

7.6 Merjenje kapacitivnosti

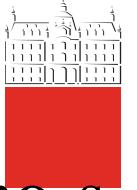
Kapacitivnost (idealnega) kondenzatorja je **razmerje** med **tokom** in časovnim **odvodom napetosti**.

- Meritve izvajamo **pri sinusni obliki** toka
- ali preko **praznenja** (polnenja) kondenzatorja.

Realni kondenzator je poenostavljen sestavljen iz:

- **idealnega kondenzatorja** in
- **upora**
 - ponazarja **izgube v dielektriku**.





Pri serijskem nadomestnem vezju lahko **izgube** ponazorimo s **tangensom izgubnega kota δ** :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{IR_s}{I(1/\omega C_s)} = \omega R_s C_s$$

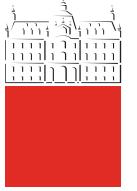
Pri **paralelnem** nadomestnem vezju je **tangens izgubnega kota δ** enak razmerju tokov I_{R_p}/I_{C_p} :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U/R_p}{U/(1/\omega C_p)} = \frac{1}{\omega R_p C_p}$$

Če napetost in tok **nista sinusne oblike**, izražamo izgube s faktorjem **izgub d** (faktor disipacije) preko moči:

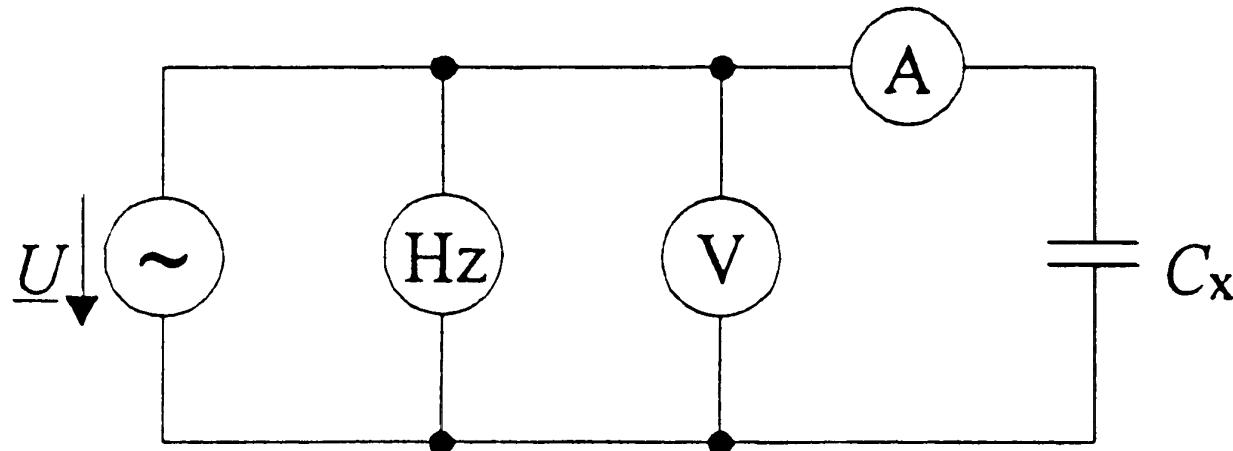
$$d = \frac{P}{\sqrt{S^2 - P^2}} \quad - \text{ splošna oblika!}$$





U-I metoda merjenja kapacitivnosti

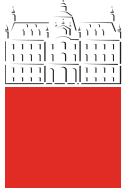
- uporabna v **nizkofrekvenčnem** območju,
- manjša točnost.



Slika 7.48 *U-I* metoda merjenja kapacitivnosti

Razmerje napetosti in toka je:

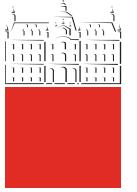
$$\frac{U}{I} = Z = \sqrt{R^2 + 1/(\omega C_x)^2} = \frac{1}{\omega C_x} \sqrt{1+d^2} \approx \frac{1}{\omega C_x}$$



$$\frac{U}{I} = Z = \sqrt{R^2 + 1/(\omega C_x)^2} = \frac{1}{\omega C_x} \sqrt{1+d^2} \approx \frac{1}{\omega C_x}$$

- če **zanemarimo** izgube dobimo samo **jalovo** upornost
- iskana kapacitivnost je: $C_x = \frac{I}{\omega U}$
 - **padec na ampermetru ni tako pomemben** (ga zanemarimo), ker imamo **zamik** za 90° .
 - primer: $U_C = 10 \text{ V}$
 $U_A = 0,3 \text{ V} \Rightarrow U_V = 10,004 \text{ V}$





Merjeni veličini morata biti **sinusne oblike**!

- **Pogrešek pri dodani tretji harmonski komponenti:**

$$u = \hat{u}_1 \sin \omega t + \hat{u}_3 \sin 3\omega t$$

- tok skozi kondenzator C :

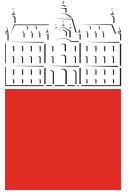
$$i = C \frac{du}{dt} = \omega C \hat{u}_1 \cos \omega t + 3\omega C \hat{u}_3 \cos 3\omega t$$

- če se instrumenta **odzivata na efektivno vrednost**, kažeta:

$$U = \sqrt{\left(\frac{\hat{u}_1}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{\hat{u}_3}{\sqrt{2}}\right)^2}$$

$$I = \sqrt{\left(\frac{\omega C \hat{u}_1}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{3\omega C \hat{u}_3}{\sqrt{2}}\right)^2}$$





$$U = \sqrt{\left(\frac{\hat{u}_1}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{\hat{u}_3}{\sqrt{2}}\right)^2} \quad I = \sqrt{\left(\frac{\omega C \hat{u}_1}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{3\omega C \hat{u}_3}{\sqrt{2}}\right)^2}$$

Razmerje U/I je odvisno od višjih harmonskih k.:

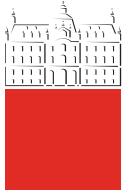
$$\frac{U}{I} = \frac{1}{\omega C} \sqrt{\frac{1 + (\hat{u}_3/\hat{u}_1)^2}{1 + (3\hat{u}_3/\hat{u}_1)^2}}$$

- **računana kapacitivnost** $C_x = \frac{I}{\omega U}$ je prevelika:
 $\hat{u}_3/\hat{u}_1 = 5\% \Rightarrow e = +1\%$
- če se instrumenta **odzivata na usmerjeno vrednost**, kažeta:

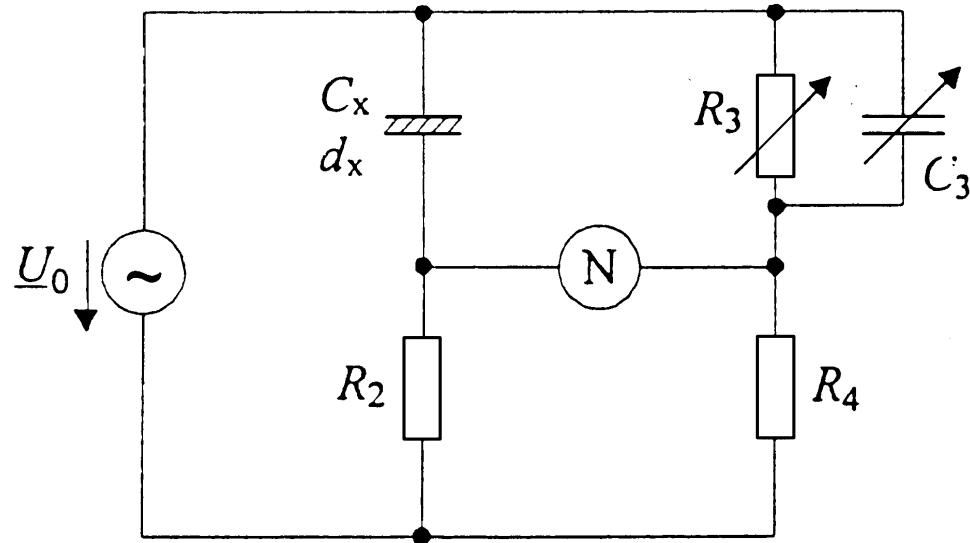
$$U_r = \frac{U_v}{1,11} = \frac{2}{\pi} \left(\hat{u}_1 + \frac{1}{3} \hat{u}_3 \right), \quad I_r = \frac{I_A}{1,11} = \omega C \frac{2}{\pi} (\hat{u}_1 - \hat{u}_3)$$
$$\hat{u}_3/\hat{u}_1 = 5\% \Rightarrow e = -7\%$$

Merilno **točnost** $U-I$ metode **povečamo** s substitucijo etalona kapacitivnosti.

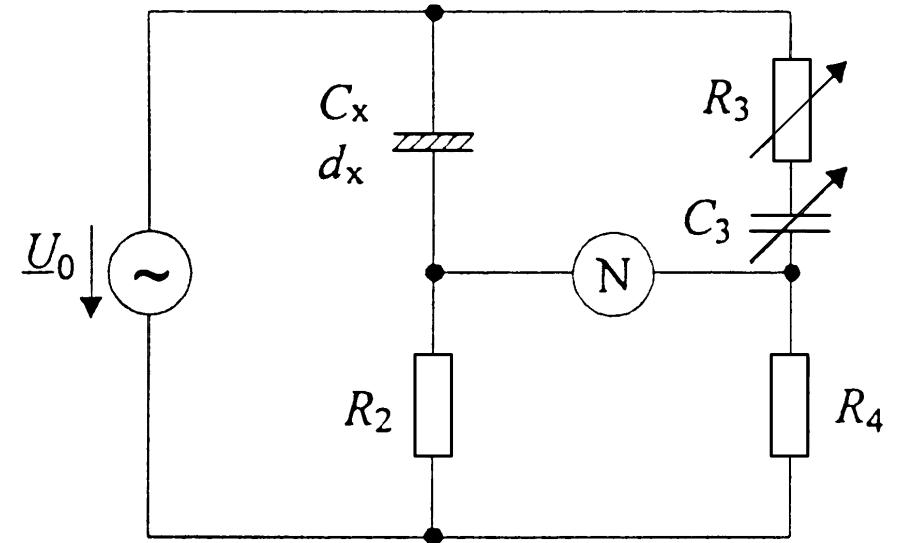




Kapacitivni mostič



a)



b)

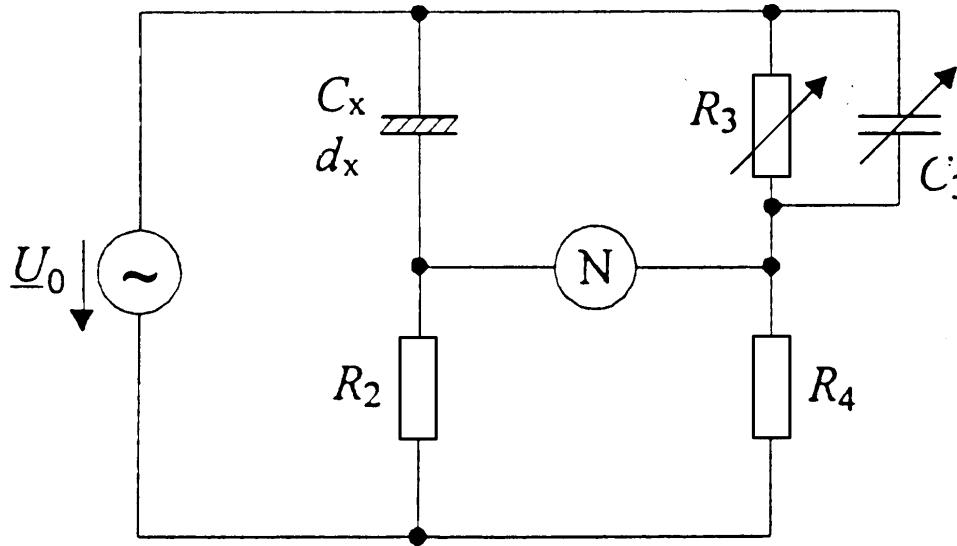
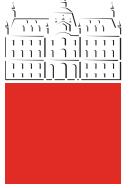
Slika 7.49 Paralelni in serijski kapacitivni mostič

Pri paralelnem kapacitivnem mostiču (a) imamo vzporedno vezavo idealnega kondenzatorja in upora:

$$Y_1 = 1/R_x + j\omega C_x , \quad Y_3 = 1/R_3 + j\omega C_3$$

$$Z_2 = R_2 , \quad Z_4 = R_4$$





- iz ravnovesne enačbe $\underline{Y}_1 = \frac{\underline{Z}_4}{\underline{Z}_2} \underline{Y}_3$ dobimo:

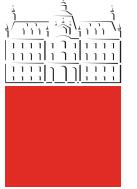
$$\frac{1}{R_x} + j\omega C_x = \frac{R_4}{R_2} \left(\frac{1}{R_3} + j\omega C_3 \right) \text{ in}$$

$$C_x = C_3 \frac{R_4}{R_2}, \quad R_x = R_3 \frac{R_2}{R_4}$$

$$d_x = \frac{1}{\omega R_3 C_3}$$

- ta varianta je primerna za velike faktorje izgub.

