{sr}}$

- samo ob vklopu stikal se inducira **napetostni impulz**:

$$u_i = -N_2 A \frac{dB}{dt}$$

- pri k-tem vklopu je **ploščina** enaka (s **fluksmetrom**):

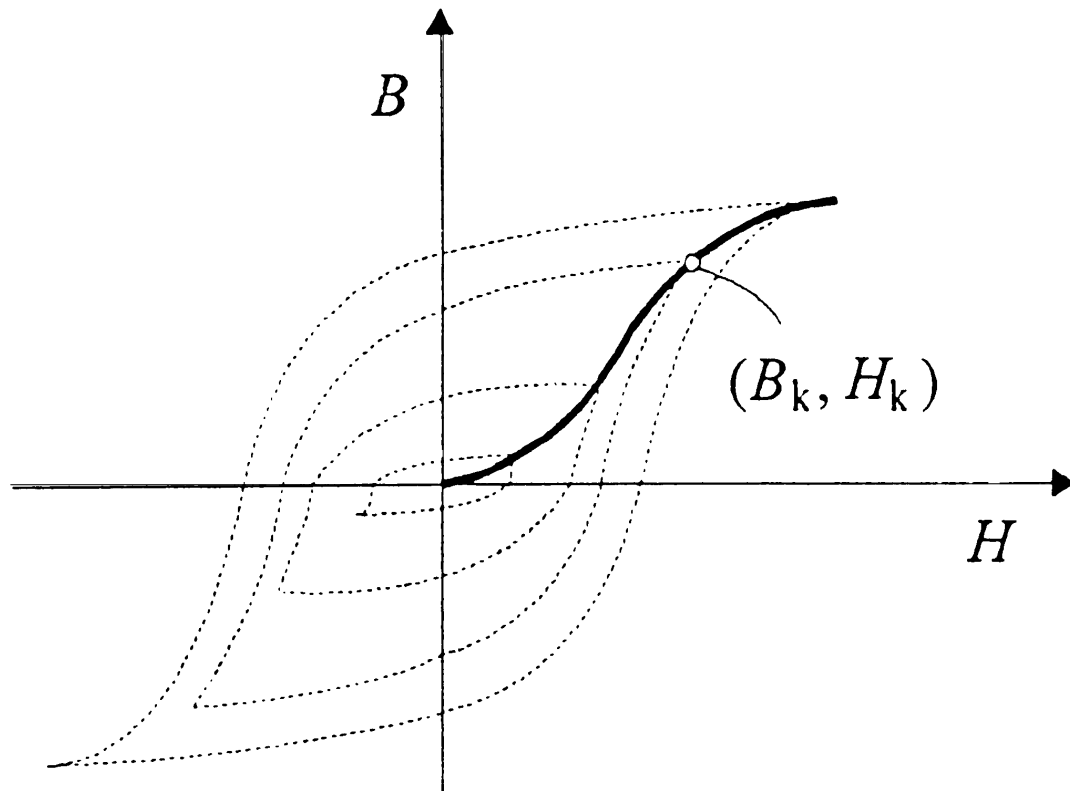
$$\int_{t(B_{k-1})}^{t(B_k)} u_i dt = -N_2 A \int_{B_{k-1}}^{B_k} dB = -N_2 A \Delta B_k \Rightarrow \Delta B_k = \frac{k_F y_k}{N_2 A}$$



Namesto **odsekovnega merjenja** celotne krivulje (pogreški se seštevajo) se pogosto uporablja **komutacijska magnetilnica**:

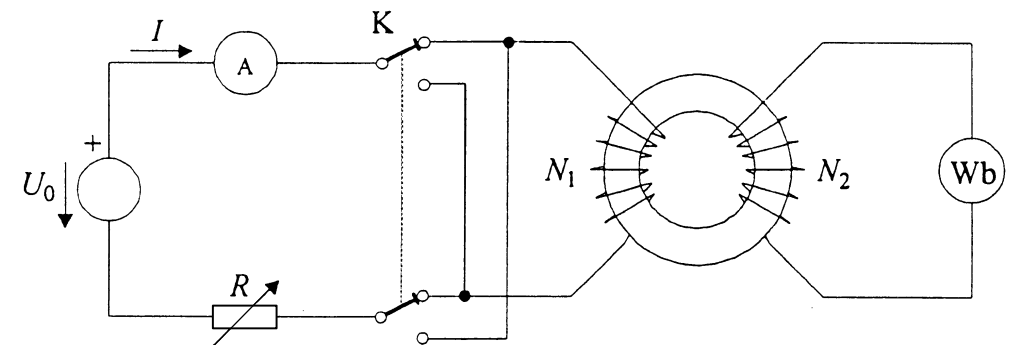


- **povezuje vrhove histereznih zank za različne stopnje magnetenja.**
- pri počasi spreminjajočem se magnetenju imamo **statično komutacijsko magnetilnico.**



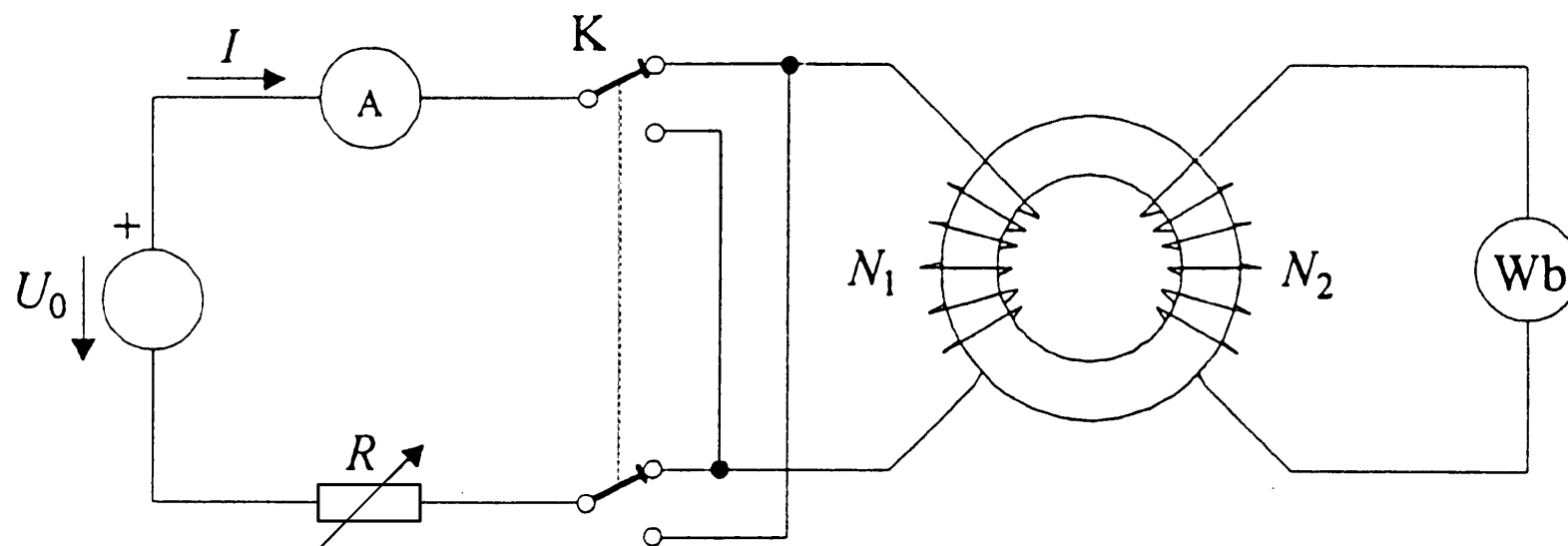
Slika 8.6 Statična komutacijska magnetilnica

Za menjavo smeri magnetenja potrebujemo **komutator**:



Slika 8.7 Snemanje statične komutacijske magnetilnice



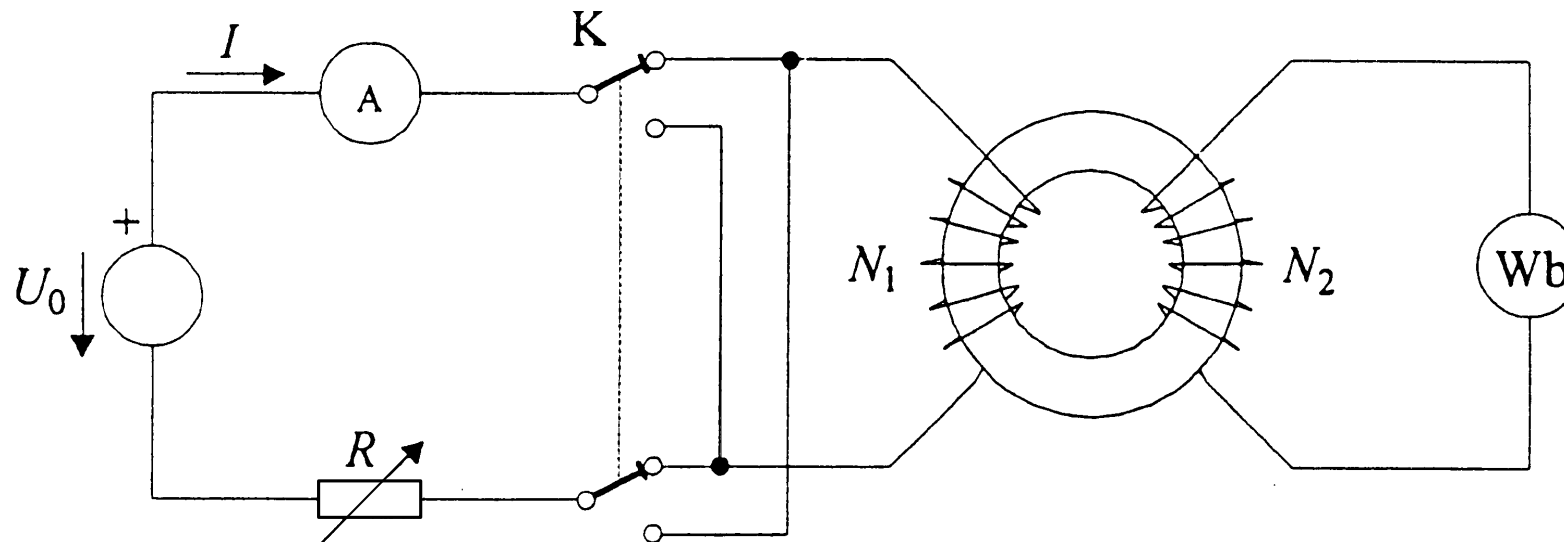


Slika 8.7 Snemanje statične komutacijske magnetilnice

Postopek snemanja statične **komutacijske** magnetilnice:

- material najprej **nevtraliziramo** (razmagnetimo),
 - material vzamemo **iz počasi pojemajočega** magnetnega polja,
- nastavimo nek **začetni tok** I_1 in dobimo točko na magnetilnici (B_1, H_1)
- **komutiramo** smer toka $\rightarrow (-B_1, -H_1)$
in **nazaj** $\rightarrow (B_1, H_1)$





Slika 8.7 Snemanje statične komutacijske magnetilnice

- ob k -tem koraku imamo :

- jakost m. polja: $H_k = \frac{I_k N_1}{l_{sr}}$,

- magnetna indukcija:

$$\int_{t(-B_k)}^{t(+B_k)} u_i dt = -N_2 A \int_{-B_k}^{B_k} dB \Rightarrow B_k = \frac{k_F y_k}{2N_2 A}$$

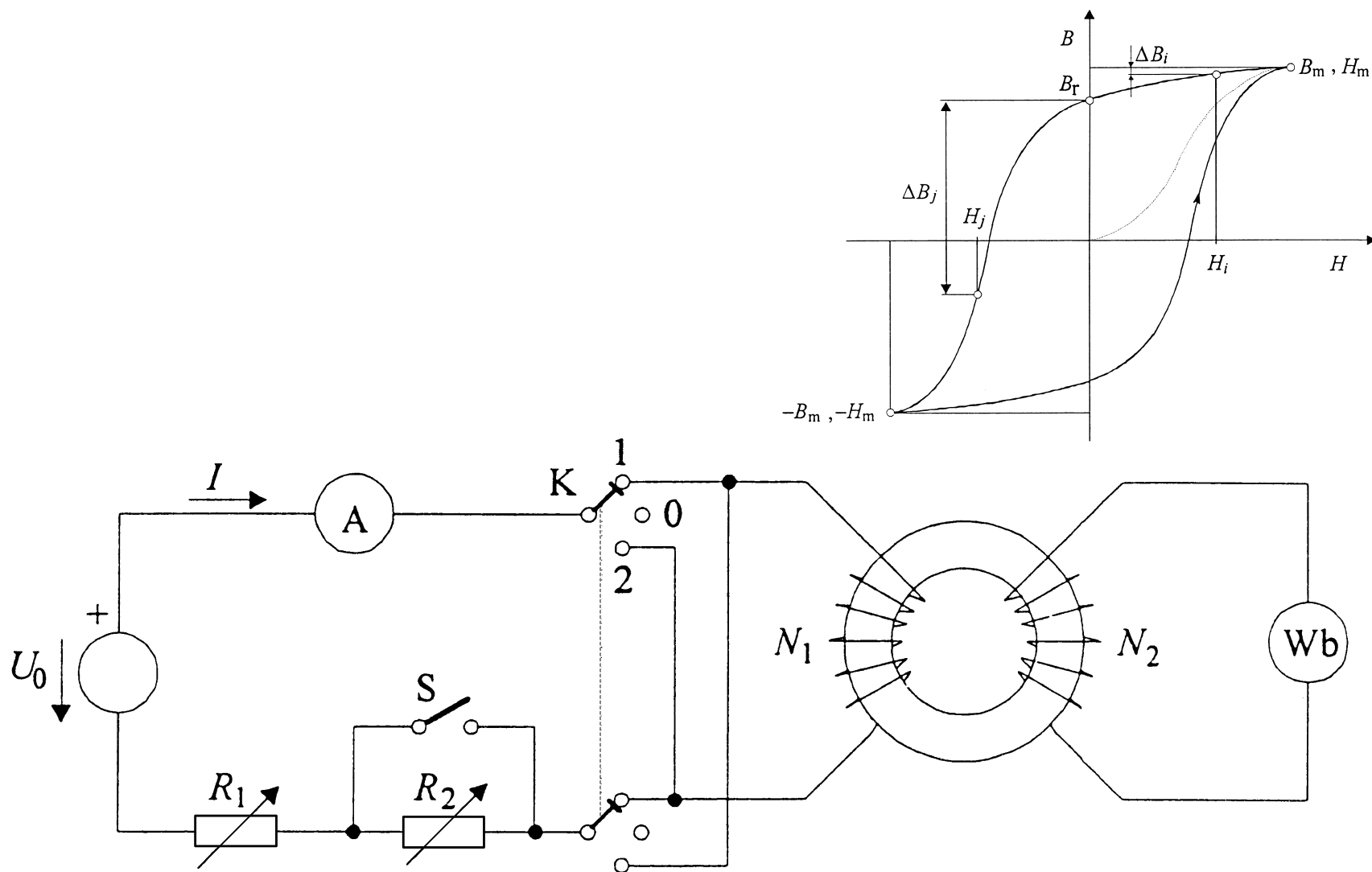
- **tok mora med meritvijo samo naraščati.**





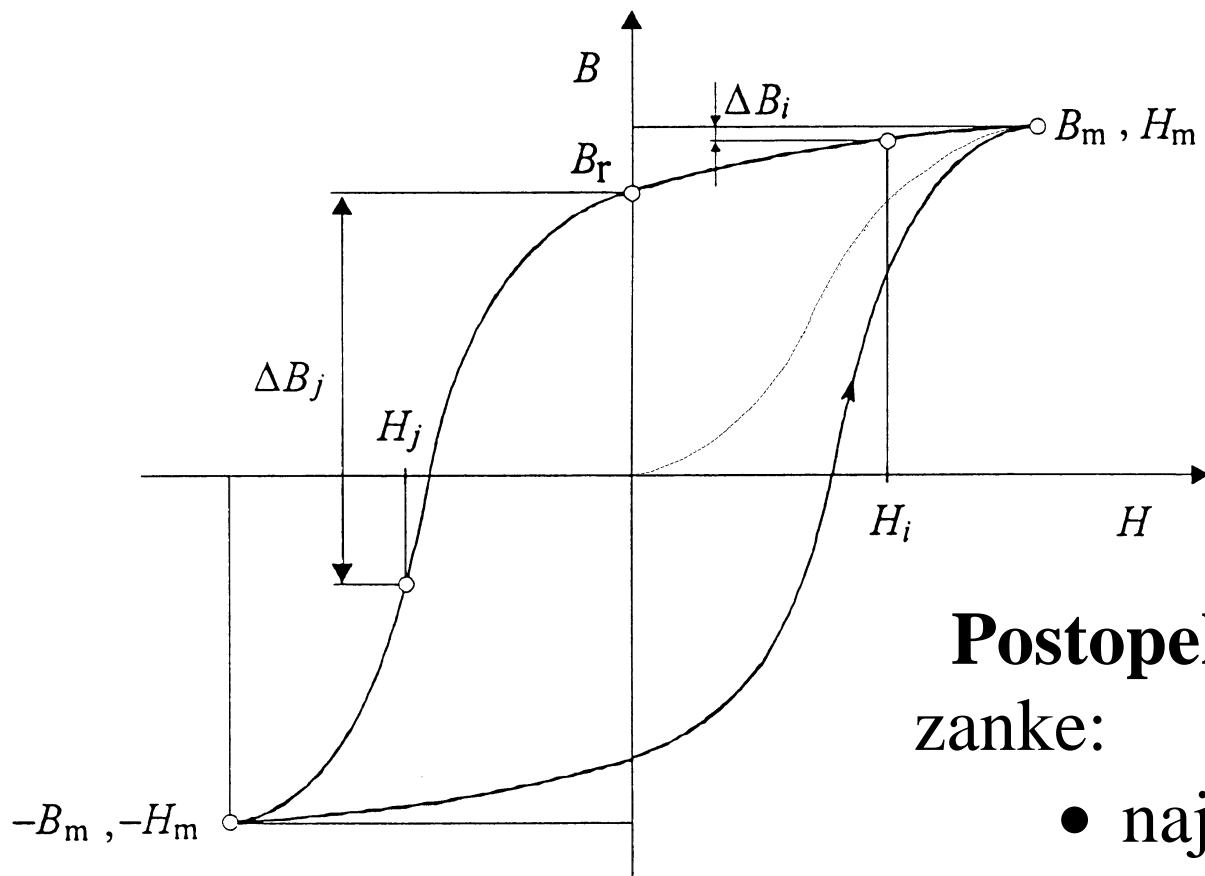
Snemanje statične histerezne zanke

Najprej nastavimo željeno zanko (npr. pri $B_m = 1,7\text{ T}$), nadaljnje meritve morajo potekati samo po izbrani histerezni zanki.



