



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 poenostavljeno 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} :

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

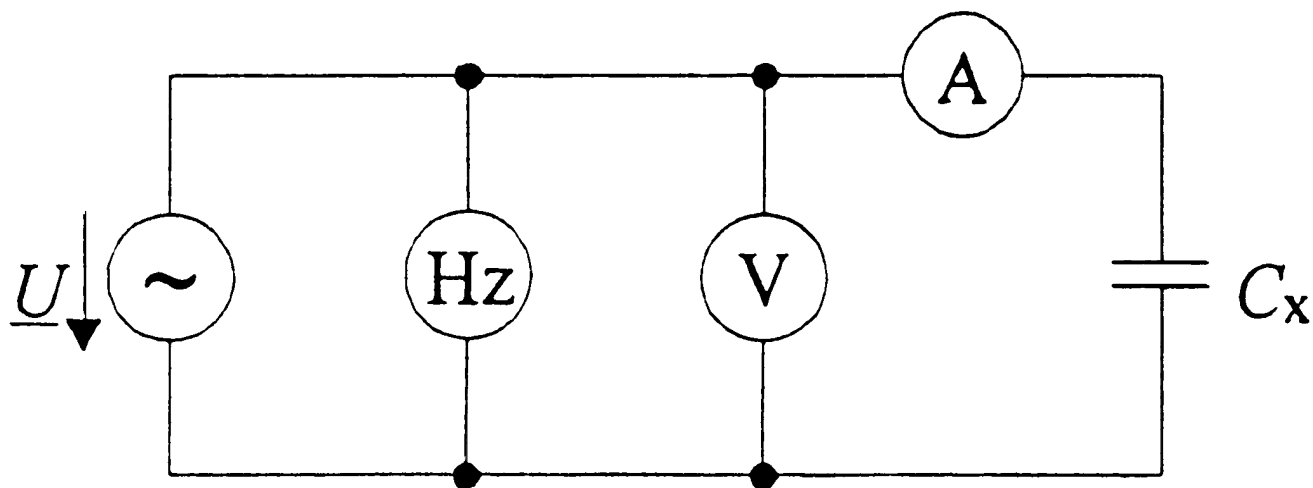
Če napetost in tok **nista sinusne oblike**, izražamo izgube s **faktorjem izgub d** (faktor disipacije) preko moči:

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



U-I metoda merjenja kapacitivnosti

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



Slika 7.43: *U-I* metoda merjenja kapacitivnosti

Razmerje napetosti in toka je:

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



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

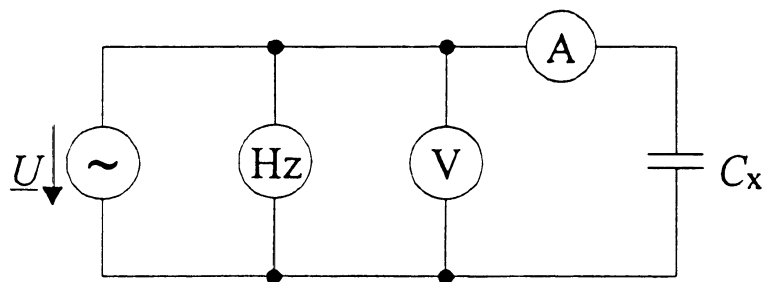
- če zanemarimo izgube dobimo samo **jalovo** upornost
- iskana kapacitivnost je:

$$C_x = \frac{I}{\omega U}$$

- **padeč na ampermetru ni tako pomemben** (ga zanemarimo), ker imamo **zamik** za 90° .