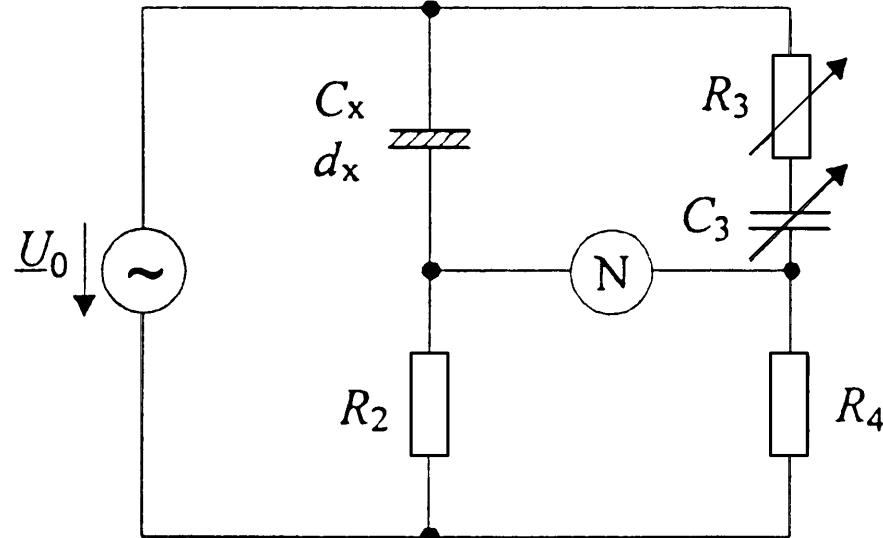




Pri serijskem kapacitivnem mostiču imamo zaporedno vezavo idealnega kondenzatorja in upora:

$$\underline{Z}_1 = R_x + 1/j\omega C_x, \quad \underline{Z}_2 = R_2$$

$$\underline{Z}_3 = R_3 + 1/j\omega C_3, \quad \underline{Z}_4 = R_4$$



- iz ravnovesne enačbe $R_x + \frac{1}{j\omega C_x} = \frac{R_2}{R_4} \left(R_3 + \frac{1}{j\omega C_3} \right)$ dobimo:

$$C_x = C_3 \frac{R_4}{R_2}, \quad R_x = R_3 \frac{R_2}{R_4} \quad d_x = \omega R_3 C_3$$

- ta varianta je primerna za **majhne faktorje izgub**.

Obe varianti sta **frekvenčno neodvisni**.

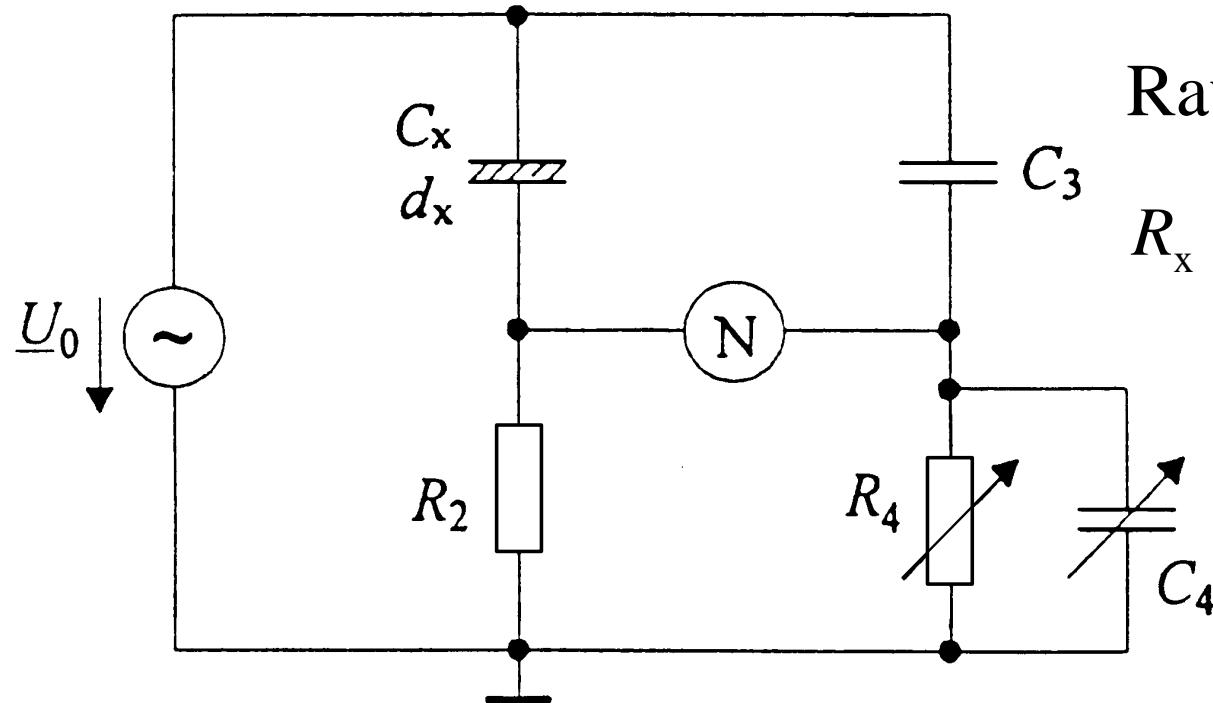
Če želimo meriti **elektrolitske kondenzatorje**, vključimo zaporedno sinusnemu generatorju še **enosmerni vir**.



Scheringov mostič

Uporaben je za merjenje dielektričnih izgub pri **visokih napetostih in visokih frekvencah** (neodvisen od frekvence).

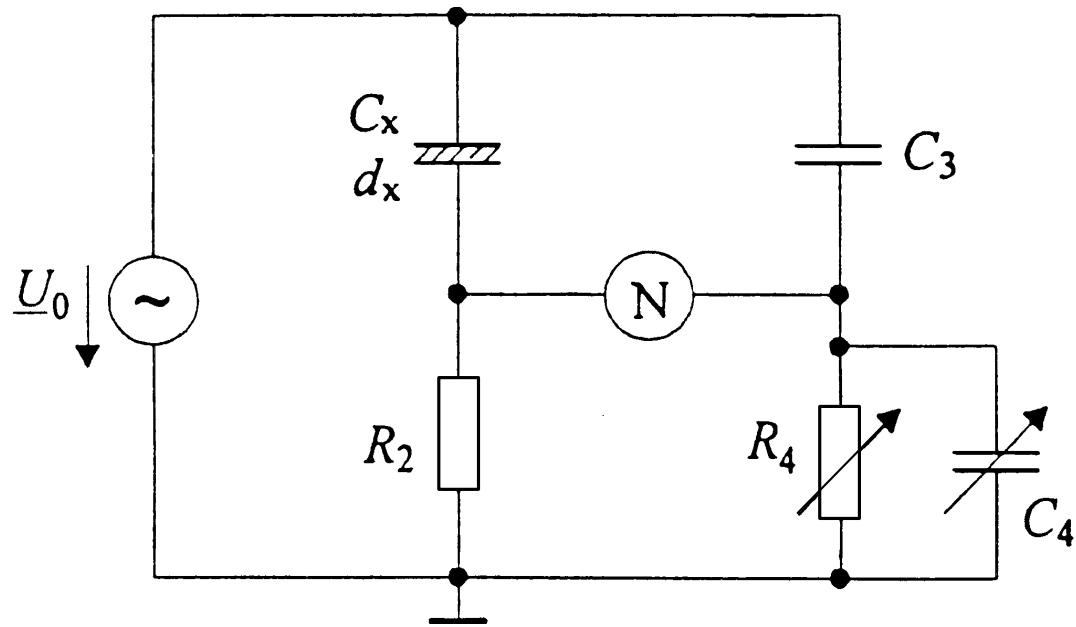
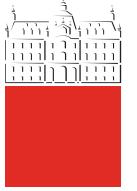
- spada med mostiče produkta: $\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3 = \text{konst.}$



Ravnovesna enačba:

$$R_x + \frac{1}{j\omega C_x} = \frac{R_2}{j\omega C_3} \left(\frac{1}{R_4} + j\omega C_4 \right)$$

Slika 7.50 Scheringov mostič



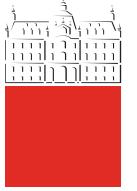
Iz ravnočesne enačbe $R_x + \frac{1}{j\omega C_x} = \frac{R_2}{j\omega C_3} \left(\frac{1}{R_4} + j\omega C_4 \right)$ dobimo:

$$C_x = C_3 \frac{R_4}{R_2}, \quad R_x = R_2 \frac{C_4}{C_2}, \quad d_x = \omega R_4 C_4$$

- pri **visokih napetostih** izberemo elemente tako, da so na elementih R_2 in Z_4 **manjše napetosti**:

$$R_2 \ll Z_1, \quad Z_4 \ll 1/\omega C_3$$

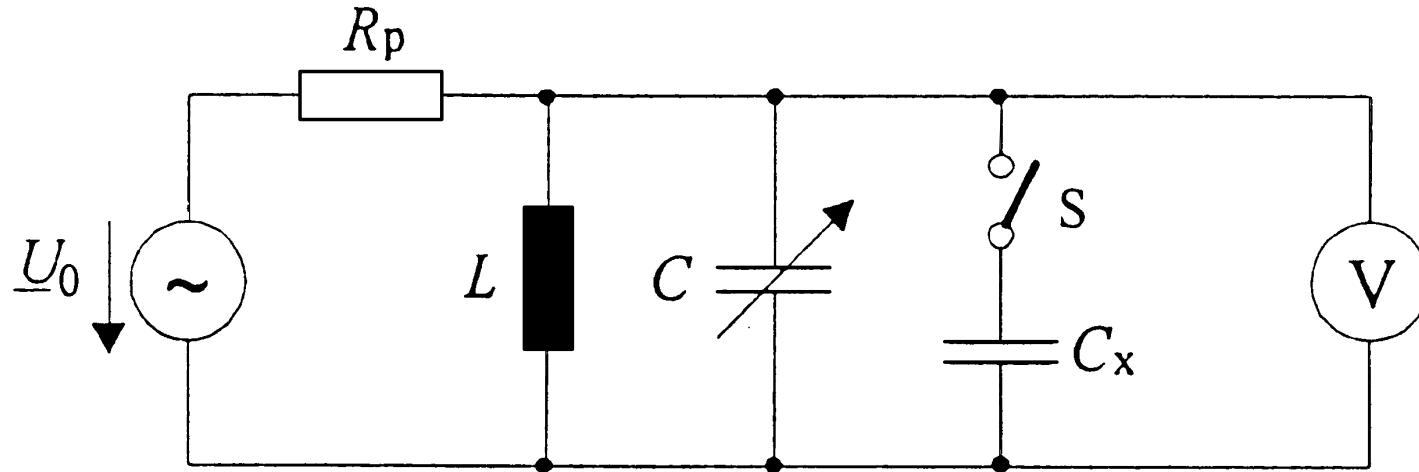




Resonančna metoda

Primerna za področje visokih frekvenc.