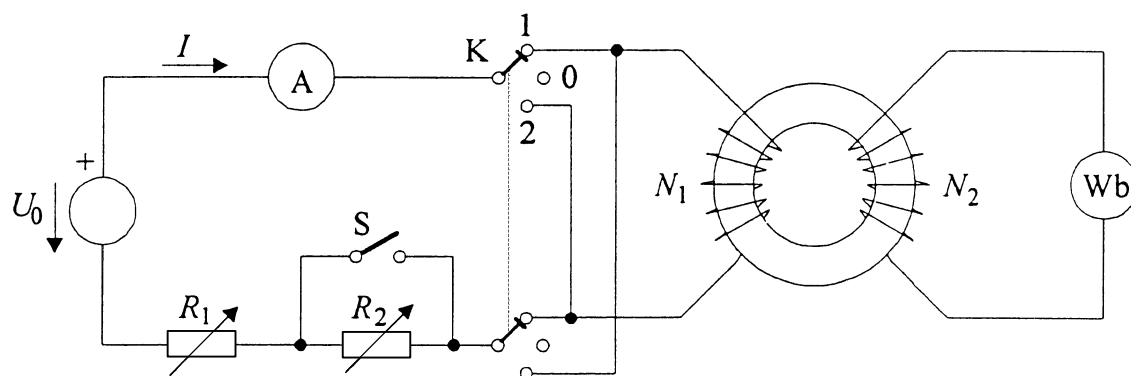
Slika 8.8 Snemanje statične histerezne zanke





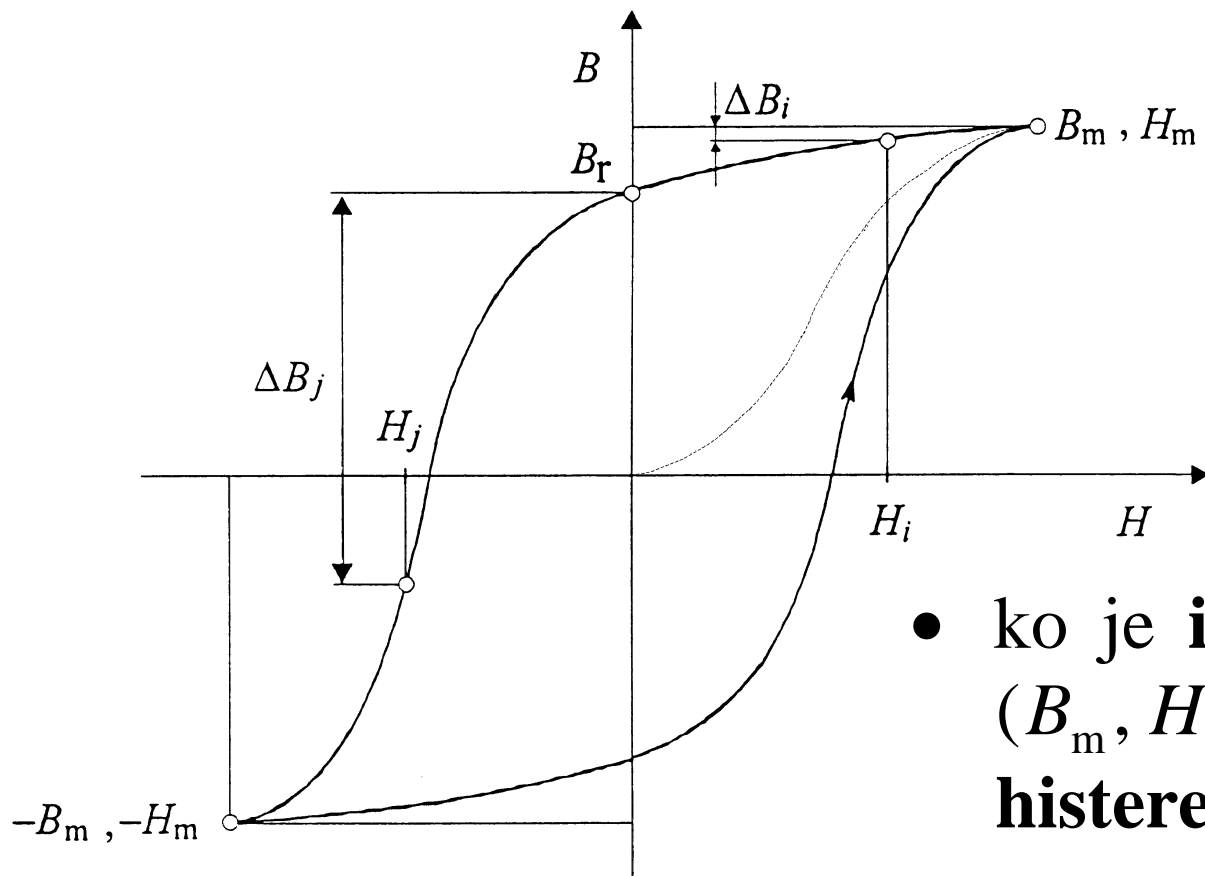
Postopek snemanja statične histerezne zanke:

- najprej nastavimo B_m
 - stikalo S je sklenjeno,
 - dvojna vrednost B_m zaradi komutiranja:



$$y_1 = \frac{2N_2 A}{k_F} B_m$$





- ko je **izhodiščno stanje** postavljeno (B_m, H_m) , začnemo snemati **točke na histerezni zanki**:

- **točke med B_m in B_r** merimo preko razlike, ko razklenemo stikalo S:

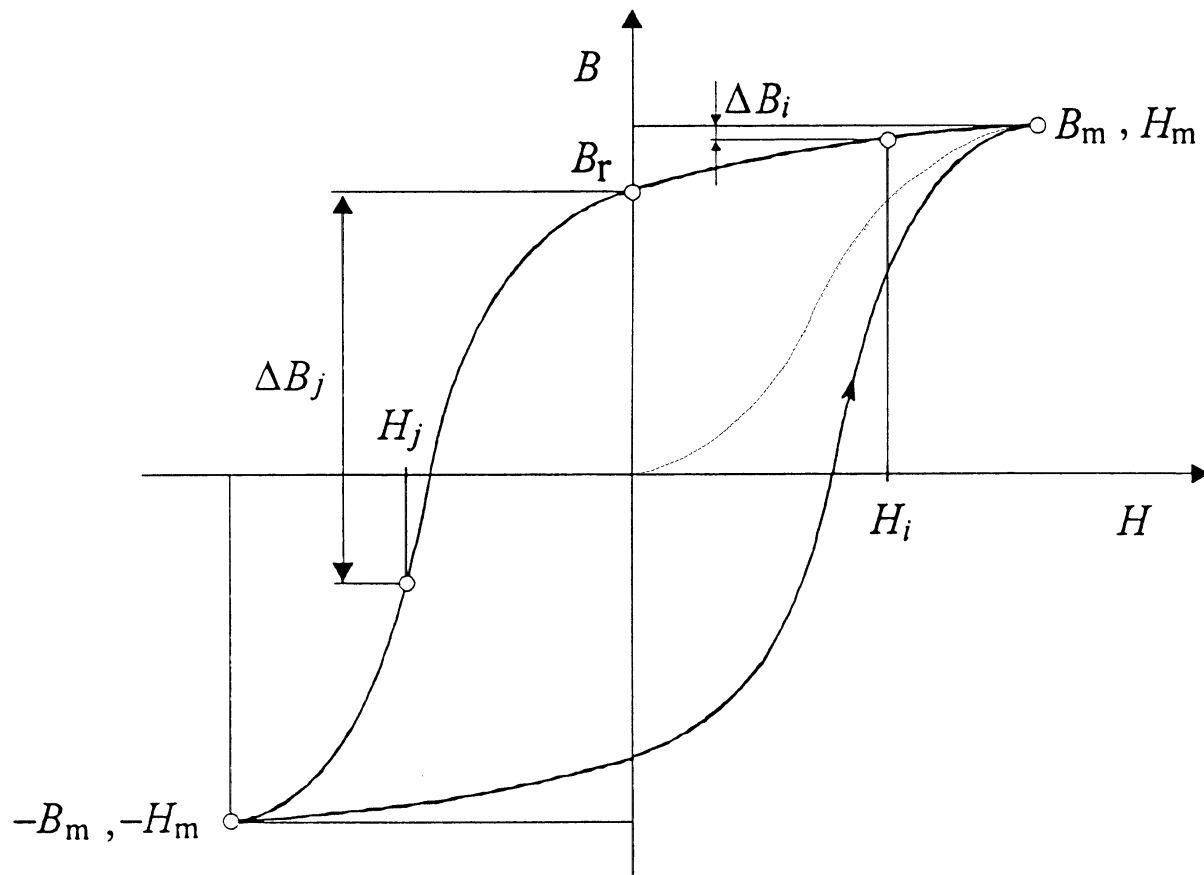
$$\Delta B_i = \frac{k_F y_i}{N_2 A} \rightarrow B_i = B_m - \Delta B_i$$

$$H_i = I_i N_1 / l_{sr}$$

- do naslednjih točk pridemo po obhodu histereze:

$$\rightarrow B_r, \rightarrow (-B_m, -H_m), \rightarrow (B_m, H_m)$$



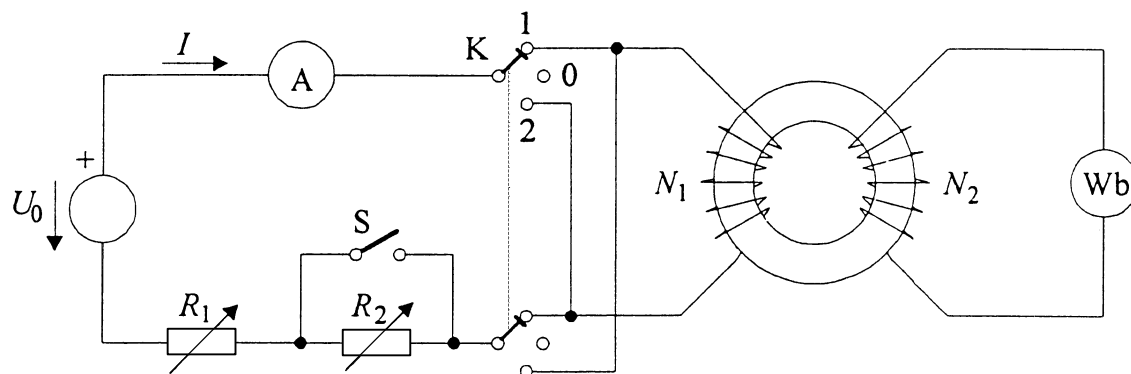


- **remanenčno indukcijo dobimo z izklopom toka:**

$$\Delta B = B_m - B_r = \frac{k_F y_r}{N_2 A} \Rightarrow$$

$$B_r = B_m - \frac{k_F y_r}{N_2 A}$$

- **točke med B_r in $(-B_m, -H_m)$ snemamo z razlikami ΔB_j pri vklapljanju toka v negativno smer:**