- primer: $U_C = 10 \text{ V}$

$$U_A = 0,3 \text{ V} \Rightarrow U_V = 10,004 \text{ V}$$

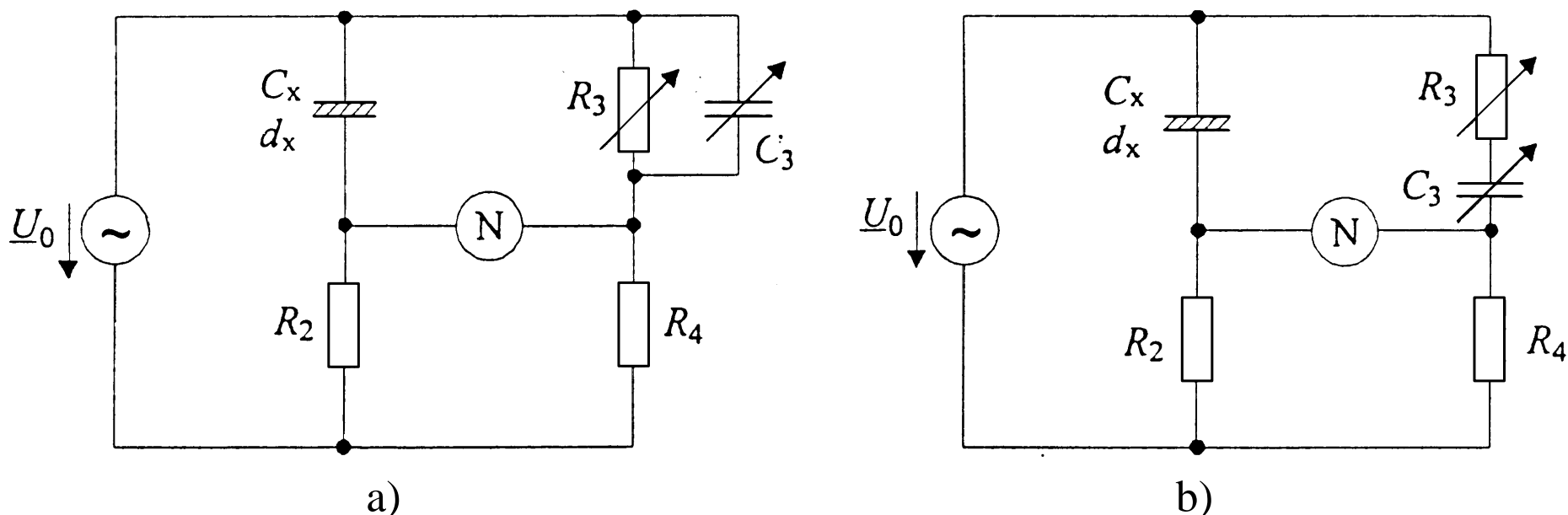


Merilno **točnost** U - I metode **povečamo** s **substitucijo etalona kapacitivnosti**.





Kapacitivni mostič



Slika 7.44: Paralelni in serijski kapacitivni mostič

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

$$\underline{Y}_1 = 1/R_x + j\omega C_x, \quad \underline{Y}_3 = 1/R_3 + j\omega C_3$$

$$\underline{Z}_2 = R_2, \quad \underline{Z}_4 = R_4$$





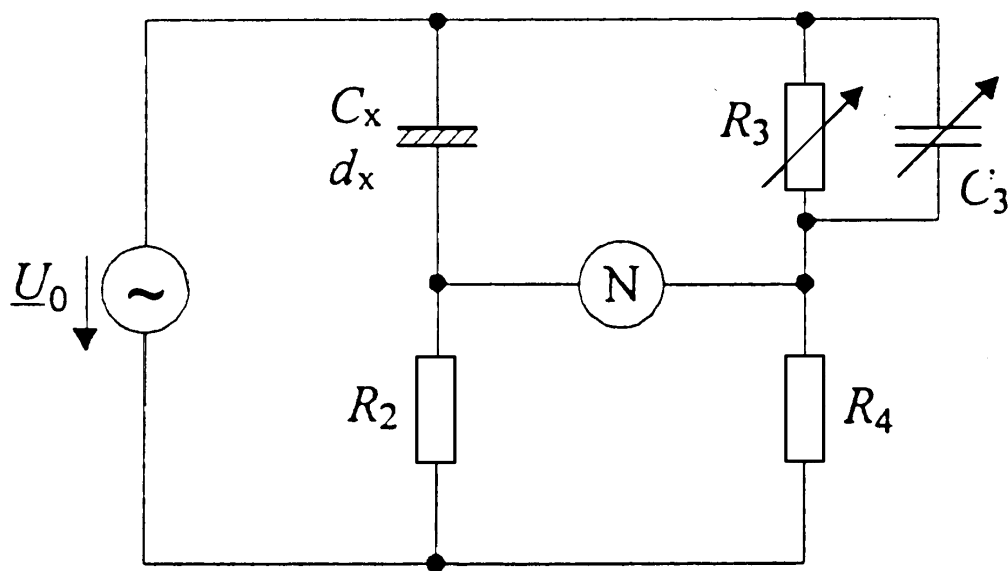
- iz ravnovesne enačbe $\underline{Y}_1 = \frac{\underline{Z}_4}{\underline{Z}_2} \underline{Y}_3$ dobimo:

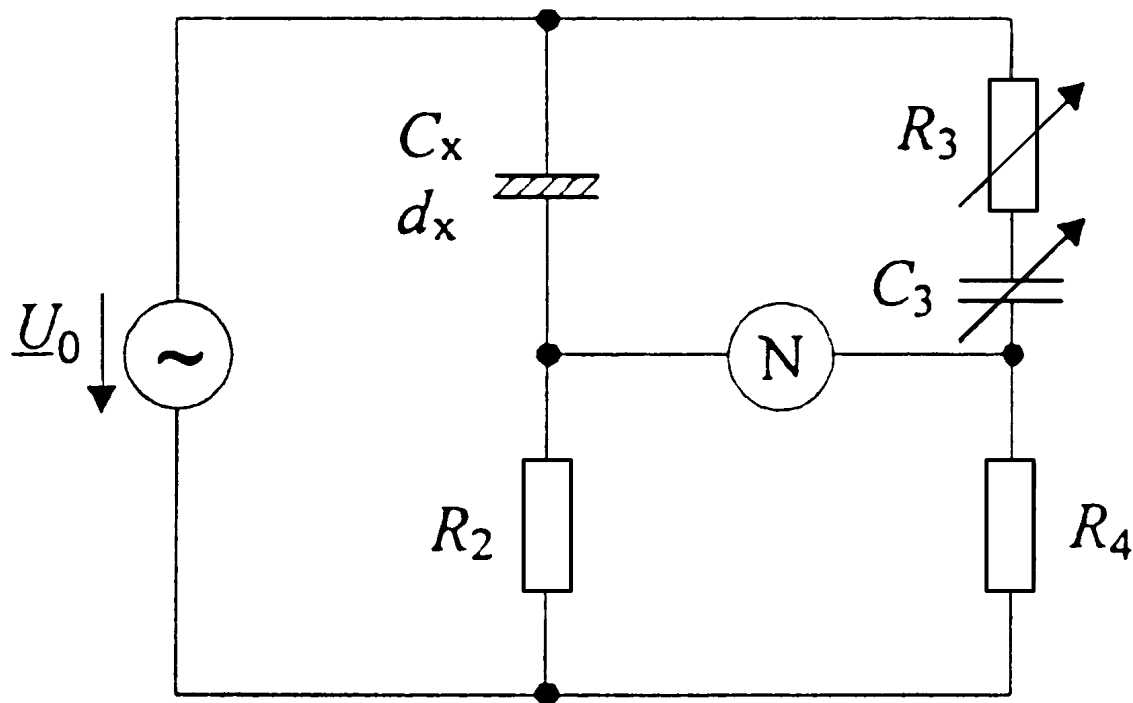
$$\frac{1}{R_x} + j\omega C_x = \frac{R_4}{R_2} \left(\frac{1}{R_3} + j\omega C_3 \right) \text{ in}$$

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

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

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





Slika 7.44b: Serijski kapacitivni mostič

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

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

$$\underline{Z}_3 = R_3 + 1/j\omega C_3$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 ,$$

$$\underline{Z}_4 = R_4$$





- 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:

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

$$d_x = \omega R_3 C_3$$

- 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.**

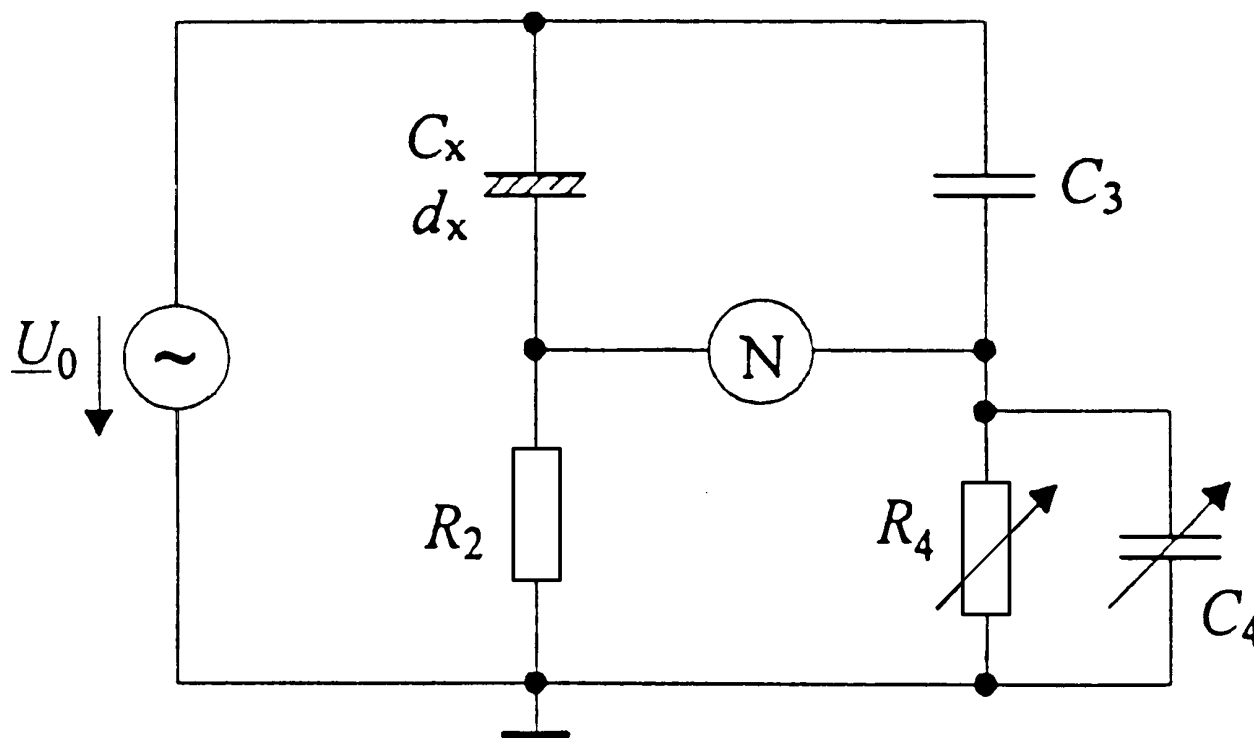




Scheringov mostič

Uporabjen je za merjenje dielektričnih izgub pri **visokih napetostih** in **visokih frekvencah**.

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



Slika 7.45: Scheringov mostič





Iz ravnovesne 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:

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

$$d_x = \omega R_4 C_4$$

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

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

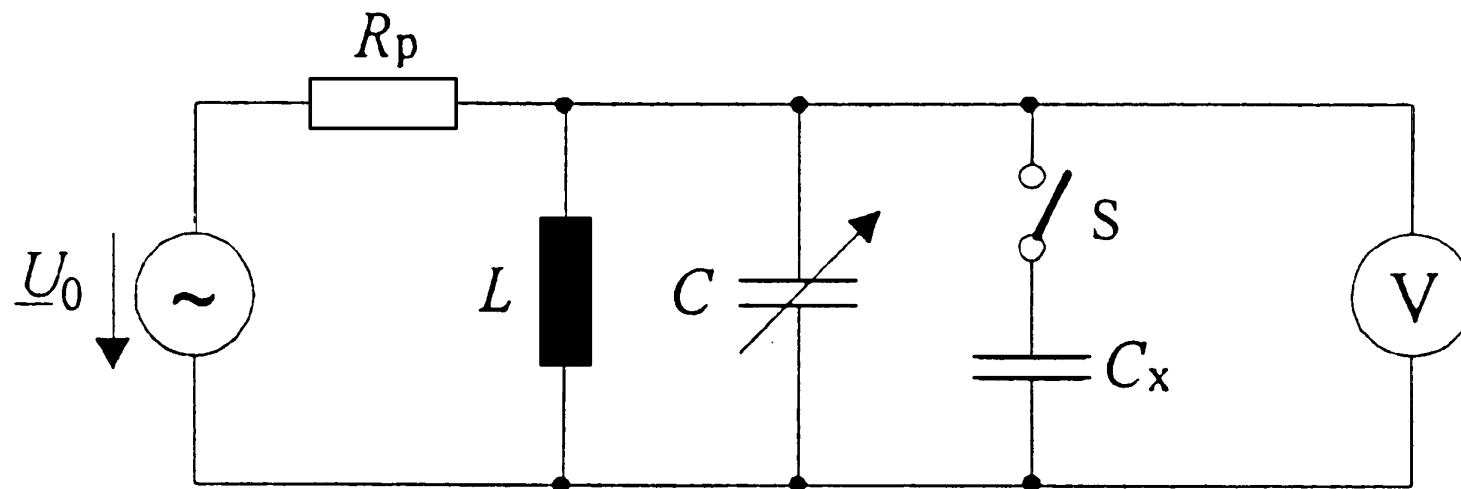


Resonančna metoda



Primerna za področje **visokih frekvenc**.

- **vpliv parazitnih kapacitivnosti je mnogo manjši.**



Negotovost zmanjšamo
z zamenjalno metodo!

Slika 7.46: Resonančna metoda (Za izrazito resonanco mora imeti
voltmeter visoko upornost $R_V \gg 1$)

- pri **odprtem stikalu** poiščemo resonanco s C : $\rightarrow C = C_1$,
- pri **zaprtem stikalu** poiščemo resonanco s spreminjanjem
 C - ga zmanjšamo: $\rightarrow C = C_2$,
- **razlika** je enaka: $C_x = C_1 - C_2$





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**,
- s **primerjavo** s signalom z **znano frekvenco**,
- s **pretvorbo v impulzno veličino**.





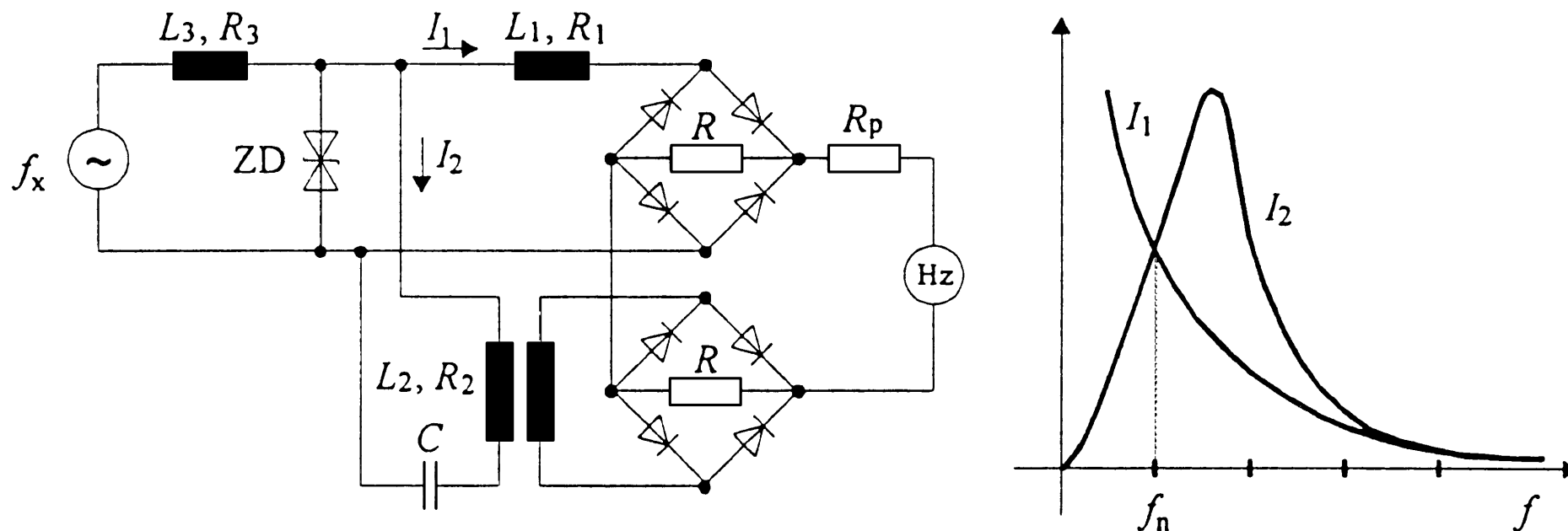
Merjenje s frekvenčno odvisnimi pasivnimi elementi

V industrijskih okoljih se še uporablja **frekvenc metre z jezički** (jeklene vzmeti).