- vpliv parazitnih kapacitivnosti je mnogo manjši.

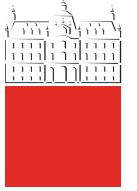


Slika 7.51 Resonančna metoda

Za izrazito resonanco mora imeti voltmeter visoko upornost $R_V \gg 1$.

- pri **odprttem stikaluu** poiščemo resonanco s spremenjanjem C :
 $\rightarrow C = C_1$,
- pri **zaprtem stikaluu** poiščemo resonanco s spremenjanjem C - ga **zmanjšamo**: $\rightarrow C = C_2$,
- **razlika** je enaka: $C_x = C_1 - C_2$ Negotovost zmanjšamo z zamenjalno metodo





7.7 Merjenje frekvence

Za **periodično veličino** je frekvenca temeljni parameter.

- merimo jo tudi **posredno prek merjenja periode**.

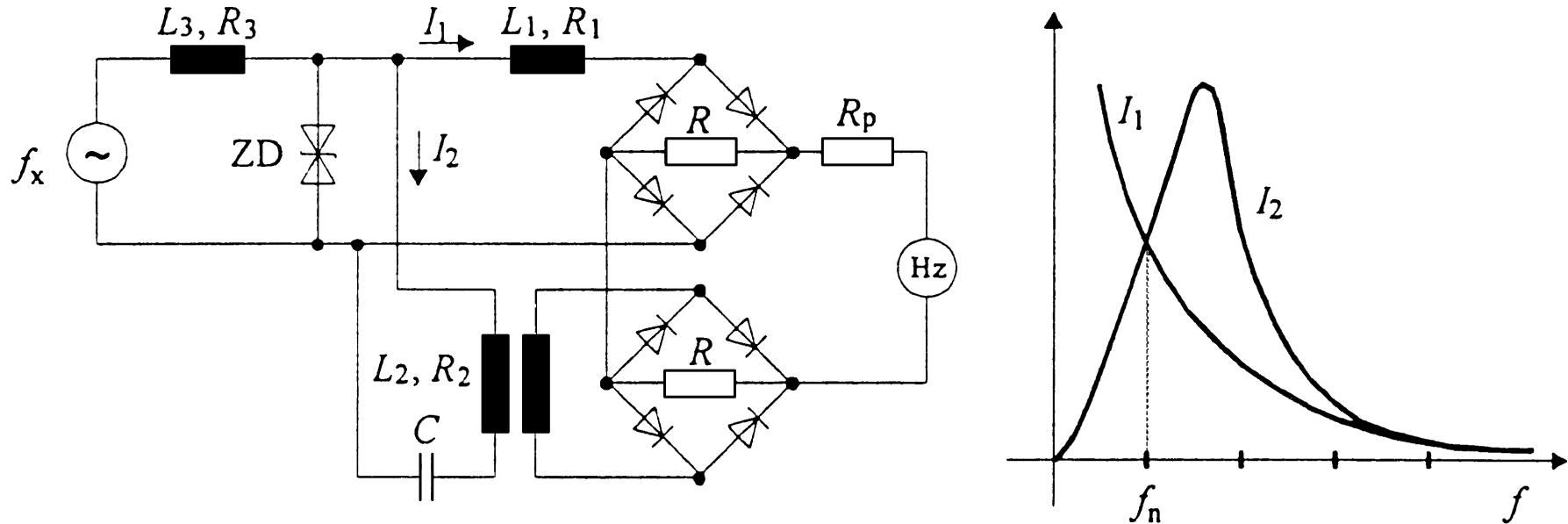
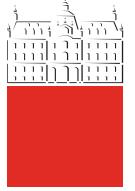
Po **digitalnem** postopku jo merimo z **elektronskim števcem**.

Po **analognem** načinu jo merimo:

- s **frekvenčno odvisnimi pasivnimi elementi**,
 - ponekod v industrijskih okoljih se še uporablja **frekvencmetre z jezički** (jeklene vzmeti), ki temeljijo na mehanski resonanci.
- s **primerjavo** s signalom z **znano frekvenco**,
- s **pretvorbo** v **impulzno veličino**.



Frekvencmeter z razliko tokov

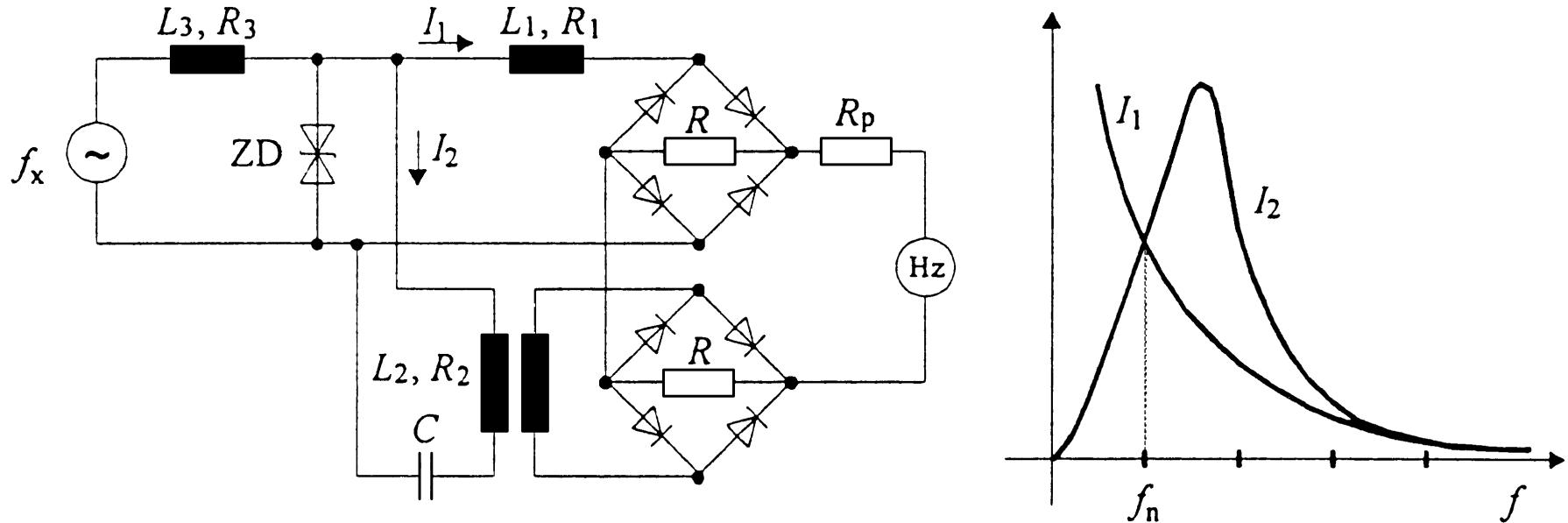
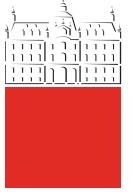


Slika 7.52 Frekvencmeter

Omejeno napetost (z L_3 , R_3) neznane frekvence f_x priključimo na dva tokokroga:

- v **prvem tok** zaradi tuljave L_1 s frekvenco **pada**,
- v **drugem** zaradi **resonance** (resonančni krog: C , L_2 , R_2) tok s frekvenco **narašča**.





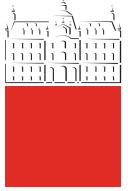
Usmerjena tokova (napetosti) sta vezana v protistiku,

- čez instrument z vrtljivo tuljavico (umerjen v hertzih) teče tok, ki je **odvisen od razlike tokov I_1 in I_2 :**

- npr. meritno območje je od 49,5Hz do 50,5Hz:

- $I = 0\text{mA} \Leftrightarrow f = 50\text{Hz}$

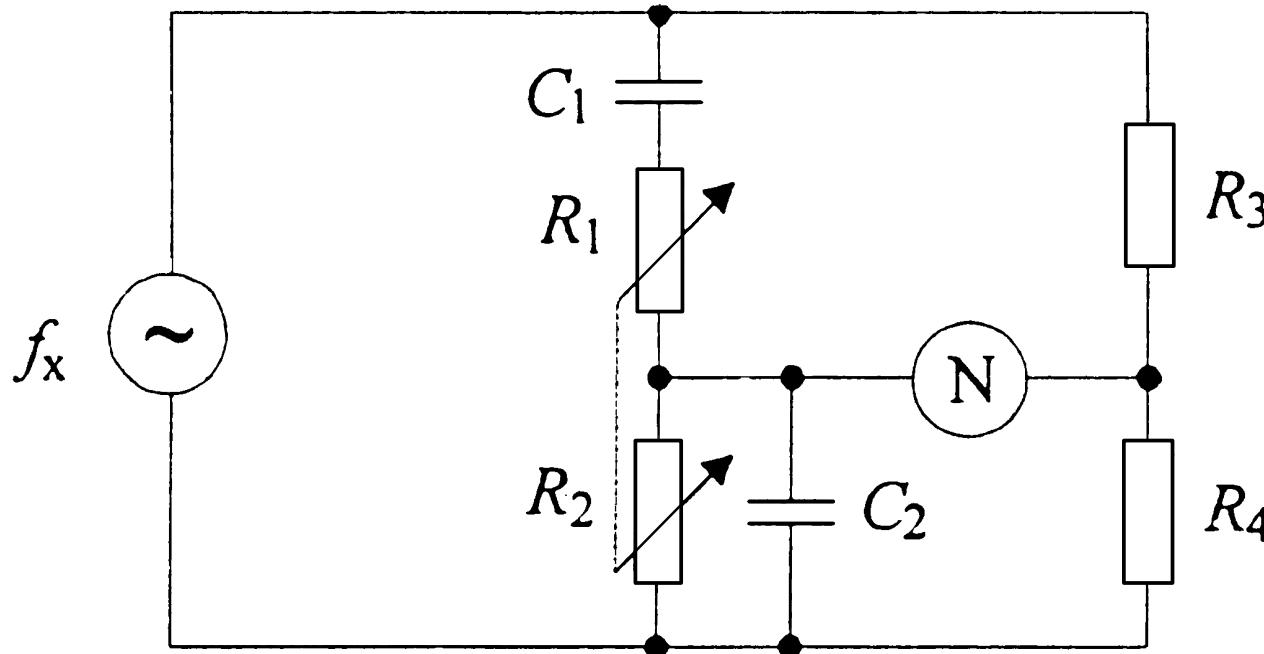




Wien-Robinsonov mostič

- Ničelna metoda

Zgrajen s **frekvenčno odvisnimi** pasivnimi **elementi**.