$$\Delta B_j = \frac{k_F y_j}{N_2 A} \rightarrow B_j = B_r - \Delta B_j$$

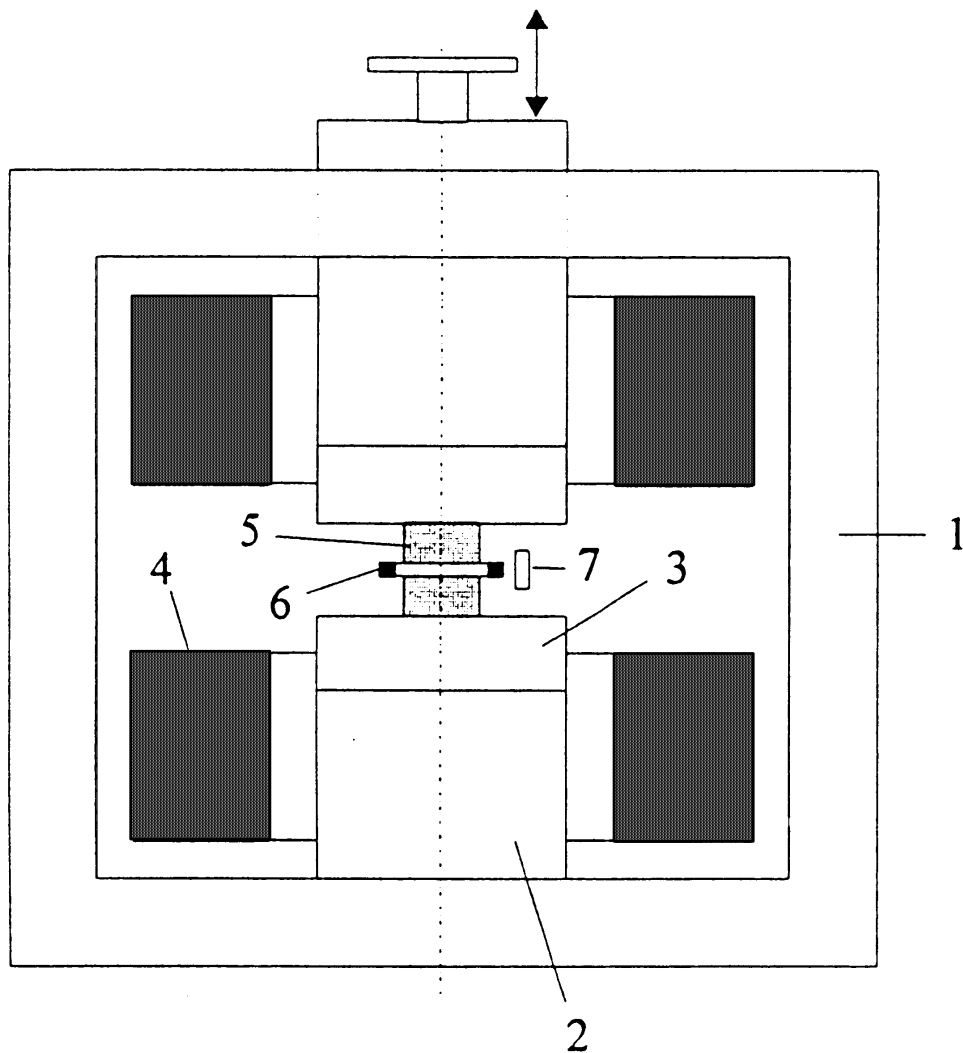
$$H_j = I_j N_1 / l_{sr}$$





Magnetni jarem (permeameter)

Pri trdomagnetnih snoveh (toroida se ne da izdelati) se uporablja magnetni jarem.



Slika 8.10 Magnetni jarem

Magnetni krog se sklenuje:

- z **jarmom** (1) iz mehkomagnetnega materiala,
- in **poloma** (2) z gibljivima nastavkoma (3).
 - **lamelirane izvedbe** za zmanjšanje vrtilnih tokov.
 - da bo **magnetenost enakomerna**, mora biti **premer polov** najmanj **dvakrat večji** kot od njune medsebojne **razdalje**.

4 – magnetilni tuljavi

5 – vzorec

6 – indukcijska tuljavica

7 – senzor za H





Magnetno indukcijo merimo z indukcijsko tuljavico:

$$u_i = -N_2 A \frac{dB}{dt} = -N_2 \frac{d}{dt} (AB)$$

- zaradi velikih jakosti (nekaj 100 kA/m), **pretok v zraku** ϕ_0 med merjencem in tuljavo **ni zanemarljiv**,
- popravljeno (korigirano) vrednost B_{kor} dobimo:

$$u_i = -N_2 \frac{d}{dt} [AB_{\text{kor}} + (A_t - A)\mu_0 H]$$

$$\blacksquare AB = AB_{\text{kor}} + (A_t - A)\mu_0 H$$

$$B_{\text{kor}} = B - \mu_0 H \frac{A_t - A}{A}$$





Jakost magnetne indukcije merimo:

- s parom v **protistik vezanih tuljavic**,
 - zajamemo samo m. pretok v merjencu,
- z merilnikom **magnetene napetosti**,
 - tuljavica Rogowskega oz. Chattock tuljavica
- s Hallovo sondo.

Postopek snemanja magnetilne krivulje je enak postopku snemanja **statične histerezne zanke**.

Če je **senzor za H par tuljavic** (z $N_H A_H$) dobimo **ob komutaciji**: $u_H = -N_H A_H \mu_0 \frac{dH}{dt}$

- ploščina impulza in H :

$$\int_0^t u_H dt = -N_H A_H \mu_0 \int_0^{H_j} dH = -N_H A_H \mu_0 H_j \rightarrow H_j = \frac{k_F y_H}{\mu_0 N_H A_H}$$





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.**



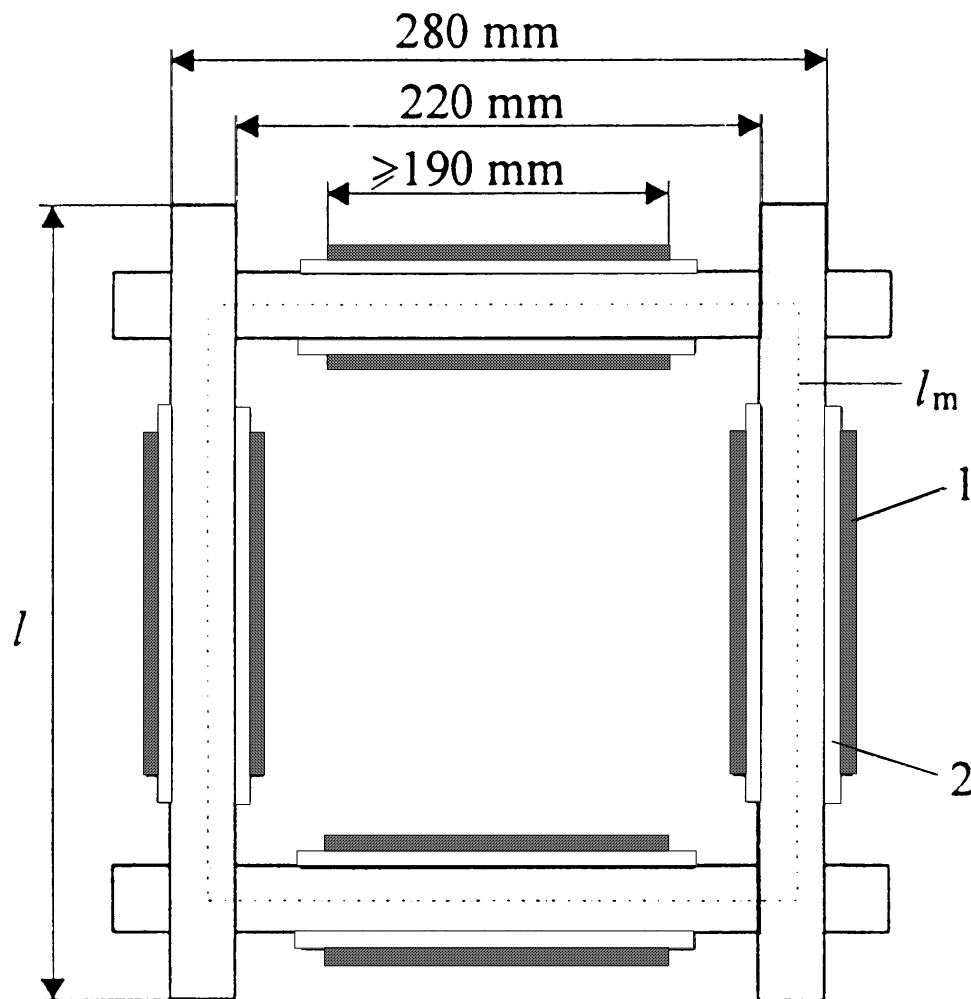


Pomembna je vrsta magnetnega polja:

- 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.



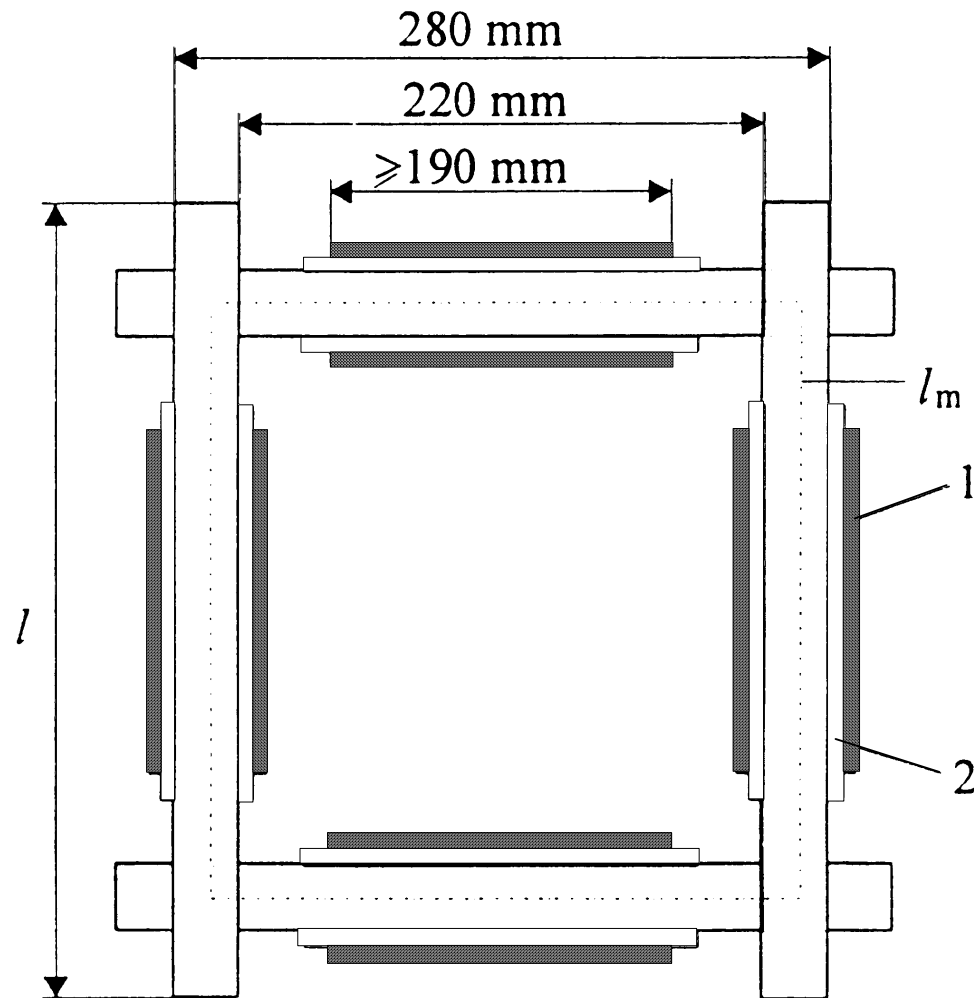
Za preizkušanje feromagnetne pločevine se uporablja (mali) Epsteinov aparat.