- temeljijo na **mehanski resonanci**.



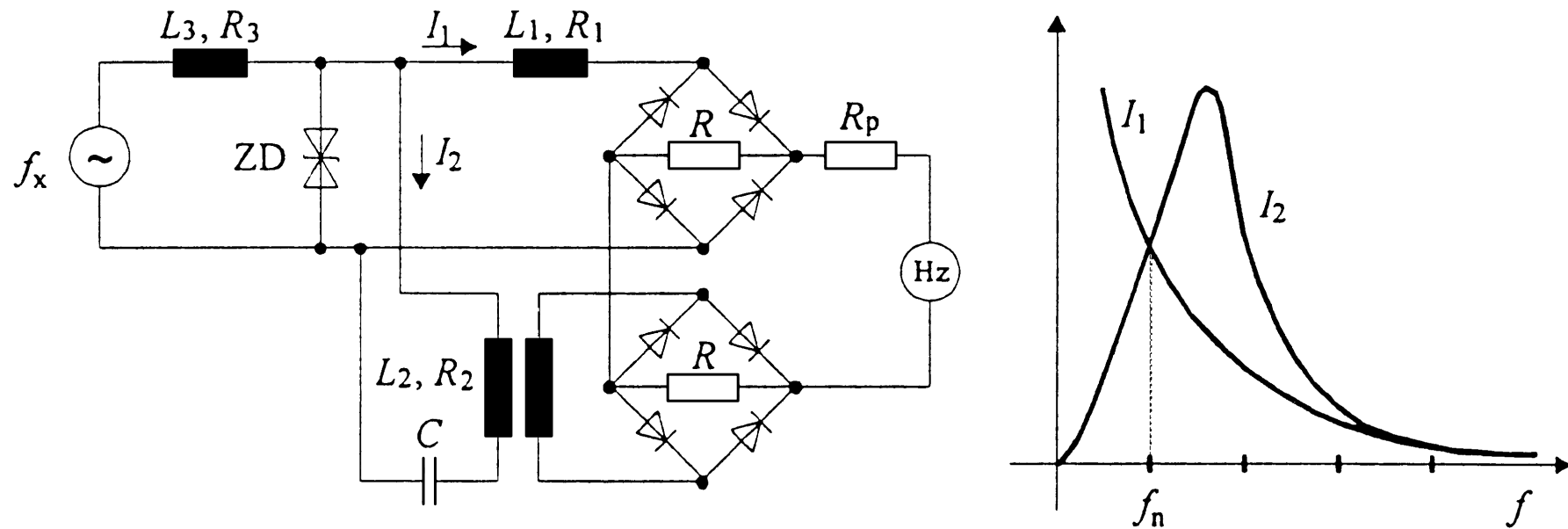
Frekvencmeter z razliko tokov



Slika 7.47: Frekvencmeter

Omejeno napetost (z L_3 , R_3) neznanne 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. merilno območje je od 49,5 Hz do 50,5 Hz:
 - $I = 0 \text{ mA} \Leftrightarrow f = 50 \text{ Hz}$