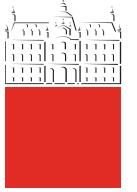


Slika 7.53 Wien-Robinsonov mostič za merjenje frekvence

$$\text{Immitance mostiča so: } \underline{Z}_1 = R_1 + 1/j\omega C_1, \quad \underline{Z}_3 = R_3$$

$$\underline{Y}_2 = 1/R_2 + j\omega C_2, \quad \underline{Z}_4 = R_4$$





Iz ravnovesne enačbe $\underline{Z}_1 \cdot \underline{Y}_2 = \underline{Z}_3 / \underline{Z}_4$ dobimo:

$$\left(R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \right) \left(\frac{1}{R_2} + j\omega C_2 \right) = \frac{R_3}{R_4} \quad \text{in}$$

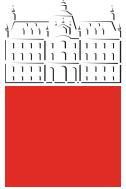
$$\frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1} = \frac{R_3}{R_4}, \quad \omega^2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}$$

Praktična izvedba: $R_1 = R_2 = R, \quad C_1 = C_2 = C \quad \Rightarrow R_3 = 2R_4$

Iskana **frekvenca** je: $f_x = \frac{1}{2\pi RC}$

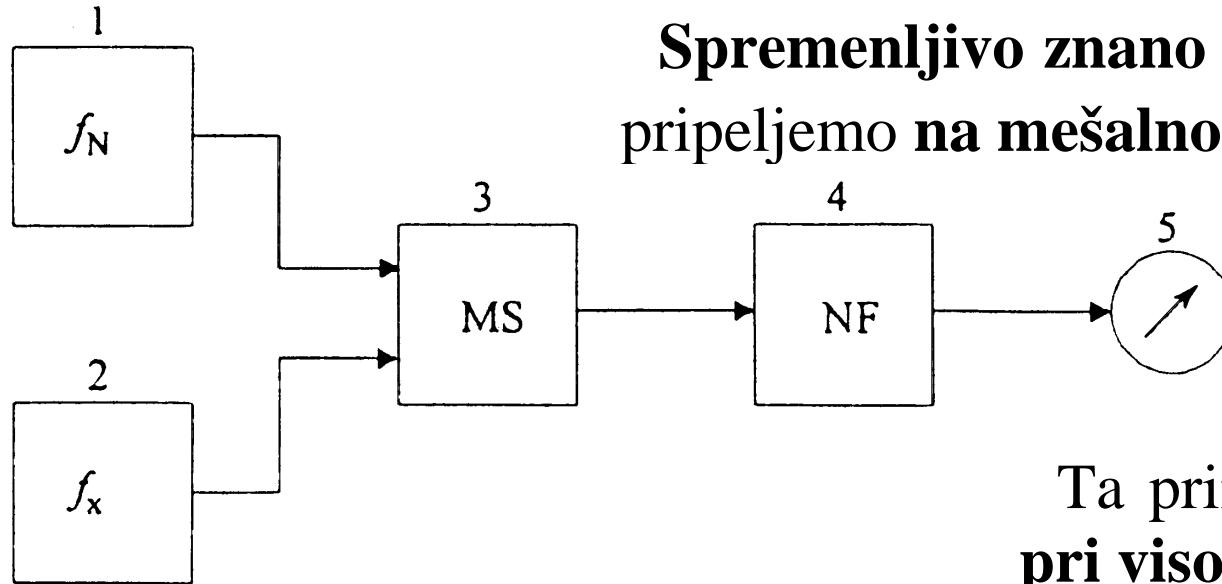
- meritno območje: od nekaj Hz do 100 kHz,
- točnost $\approx 0,1\%$.





Primerjava z znano frekvenco

Heterodinski princip



Spremenljivo znano frekvenco f_N z oscilatorja (1) pripeljemo na mešalno stopnjo (3).

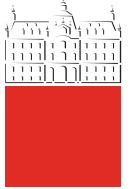
Ta primerjalna metoda se uporablja pri visokih frekvencah.

Slika 7.54 Heterodinsko merjenje frekvence

Rezultat **množenja** z neznano frekvenco f_x vsebuje:

- **vsoto in razliko** frekvenc,
- **nizkoprepustno sito** nam da le **razliko**: $f_N - f_x$
 - če je **izhod enosmerna vrednost** ($f_{(5)} = 0$): $f_x = f_N$





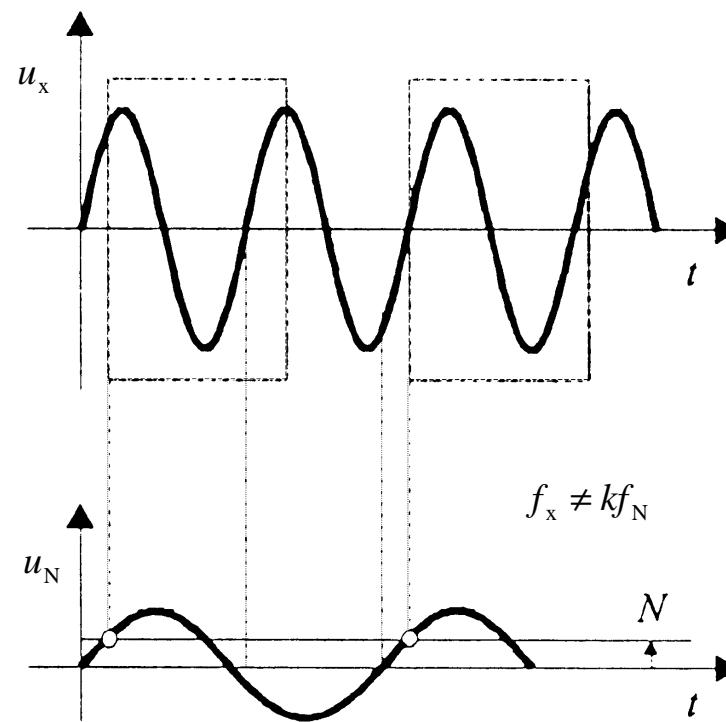
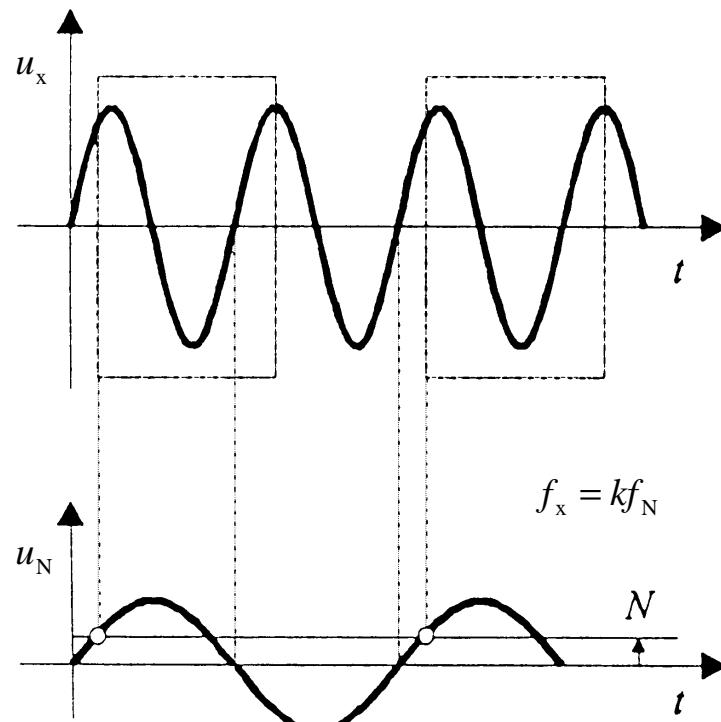
Primerjava frekvenc z osciloskopom

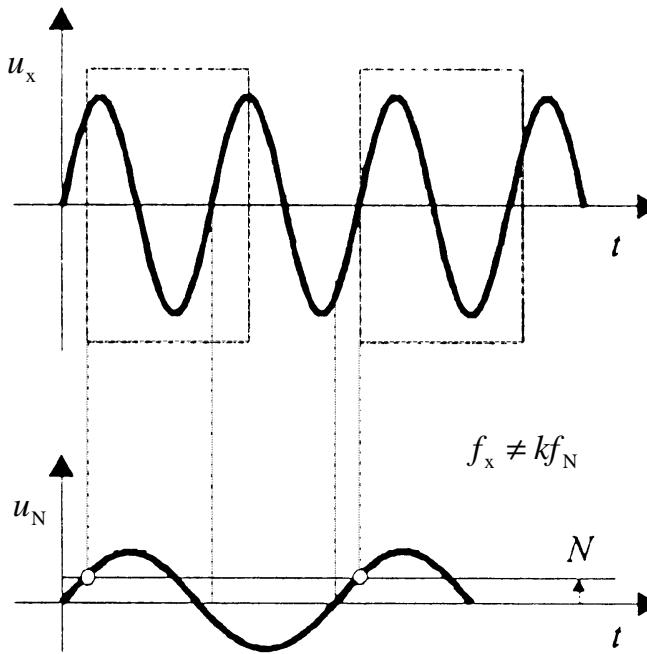
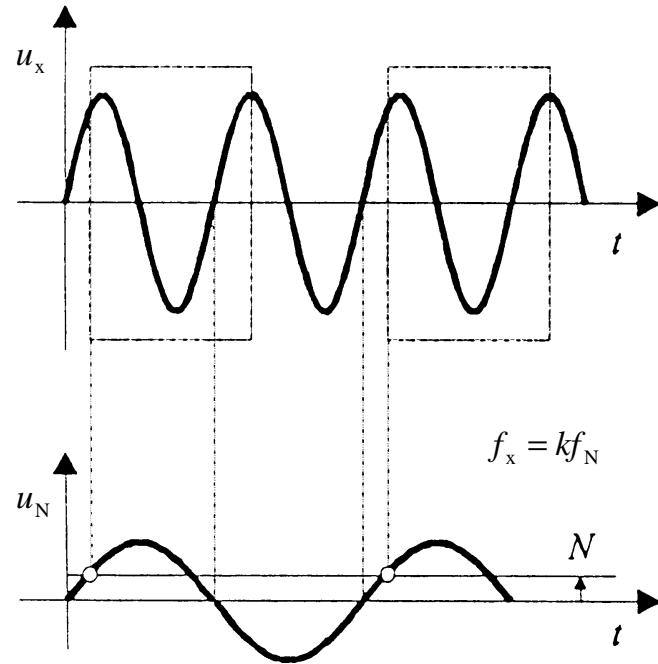
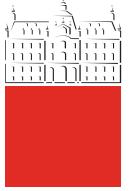
Napetosti z znano in neznano frekvenco pripeljemo na ločena vhoda (y_1, y_2).

- Če je na zaslonu **število period** znane frekvence N_N in

neznane N_x :

$$N_N T_N = N_x T_x \quad \Rightarrow \quad f_x = f_N \frac{N_x}{N_N}$$



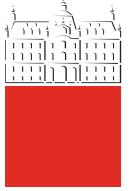


- Če se **frekvenci malo razlikujeta**, se **slika** tistega signala, na katerem ni proženja, **počasi premika** glede na drugega.
 - Iz časa, ko se **slika natančno ponovi**, dobimo:

$$f_x = f_N \pm \frac{1}{t}$$

- **Predznak** je odvisen **od smeri premikanja** in **vira proženja**.