Slika 8.11 Mali Epsteinov aparat

- Magnetni krog se sklada po magnetnih trakovih, ki jih zložimo z dvojnimi prekrivanjem.
 - srednja dolžina silnice:
 $l_m = 0,94 \text{ m}$
- Vzbuja 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).





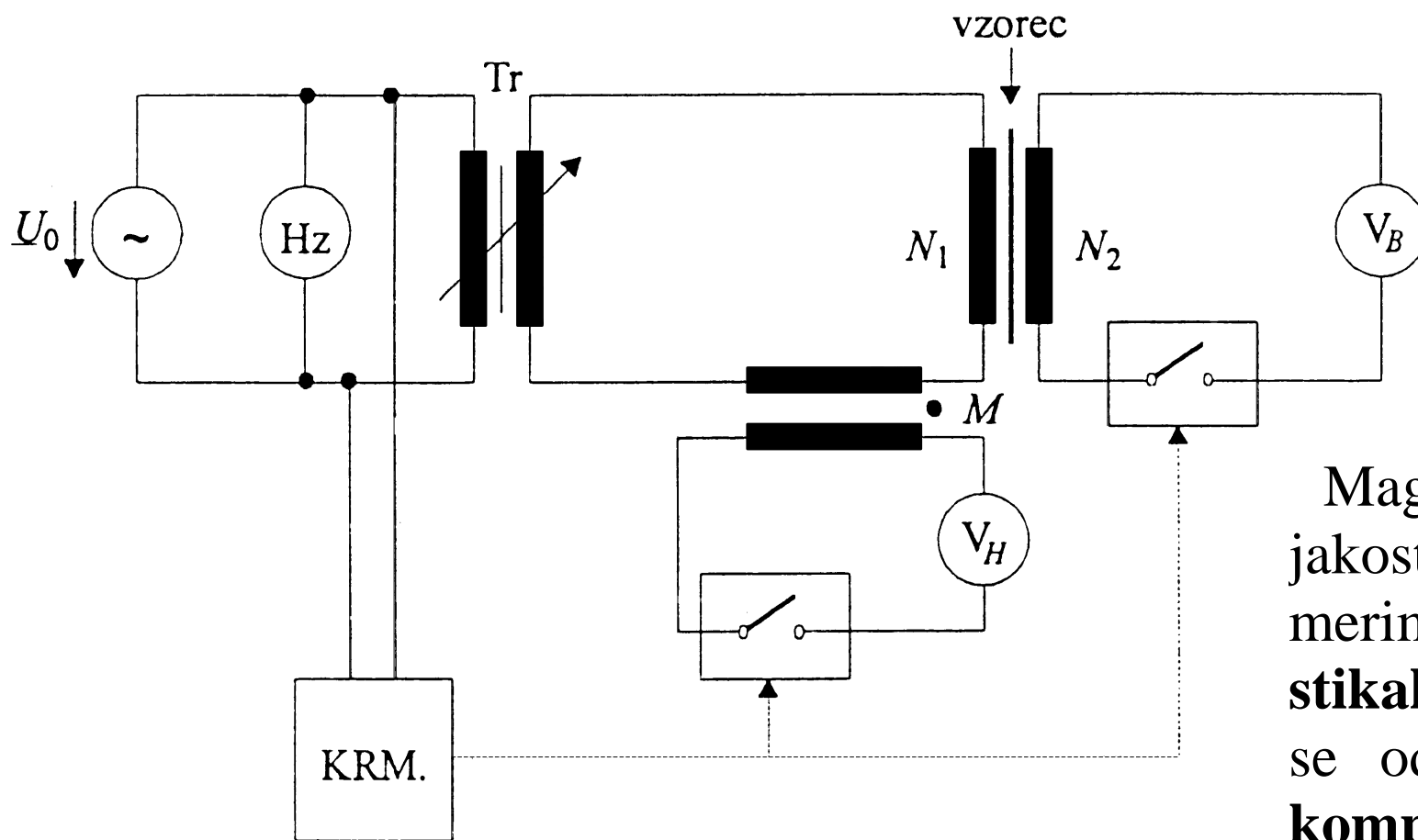
Za merjenje magnetne polarizacije v merjencu J potrebujemo **kompensacijo** magnetnega pretoka v vzorcu,

- 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 8.12 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,
 - ρ_m -gostota feromagnetika





Jakost magnetnega polja določimo preko magnetilnega toka:

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

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

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

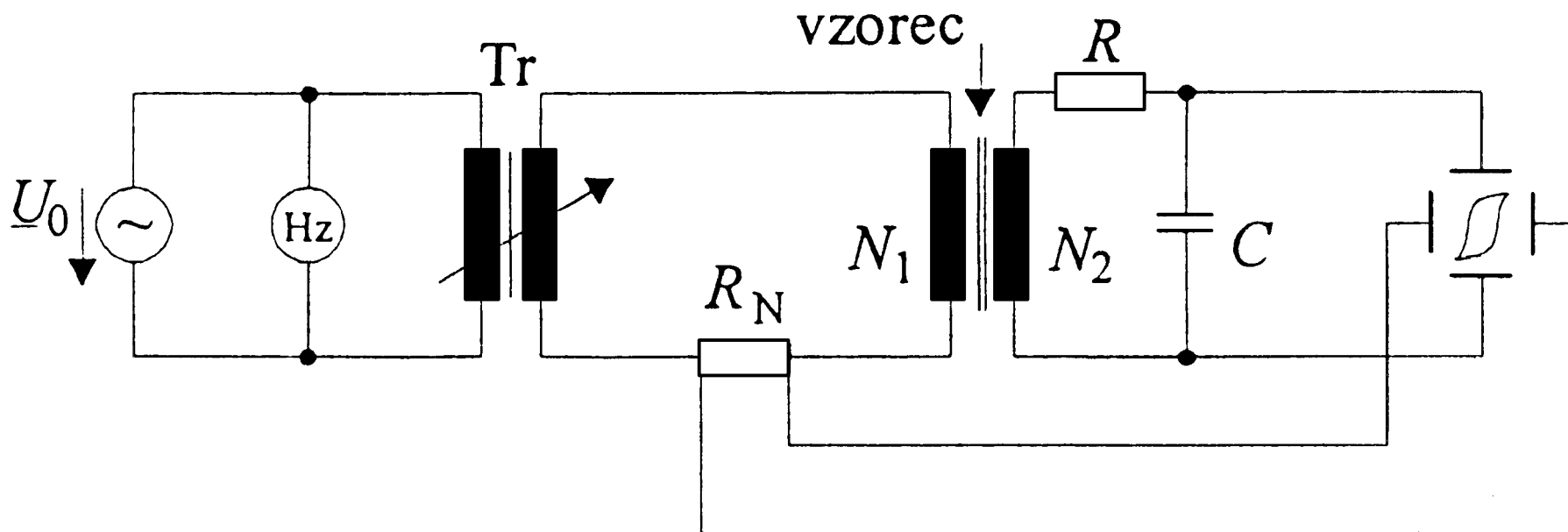
S krmilnim vezje **določimo trenutek vklopa** znotraj periode:

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





Opazovanje histerezne zanke z osciloskopom

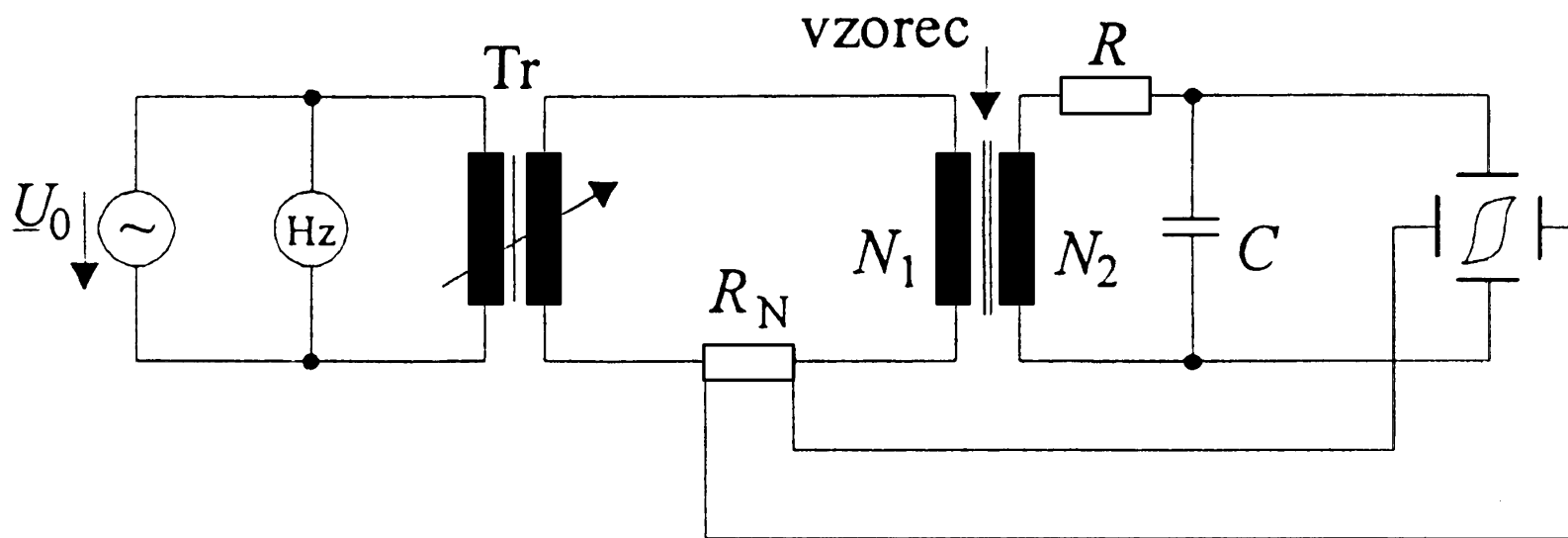


Slika 8.13 Opazovanje histerezne zanke z osciloskopom

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:

$$u_C = \frac{1}{C} \int i dt \approx \frac{1}{C} \int \frac{u_i}{R} dt \quad \text{in} \quad u_i = -N_2 A \frac{dB}{dt}$$