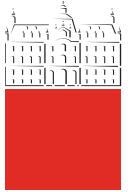




Uporaba svetlobne modulacije

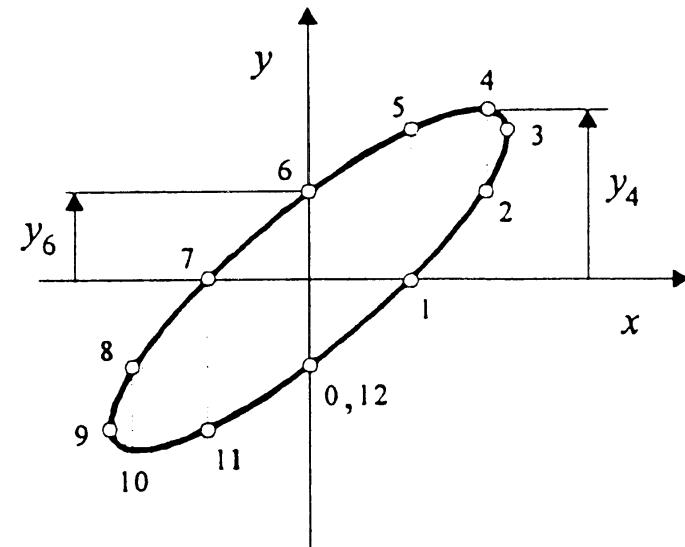
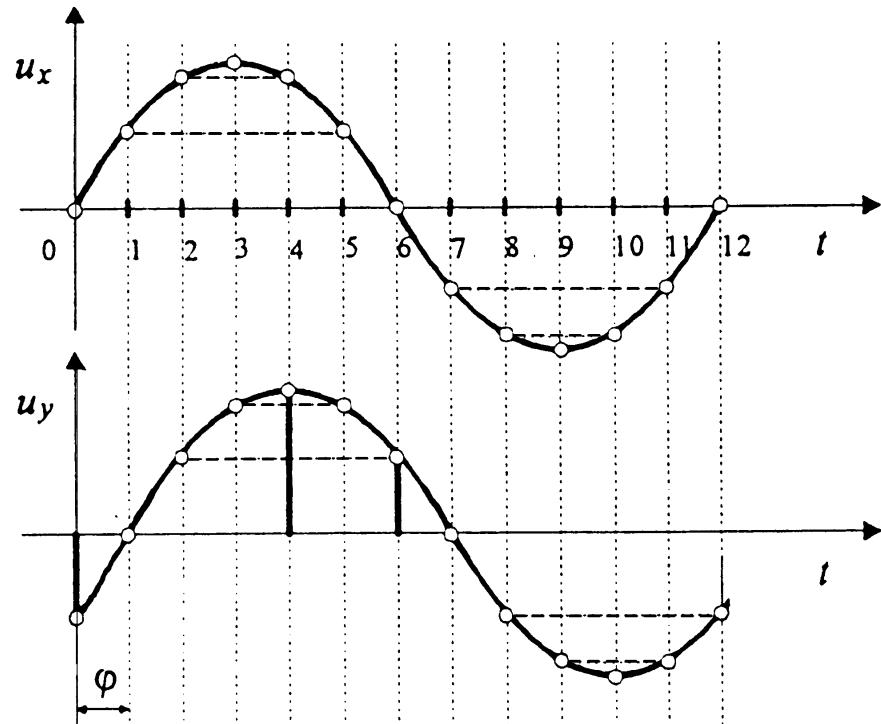
- Napetost **neznane frekvence** pripeljemo na **Y-vhod**,
- Napetost **znane frekvence** pripeljemo na **Z-vhod**.
 - napetost Wehneltovega cilindra se spreminja in s tem **pretok elektronov** (\rightarrow **svetlost slike**)
 - npr.: $f_N = 10 f_x$ \rightarrow deset parov **svetlotemnih odsekov**.





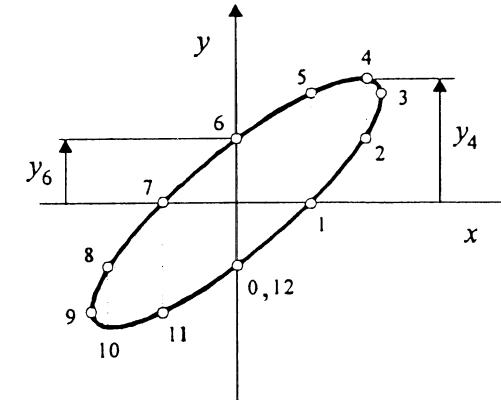
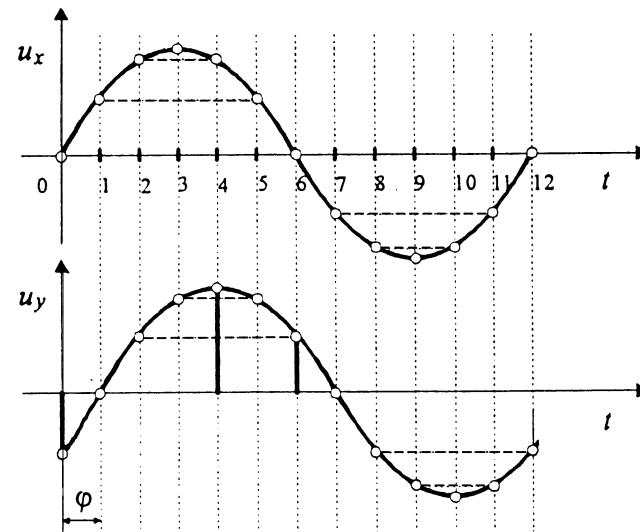
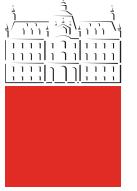
Uporaba Lissajousevih figur

- **horizontalni** odklonski sistem: $u_x = \hat{u}_x \sin \omega t = k_x \cdot x$
- **vertikalni** odklonski sistem: $u_y = \hat{u}_y \sin(\omega t - \varphi) = k_y \cdot y$



Slika 7.55 Napetosti enake frekvence in Lissajouseva figura



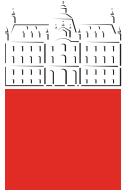


Slika je **elipsa**, če sta **frekvenci enaki**.

- odvisna je od faznega kota φ (u_y zaostaja za u_x)
 - elipsa seka y-os pri: $y_6 = \frac{\hat{u}_y}{k_y} \sin(\omega t_6 - \varphi)$
 - $\sin(\omega t_6 - \varphi) = -\sin(\omega t_0 - \varphi) = \sin \varphi$
 - največji odklon je pri: $y_4 = \frac{\hat{u}_y}{k_y} \sin(\omega t_4 - \varphi)$ $\sin(\omega t_4 - \varphi) = 1$

$$\frac{y_6}{y_4} = \frac{(\hat{u}_y/k_y) \cdot \sin \varphi}{(\hat{u}_y/k_y) \cdot 1} = \sin \varphi \quad \rightarrow \quad \varphi = \arcsin(y_6/y_4)$$



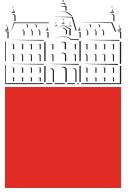


Kadar **frekvenci nista enaki**, dobimo različne oblike Lissajousevih figure.

- **slika miruje, če je razmerje racionalno število:**

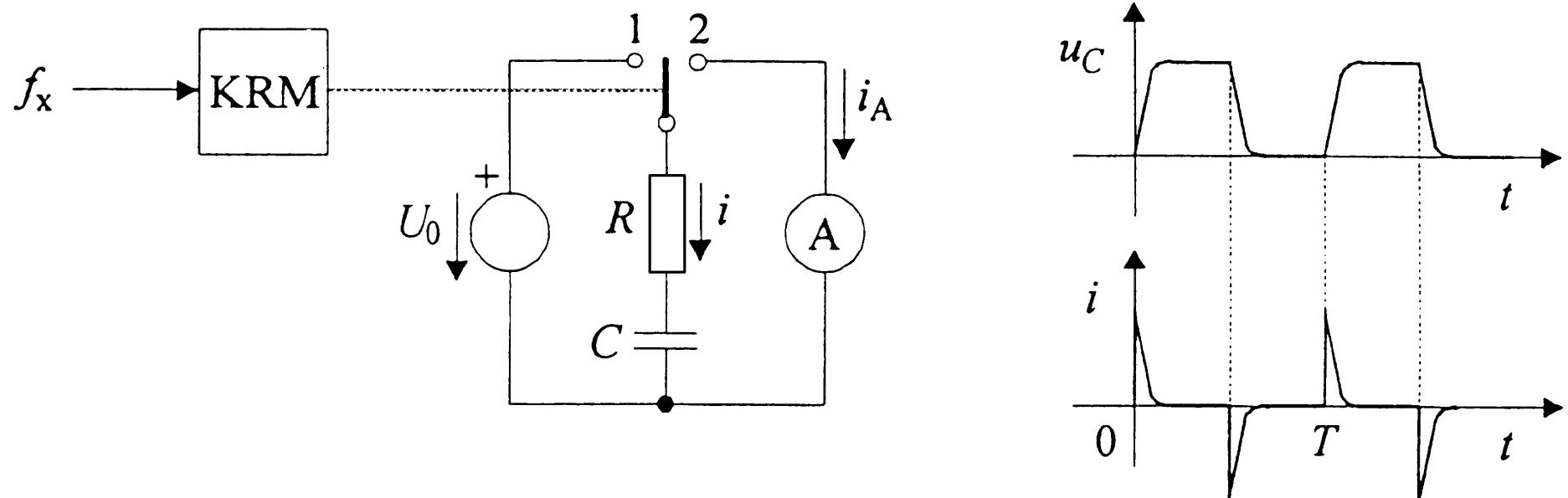
$$\frac{f_x}{f_y} = \frac{m}{n} \quad m, n = (1, 2, 3, \dots)$$



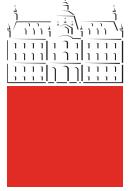
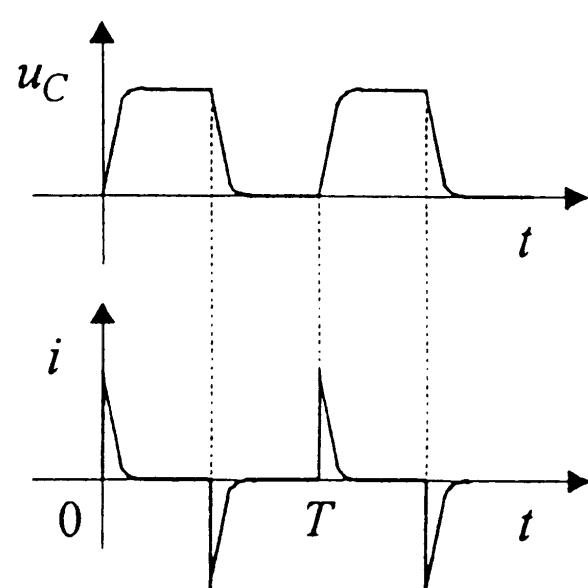
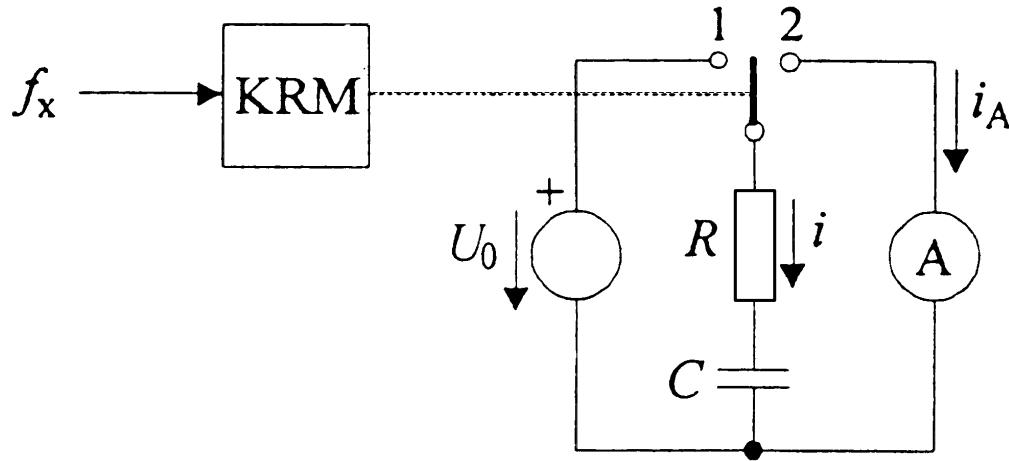


Merjenje frekvence s pretvorbo v impulzno veličino

- Frekvenca impulzov je enaka neznani frekvenci f_x ,
- Oblika impulzov naj bo neodvisna od frekvence.