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

S transformatorjem \mathbf{Tr} lahko nastavimo **različno velike** histerezne zanke.

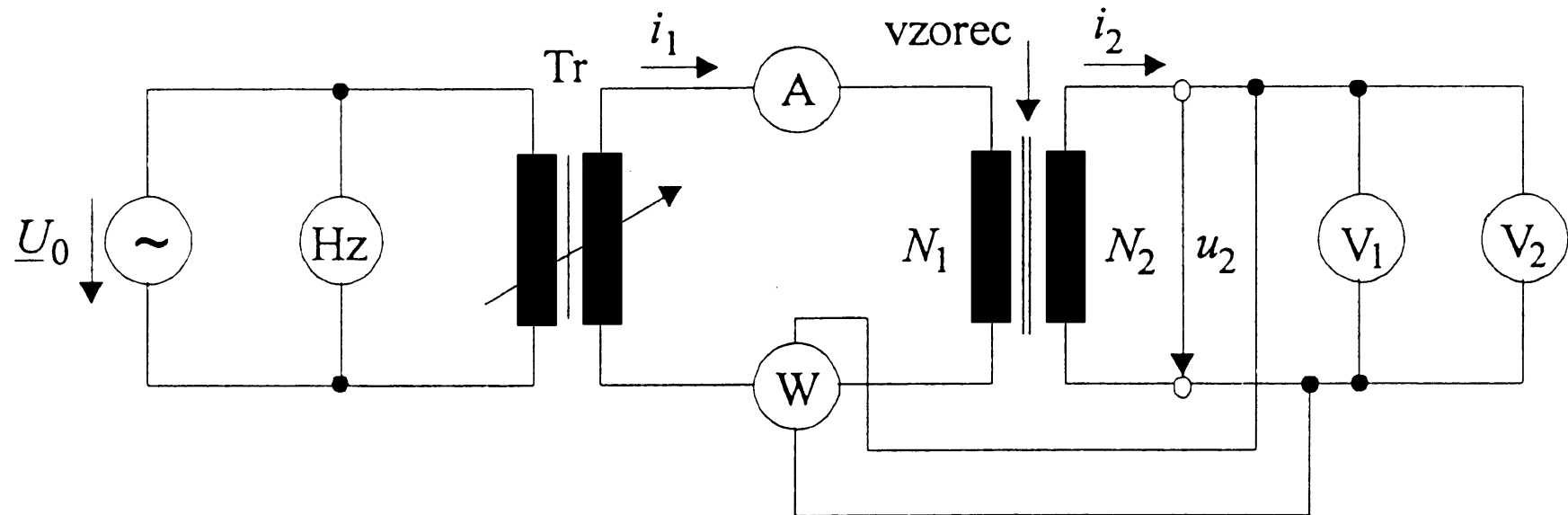
- Če povežemo vrhove zank dobimo **dinamično komutacijsko magnetilnico**.



Specifične izgube



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

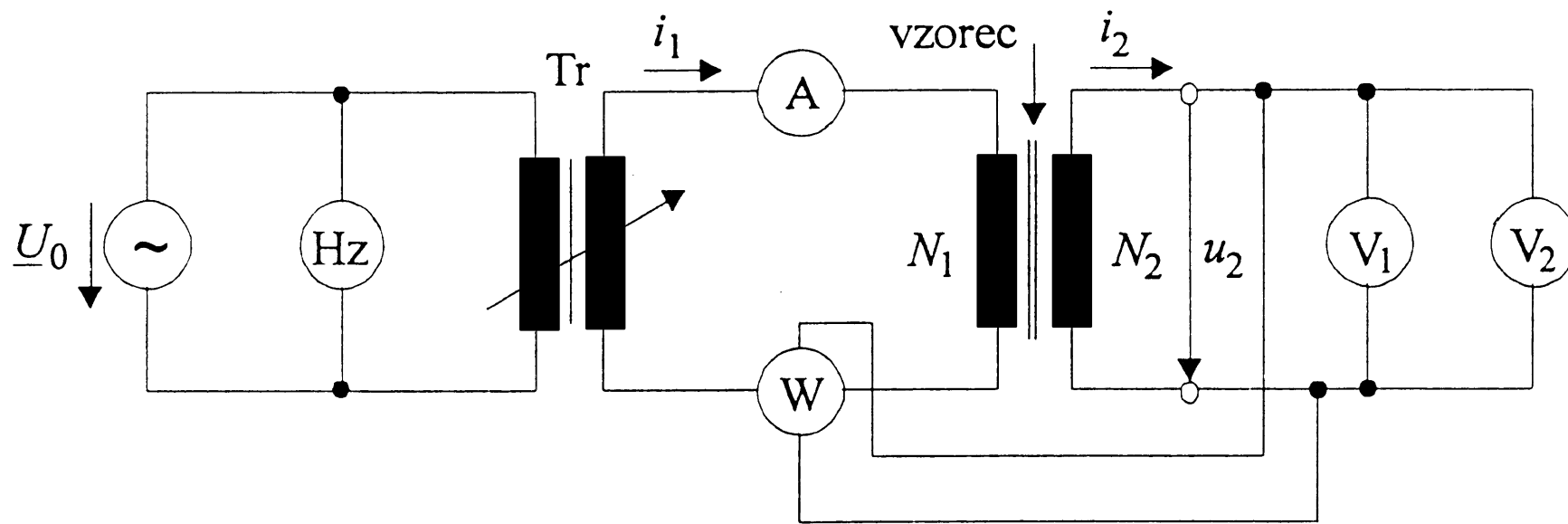


Slika 8.14 Merjenje izgub z vatmetrom

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 15 Hz do 100 Hz.





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

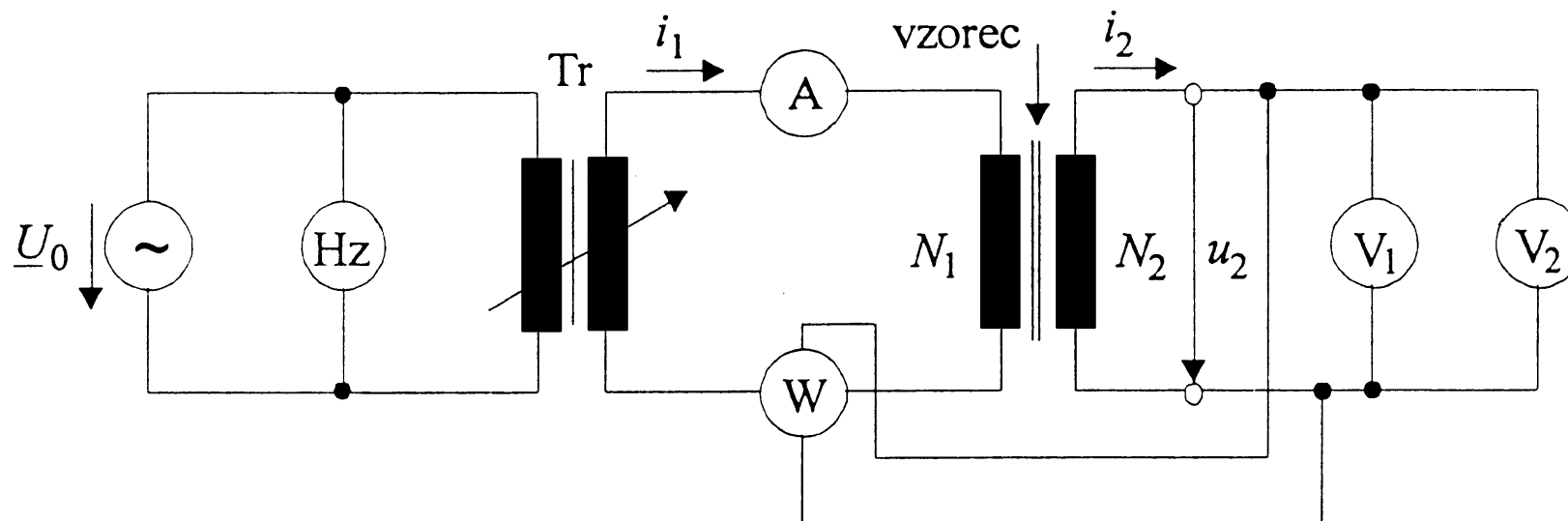
- **izognemo** se padcu napetosti na magnetilnem navitju,
- z V_1 (odziva se na usmerjeno vrednost) **nadziramo** **maksimalno vrednost** B_m ,

$$B_m = \frac{U_1}{4F_0 f N_2 A} \frac{R_i + R_{t2}}{R_i}$$

R_i - vzporedna vezava vseh treh instrumentov

R_{t2} - upornost navitja





- z V_2 (odziva se na **efektivno vrednost**) **nadziramo** porabo na sekundarju.
- lahko določimo **oblikovni faktor** za popravek izgub:

Vatmeter kaže:
$$P_W = \frac{1}{T} \int_0^T u_2 i_1 dt$$

$$F = \frac{U}{U_r} = F_0 \frac{U_2}{U_1}$$

- ker je $i_1 = i_2 + i_0$ (i_0 - magnetilni tok), zapišemo:

$$P_W = \frac{1}{T} \int_0^T u_2 \left(i_0 + i_2 \frac{N_2}{N_1} \right) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u_2 i_0 dt + \frac{N_2}{N_1} \frac{1}{T} \int_0^T u_2 i_2 dt$$





$$P_W = \frac{1}{T} \int_0^T u_2 \left(i_0 + i_2 \frac{N_2}{N_1} \right) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u_2 i_0 dt + \frac{N_2}{N_1} \frac{1}{T} \int_0^T u_2 i_2 dt$$

Če upoštevamo:

$$u_2 = u_{i2} \frac{R_i}{R_i + R_{t2}}, \quad \frac{1}{R_i} = \frac{1}{R_{Wn}} + \frac{1}{R_{V1}} + \frac{1}{R_{V2}}, \quad u_{i2} = u_{i1} \frac{N_2}{N_1}$$

- dobimo za **prvi člen**:

$$\frac{1}{T} \int_0^T u_2 i_0 dt = \frac{N_2}{N_1} \frac{R_i}{R_i + R_{t2}} \frac{1}{T} \int_0^T u_{i1} i_0 dt = \frac{N_2}{N_1} \frac{R_i}{R_i + R_{t2}} P_c$$

$$P_c - \text{celotne izgube, ker je: } u_{i1} = N_1 A \frac{dB}{dt}, \quad i_0 = \frac{H l_m}{N_1}$$

$$P_c = \frac{1}{T} \int_0^T u_{i1} i_0 dt = f l_m A \oint H dB = m_a \frac{f}{\rho} \oint H dB$$

$$m_a = l_m A \rho = m \frac{l_m}{4l} - \text{efektivna masa vzorca}$$





$$P_W = \frac{1}{T} \int_0^T u_2 \left(i_0 + i_2 \frac{N_2}{N_1} \right) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u_2 i_0 dt + \frac{N_2}{N_1} \frac{1}{T} \int_0^T u_2 i_2 dt$$

- za drugi člen:

$$\frac{N_2}{N_1} \frac{1}{T} \int_0^T u_2 i_2 dt = \frac{N_2}{N_1} \frac{1}{R_i} \frac{1}{T} \int_0^T u_2^2 dt = \frac{N_2}{N_1} \frac{U_2^2}{R_i}$$

Moč, ki jo kaže vatmeter ($N_1 = N_2 = 700$): $P_W = P_c + \frac{U_2^2}{R_i}$

Celotne izgube feromagnetne pločevine so:

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

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





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

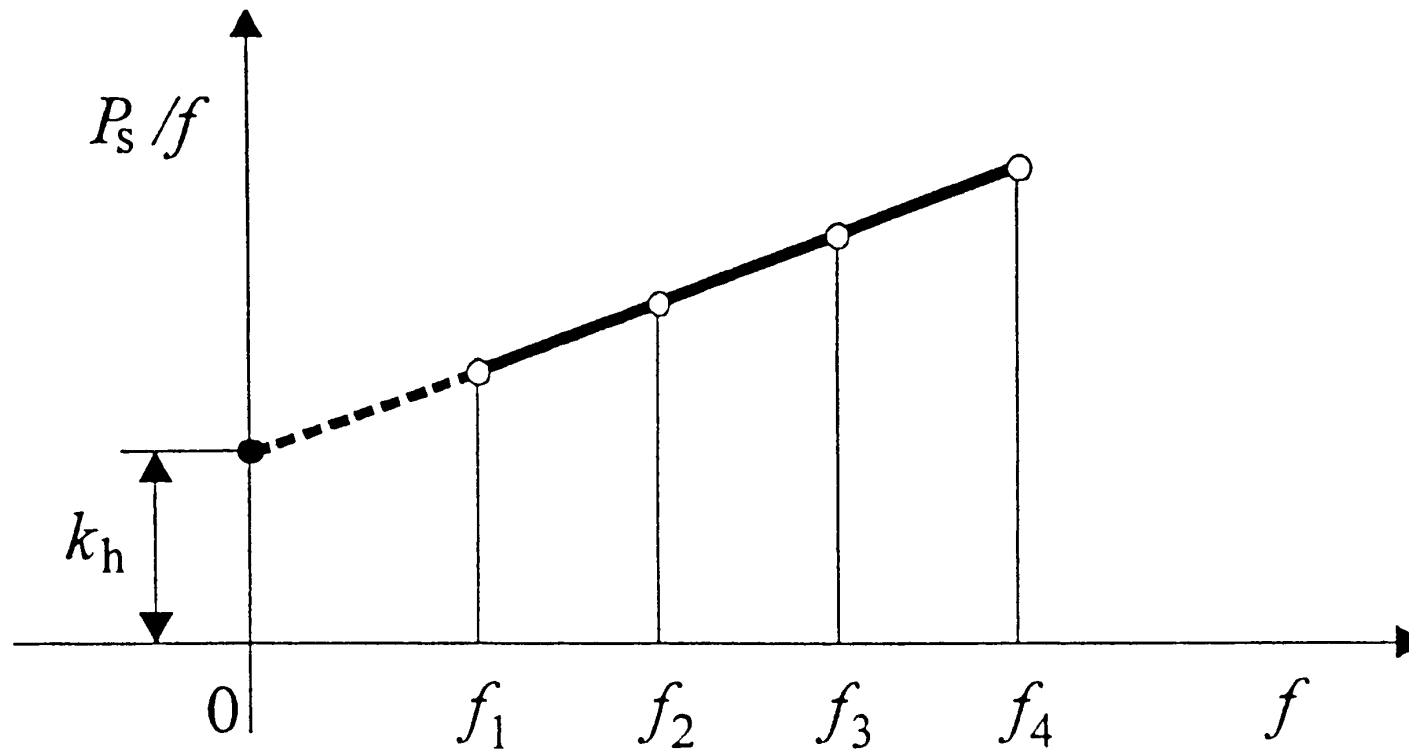




P_s ločimo na P_h in P_e :

- s frekvenco (pri f_1 in $f_2 \rightarrow P_h(f), P_e(f^2)$)

$$P_s = k_h f + k_e f^2 \rightarrow k_h = P_s / f - k_e f$$



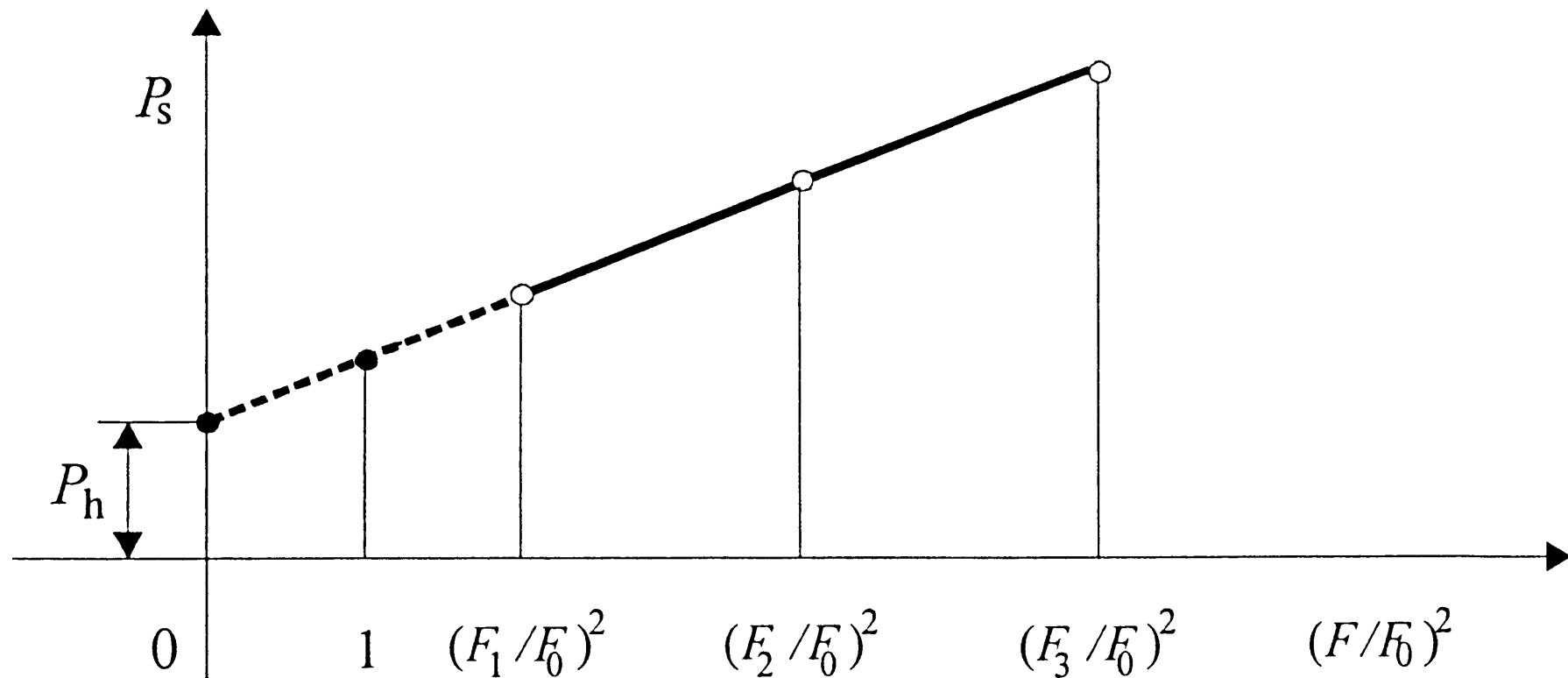
Slika 8.15 Postopek ločevanja izgub z različnimi frekvencami





- s faktorjem oblike (pri F_1 in $F_2 \rightarrow P_e(F^2)$)

$$P_s = P_h + c(F/F_0)^2$$



Slika 8.16 Postopek ločevanja izgub z različnimi oblikovnimi faktorji

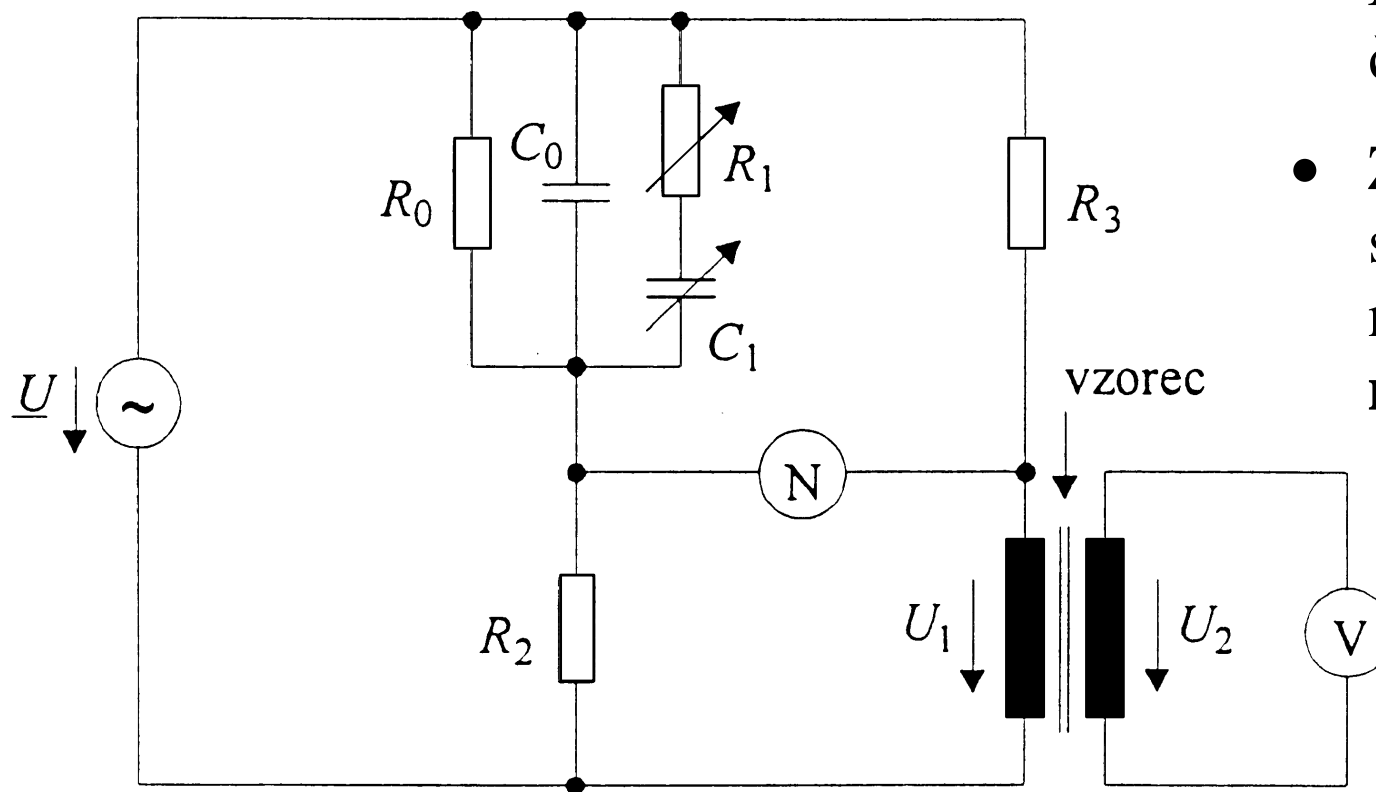




Merjenje pri nizki magnetni indukciji

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

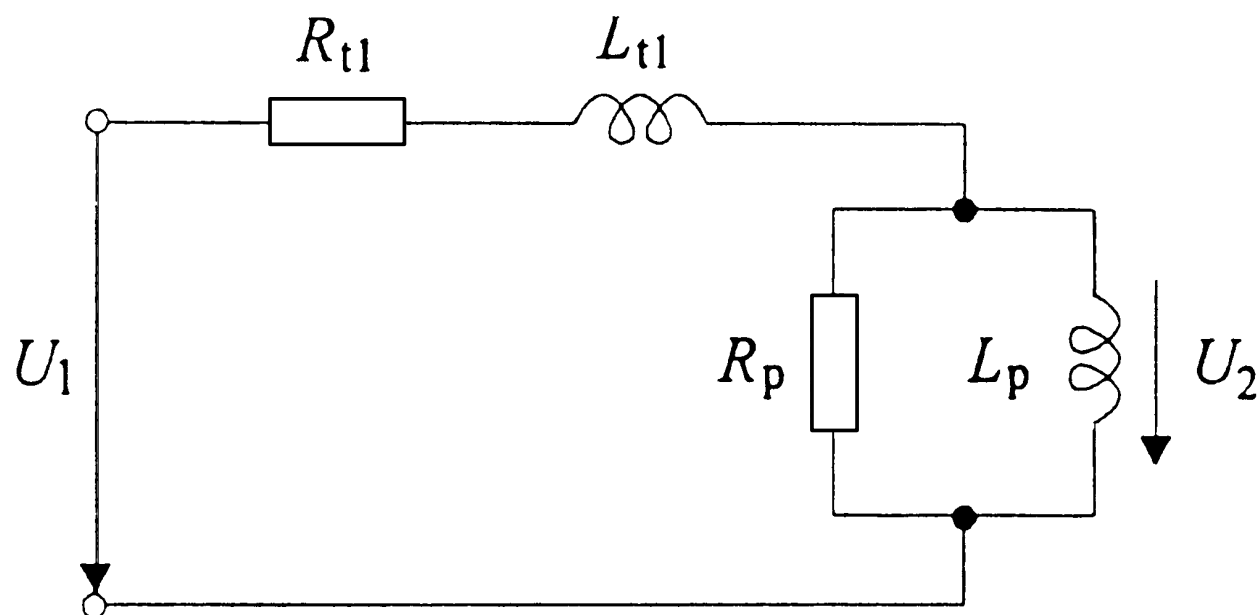
Modificirani Hayev mostič



- 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 8.17 Modificirani Hayev mostič

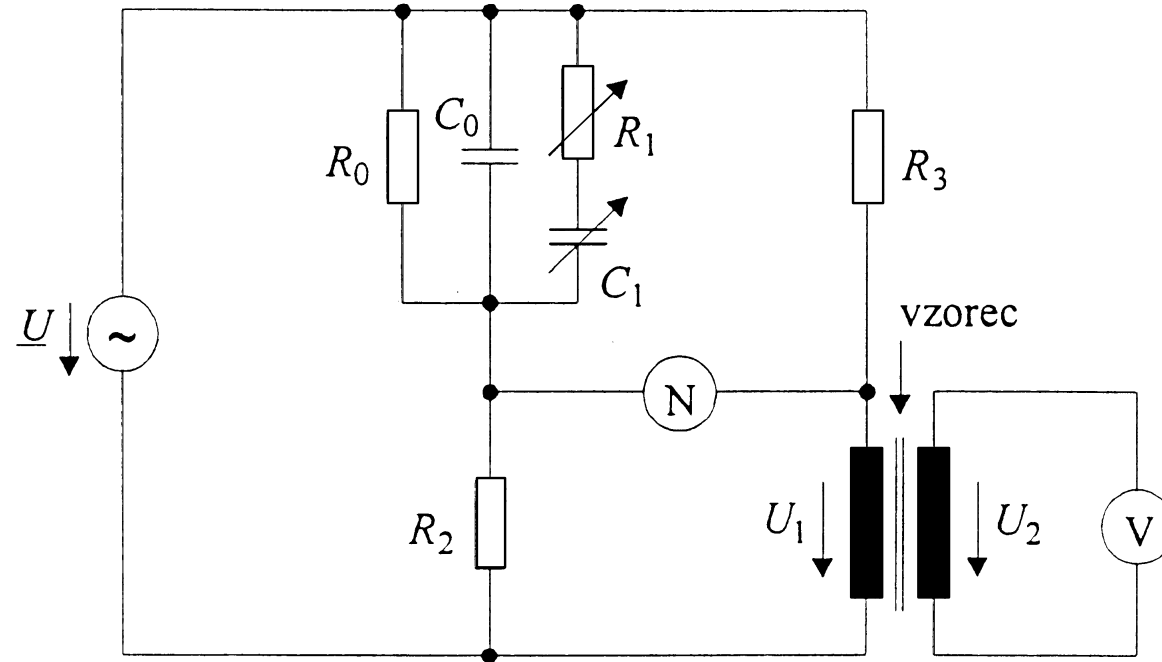




Slika 8.18 Nadomestno vezje za Epsteinov aparat

- 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 **uravnesimo brez vzorca** z elementoma R_0 in C_0 :

$$\underline{Y}_1 = \frac{1}{R_0} + j\omega C_0, \quad \underline{Z}_3 = R_3$$

$$\underline{Z}_2 = R_2, \quad \underline{Z}_4 = R_{t1} + j\omega L_{t1}$$

- v ravnovesju: $\left(\frac{1}{R_0} + j\omega C_0 \right) R_2 R_3 = R_{t1} + j\omega L_{t1}$





Nato **vložimo vzorec** v Epsteinov aparat in **uravnovesimo z R_1**

in C_1 :

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

- ravnovesje:

$$\left(\frac{1}{R_0} + j\omega C_0 + \frac{1}{R_1 + 1/j\omega C_1} \right) R_2 R_3 = \left(R_{t1} + j\omega L_{t1} + \frac{1}{1/R_p + 1/j\omega L_p} \right)$$

- z upoštevanjem $\left(\frac{1}{R_0} + j\omega C_0 \right) R_2 R_3 = R_{t1} + j\omega L_{t1}$ dobimo:

$$\frac{R_2 R_3}{R_1 + 1/j\omega C_1} = \frac{1}{1/R_p + 1/j\omega L_p}, \quad R_p = \frac{R_2 R_3}{R_1}, \quad L_p = R_2 R_3 C_1$$





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

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

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