Slika 7.56 Princip pretvorbe v impulzno veličino

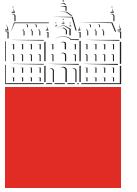


Preklopník se krmili s frekvencí neznane frekvence:

- v **položaju 1** se kondenzator nabije na U_0 ,
 - steče **naboj** $Q = CU_0$
 - **hitrost** odvisna **od** $\tau = RC$
- v **položaju 2** se kondenzator prazni čez ampermeter,
- **povprečna vrednost toka** je:

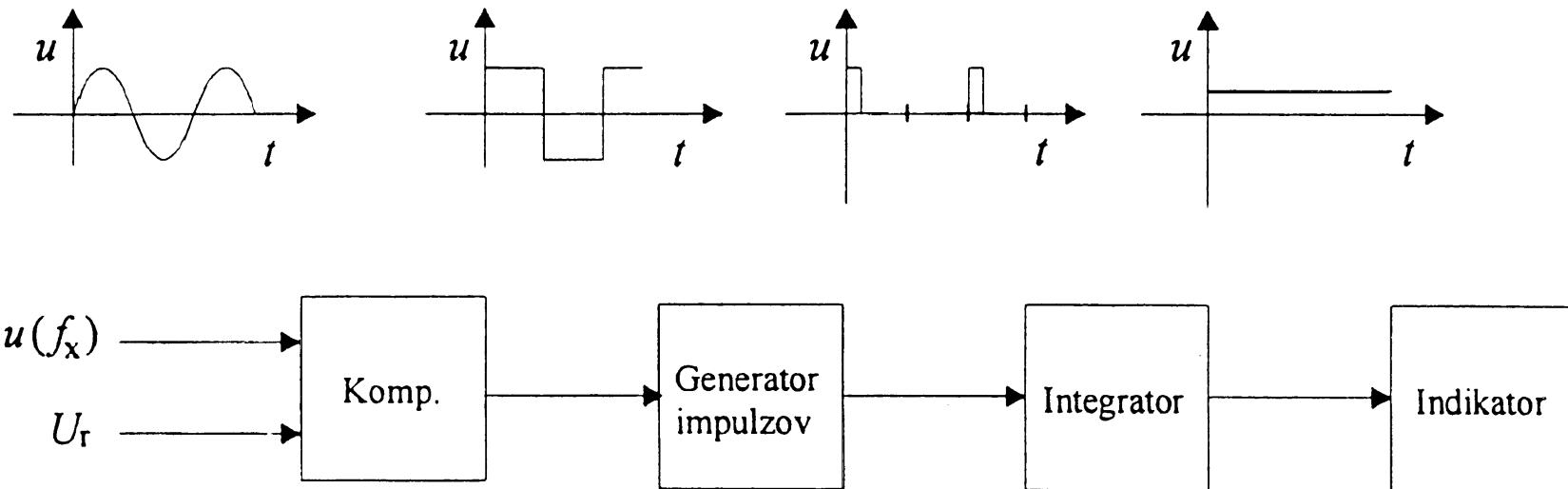
$$I = \frac{1}{T} \int_0^T i_A dt = f_x \cdot Q = f_x \cdot CU_0 \rightarrow f_x = \frac{1}{CU_0}$$



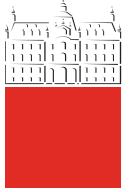


Povprečno vrednost (integral) impulzne veličine dobimo z nizkoprepustnim filtrom ali integratorjem.

- Primer pretvornika frekvence v enosmerno napetost



Slika 7.57 Blokovna shema pretvornika frekvence v enosmerno napetost



7.8 Merjenje magnetnega polja v zraku

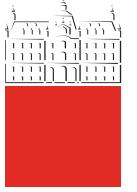
Značilnost magnetnega polja je **Coulomb-Lorentzova sila**, ki deluje na premične nosilce elektrine:

$$\bar{F} = Q \cdot \vec{v} \times \bar{B}$$

\bar{B} - magnetna indukcija (gostota magnetenega pretoka)

- označuje **magnetno polje** v točki prostora,
- enota je **tesla** (T)
 - tolikšno magnetno indukcijo **ima polje**, ki deluje na **vodnik** (**dolžina = 1m**) po katerem teče **tok 1A** s **silom 1N**.





Merjenje magnetnega polja pogosto temelji na Faradewayevem zakonu:

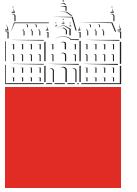
$$u_i = -N \frac{d\phi}{dt}$$

- napetost v **tuljavici** z N ovoji se inducira pri **spremembi magnetnega pretoka**

Ločimo dva načina poteka magnetnega pretoka:

- **pretok je stalen**
 - spremebo dosežemo
 - z zasukom tuljavice,
 - tuljavico potegnemo iz polja ,
 - tuljavico v polje potisnemo,
 - polje vklopimo, izklopimo ali komutiramo.
- **pretok je izmeničen** (splošno nesinusen).





V prvem primeru je **sprememba enkratna**,

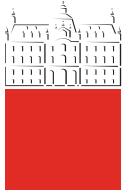
- **informacija** o magnetnem pretoku se skriva v **ploščini induciranega impulza**,
 - npr. magnetni pretok se spremeni za $\Delta\phi$:

$$\int_0^t u_i \, dt = -N \int_{\phi}^{\phi - \Delta\phi} d\phi = N\Delta\phi$$

- napetostni impulz merimo s **fluksmetrom**:

$$\Delta\phi = \frac{1}{N} \int_0^t u_i \, dt = \frac{k_F y}{N}$$





Izvedba fluksmetra s **pretvornikom napetosti v frekvenco**
 $u_i \rightarrow kf$:

$$\int_0^t u_i dt = \int_0^t (kf) dt = kt \frac{1}{t} \int_0^t f dt = kt \bar{f} = k Z$$

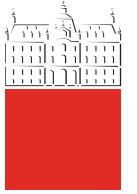
- Z je število impulzov, ki jih prešteje el. števec v času t .

Kadar je **ploščina A tuljave majhna**, je **polje homogeno** in lahko **merimo B** :

$$B = \frac{\Delta\phi}{A} = \frac{k_F y}{NA}$$

NA - podano kot parameter





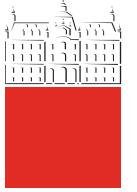
Fluksmetre izpodrivajo **elektronski voltmetri z digitalizacijo** inducirane napetosti:

$$\int_0^t u_i dt = \sum_{k=1}^N U_{ik} T_s = T_s \sum_{k=1}^N U_{ik}$$

- U_{ik} - diskretna vrednost k -tega vzorca,
- T_s - perioda vzorčenja
- **povprečna vrednost** izmerjene napetosti je:
$$T_s \sum_{k=1}^N U_{ik} = NT_s \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N U_{ik} = NT_s \bar{U} = T_M \bar{U}$$

 T_M - čas merjenja
- **magnetna indukcija** je: $\Delta B = \frac{T_M}{NA} \bar{U}$



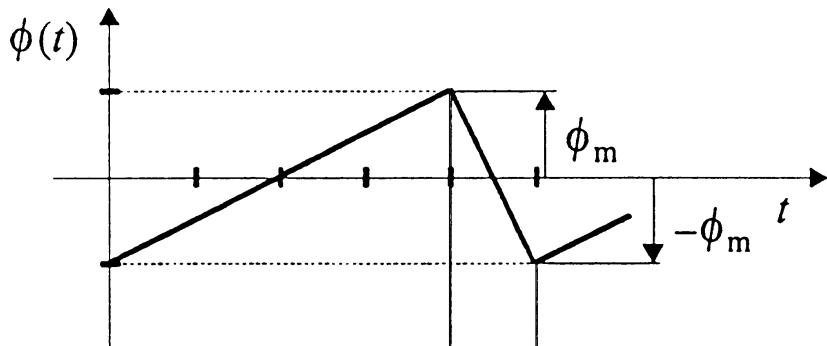


Izmenični magnetni pretok

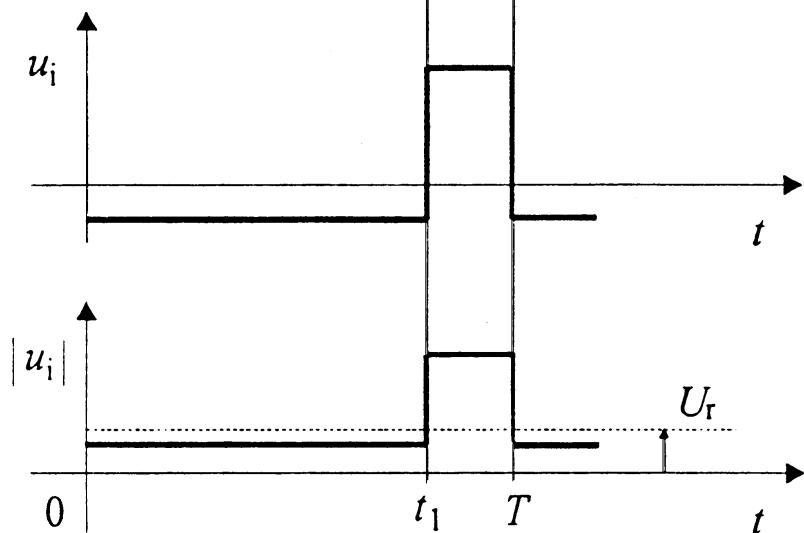
Maksimalno vrednost določimo preko usmerjene vrednosti inducirane napetosti.

- če je pretok sinusen, merimo preko efektivne vrednosti.

Primer (**žagasta oblika** napetosti):



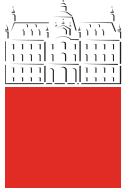
Slika 7.58 Usmerjena vrednost inducirane napetosti in ϕ_m



Usmerjena vrednost:

$$U_r = \frac{1}{T} \int_0^T |u_i| dt = \frac{1}{T} \left[- \int_0^{t_1} u_i dt + \int_{t_1}^T u_i dt \right]$$





$$V_U_r = \frac{1}{T} \int_0^T |u_i| dt = \frac{1}{T} \left[- \int_0^{t_1} u_i dt + \int_{t_1}^T u_i dt \right] \text{ vstavimo } u_i = -N \frac{d\phi}{dt} \text{ in}$$

dobimo:

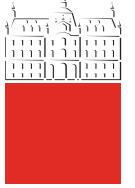
$$U_r = \frac{1}{T} \left[- \int_0^{t_1} \left(-N \frac{d\phi}{dt} \right) dt + \int_{t_1}^T \left(-N \frac{d\phi}{dt} \right) dt \right]$$
$$\text{in } U_r = \frac{N}{T} \left[\int_{-\phi_m}^{+\phi_m} d\phi - \int_{+\phi_m}^{-\phi_m} d\phi \right] = 4fN\phi_m$$

Če imamo instrument, ki se **odziva na usmerjeno napetost** in je **umerjen na sinusno napetost** ($F_0 = 1,11!$), kaže preveliko

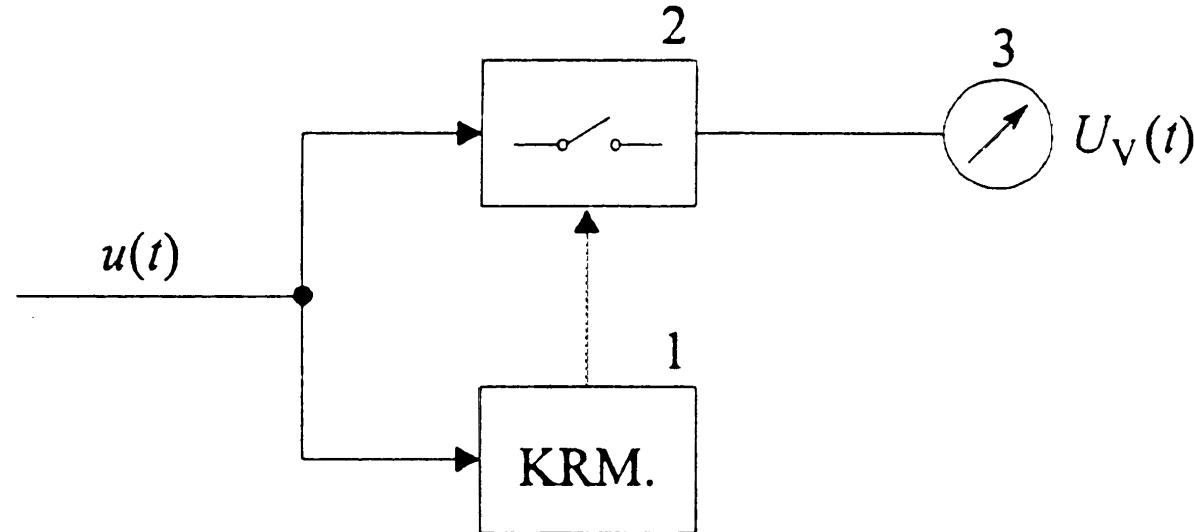
napetost: $U_v = F_0 U_r \Rightarrow \phi_m = \frac{U_v}{4F_0 f N}$

- **znotraj periode morata biti le en maksimum in minimum.**





Inducirano napetost lahko merimo s **sinhronskim stikalom** in **voltmetrom**, ki se **odziva na enosmerno** vrednost:

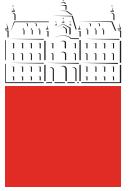


Slika 7.7 Snemanje časovnega poteka periodične napetosti

Integracijski čas nastavimo na polovico periode:

$$\begin{aligned}\bar{U}(t_1) &= \frac{1}{T/2} \int_{t_1-T/2}^{t_1} u_i dt = \frac{1}{T/2} \int_{t_1-T/2}^{t_1} \left(-N \frac{d\phi}{dt} \right) dt = \\ &= -\frac{N}{T/2} \int_{\phi(t_1-T/2)}^{\phi(t_1)} d\phi = -2fN[\phi(t_1) - \phi(t_1 - T/2)]\end{aligned}$$



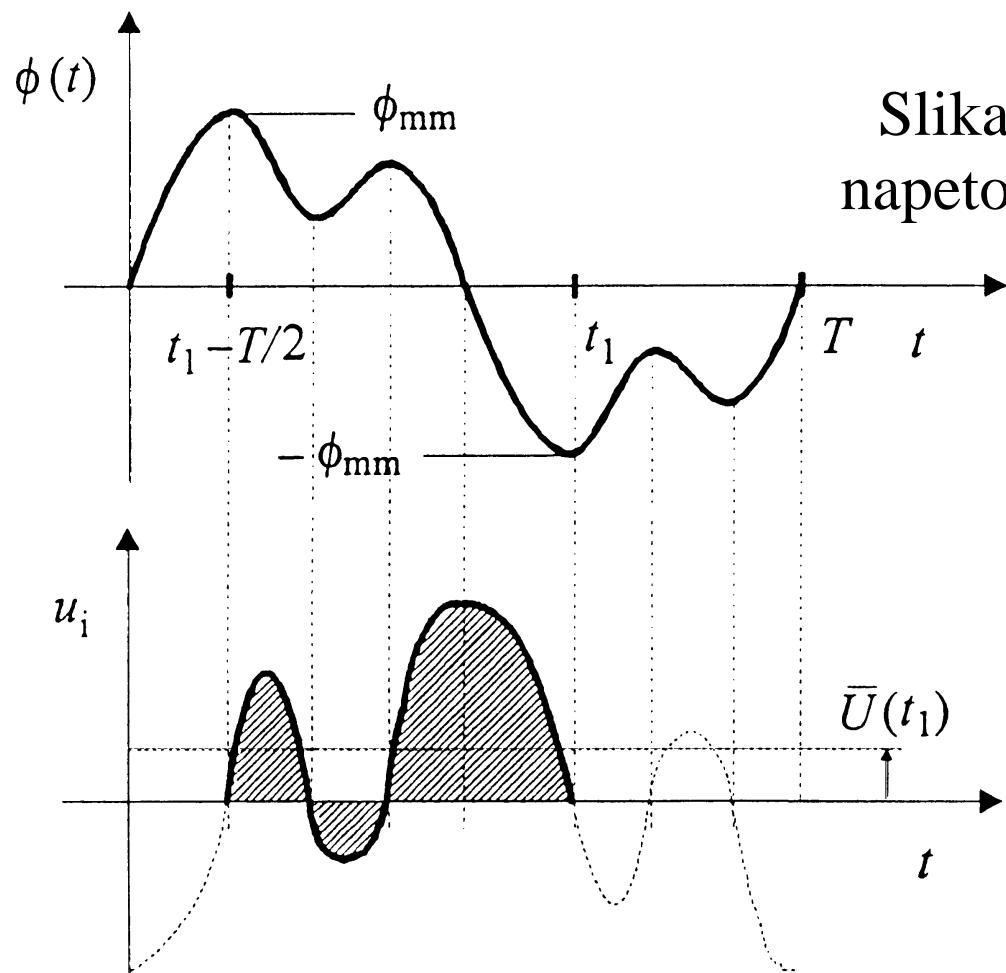


$$\bar{U}(t_1) = -2fN[\phi(t_1) - \phi(t_1 - T/2)]$$

Če je magnetni pretok simetričen III. vrste, imamo:

$$[\phi(t_1) = -\phi(t_1 - T/2)]$$

in zapišemo $U_V(t_1) = \frac{\Delta t}{T} \bar{U}(t_1) = 2fN\phi_{mm}$

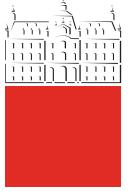


Slika 7.59 Povprečna vrednost napetosti in ϕ_{mm}

Magnetno indukcijo B dobimo tako, da magnetni pretok ϕ delimo s ploščino tuljavice A .

- **v splošnem povprečno vrednost,** če ni ϕ homogen.

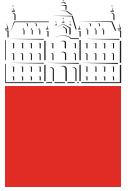




Ostali načini merjenja magnetne indukcije:

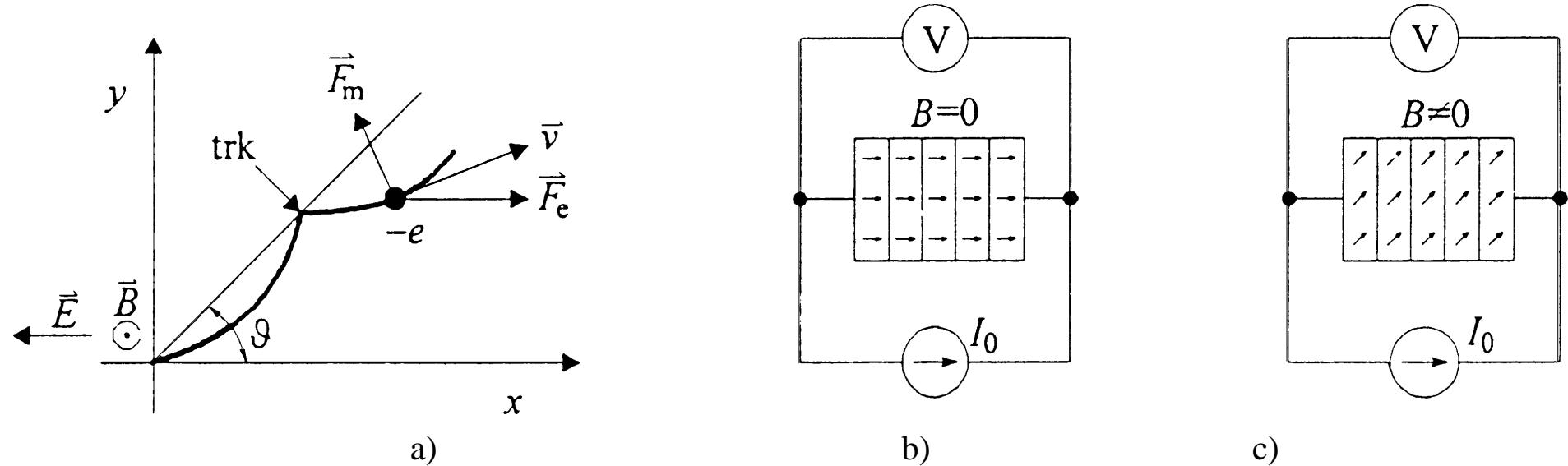
- preko sile na tokovodnik v m. polju,
- preko sile polja na trajni magnet,
- s Foersterjevo sondno,
 - z enosmernim m. poljem povzročimo, da magnetenje feromagnetika poteka po superpozicijski histerezni zanki.
- z jedrsko magnetno resonanco,
 - m. polje deluje na jedra, ki imajo magnetni moment.
- z uporovno magnetno sondno,
- s Hallovo sondno ...





Uporovna magnetna sonda

- Izkorišča se **odvisnost specifične upornosti od magnetnega polja**.
 - **gibanje elektronov se v polju podaljša.**

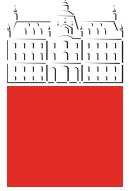
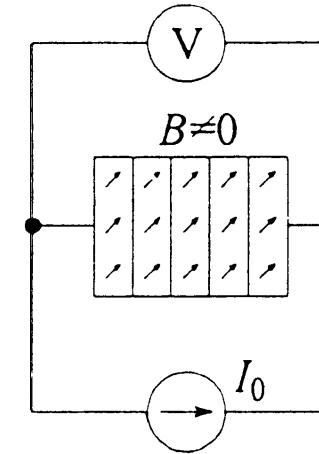
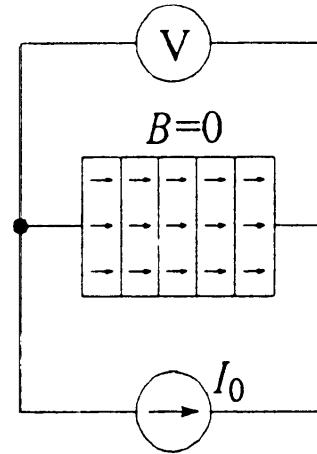
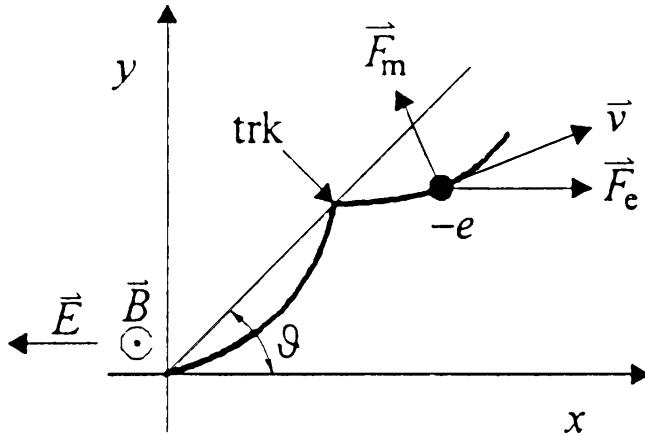


Slika 7.60 Princip delovanja uporovne magnetne sonde

Na elektron delujeta pravokotno med seboj električno in magnetno polje:

$$\vec{F}_e = (-e)\vec{E} \quad \vec{F}_m = (-e)\vec{v} \times \vec{B}$$



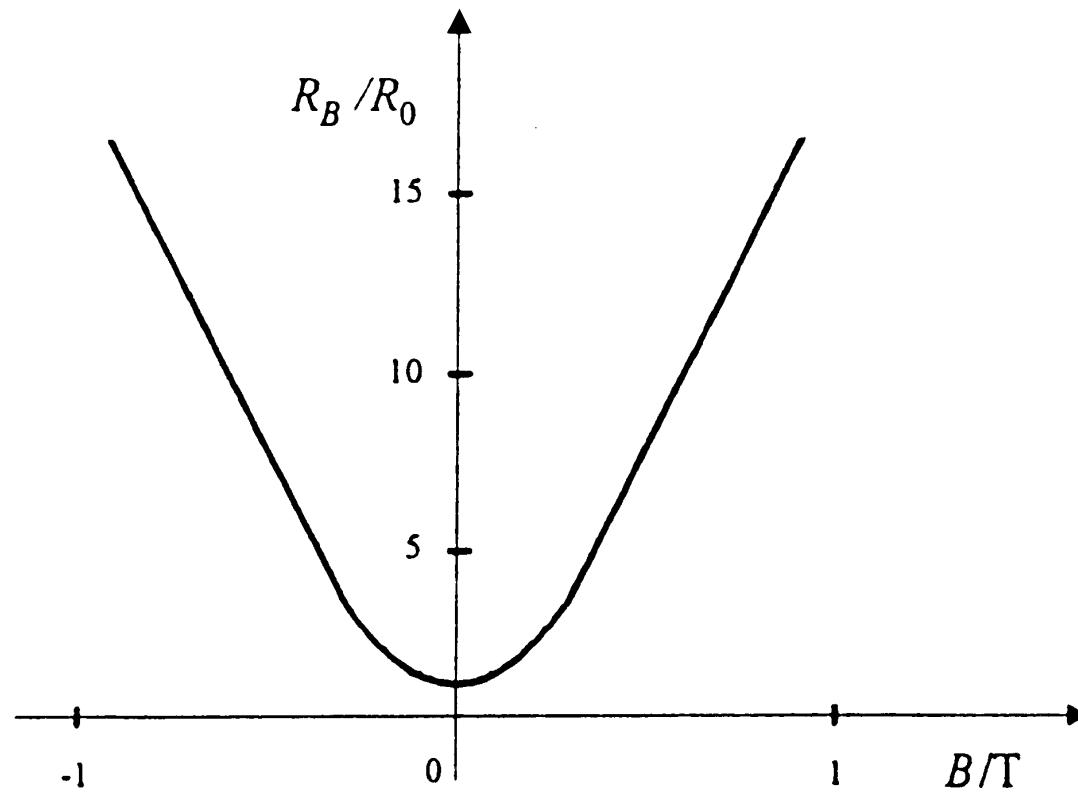
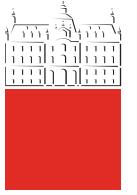


- Elektron se giblje **po cikloidi**,
- **povprečni elektron** se **zaradi trkov** v kristalni strukturi giblje za Hallov kot ϑ zamaknjeno od X-osi.
 - npr. za kovine in $B = 1\text{ T}$: $\vartheta \approx 0,5^\circ$,
 - za polprevodnik (indij-antimon): $\vartheta \approx 80^\circ$

Odklanjanje elektronov je **tem večje, čim krajši** in **širši** je polprevodniški element.

- **s kovinskimi pregradami** (nikelj-antimon) se doseže več zaporednih elementov.



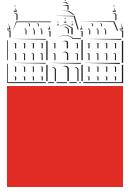


Slika 7.61 Karakteristika uporovne magnetne sonde

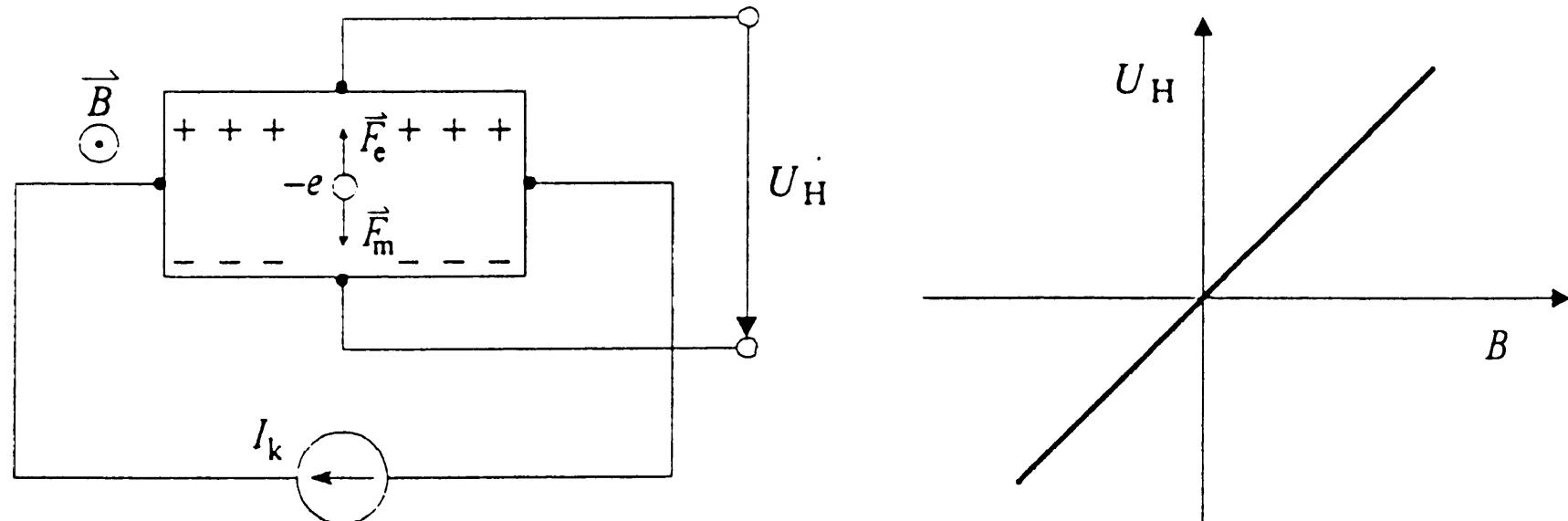
Če priključimo tok na sondi: $U_V = I_0 R_B = f(B)$

Polprevodniške uporovne m. sonde **niso občutljive na smer toka in na smer magnetne indukcije.**

Halova sonda



- je aktiven element,

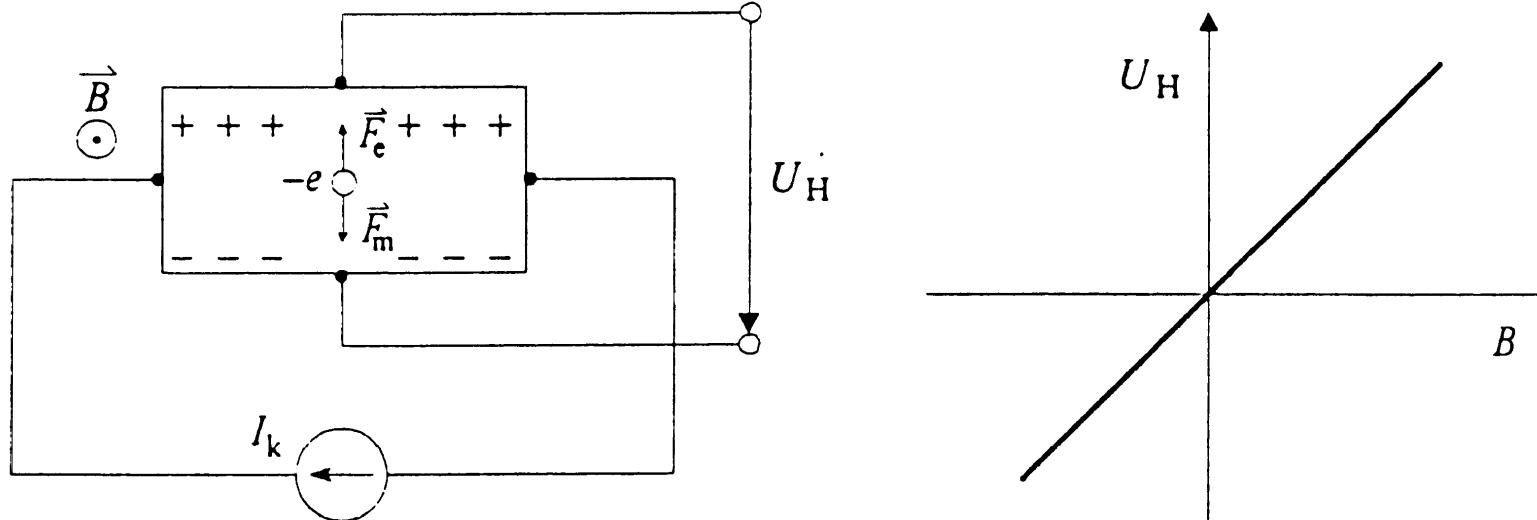


Slika 7.62 Halova sonda in njena karakteristika

Zaradi **Coulomb-Lorentzove sile** se začno **elektroni odklanjati** od prvotne smeri (kot pri uporovni magnetni sondi),

- začno se **nabirati na robu** sonde,
 - na enem robu **pozitivni naboj**,
 - na drugem robu **negativni naboj**.

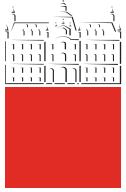


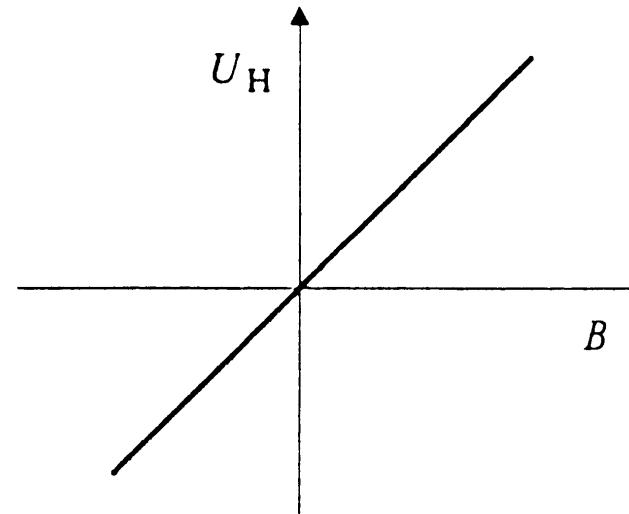
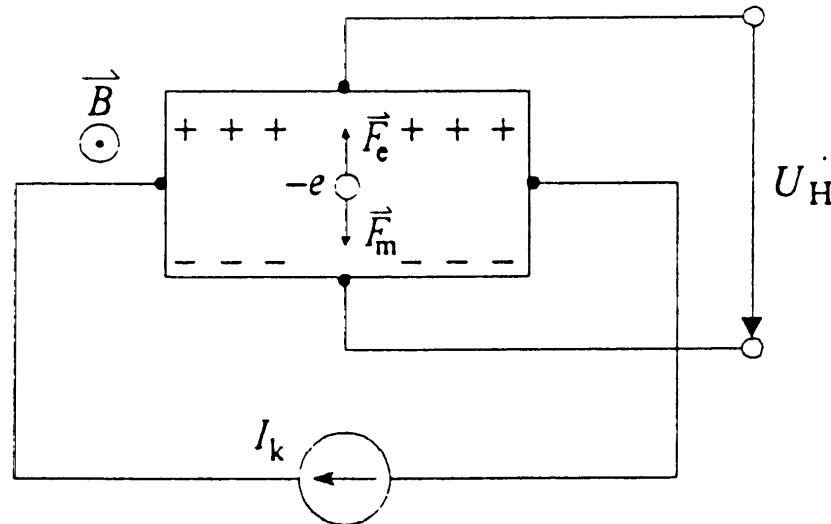
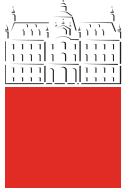


- **potencialna razlika** je Hallova napetost:

$$U_H = \frac{1}{ned} I_k B = R_H \frac{I_k B}{d}$$

- \$n\$ – koncentracija elektronov,
- \$e\$ – osnovni naboj,
- \$R_H = 1/n e\$ - Hallova snovna konstanta,
- \$d\$ – debelina ploščice,
- \$I_k\$ - krmilni tok (nazivne vrednosti med 5mA in 200mA)





- Polariteta je **odvisna od m. smeri polja** in **smeri toka** I_k ,
- Pomebna je **obremenjenost sonde** (podana je upornost bremena),
- Upoštevati moramo **ničelo napetost** (priključki ne ležijo natančno na ekvipotencialnih ploskvah)
- Za velike točnosti mora biti **sonda temperaturno kompenzirana in termostatirana**.
- Uporaba **od enosmernih vrednosti do visokih frekvenc**.