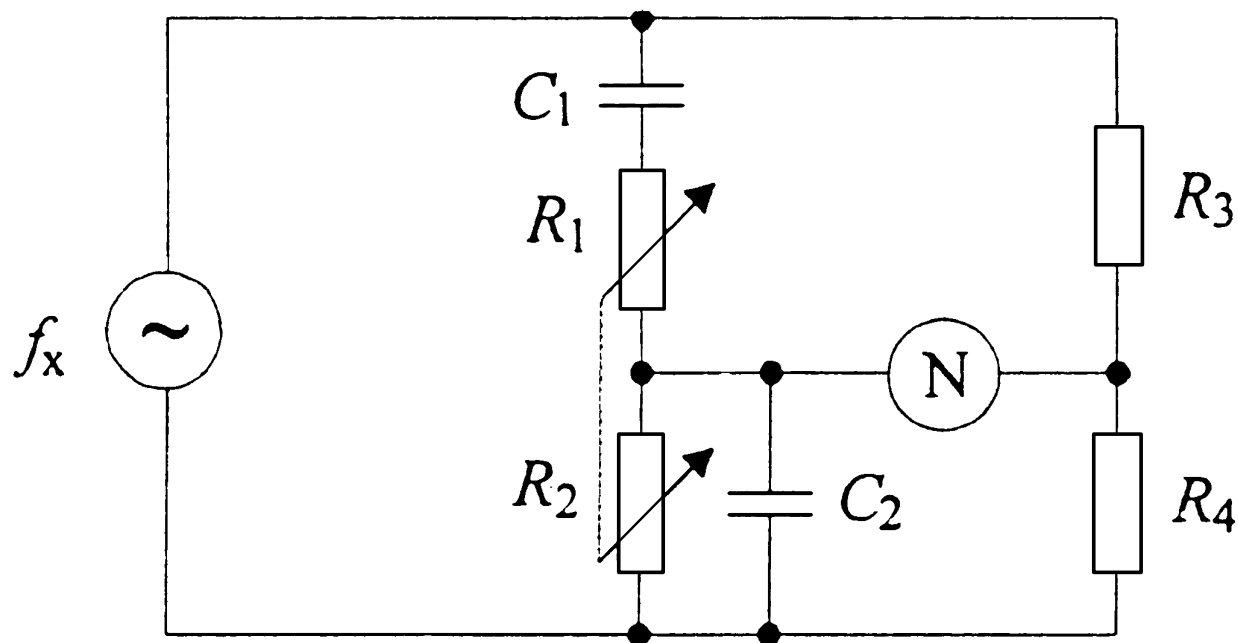




Wien-Robinsonov mostič

- Ničelna metoda

Zgrajen s **frekvenčno odvisnimi** pasivnimi elementi.



Slika 7.48: Wien-Robinsonov mostič za merjenje frekvence

Imitance mostiča so:

$$\underline{Z}_1 = R_1 + 1/j\omega C_1,$$

$$\underline{Z}_3 = R_3$$

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

$$\underline{Z}_4 = R_4$$





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

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

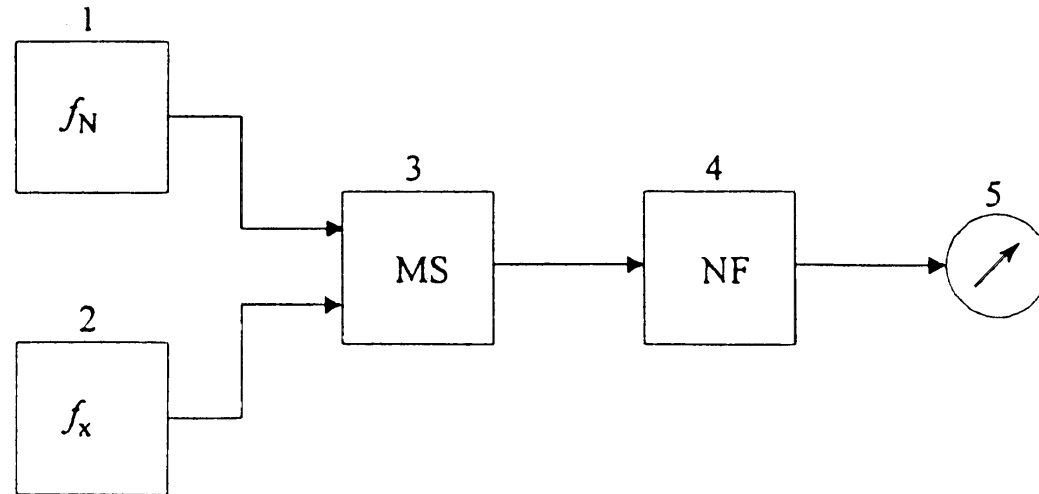
- merilno območje: od nekaj Hz do 100 kHz,
- točnost $\approx 0,1\%$.



Primerjava z znano frekvenco



Heterodinski princip:



Slika 7.49: Heterodinsko merjenje frekvence (Ta primerjalna metoda se uporablja **pri visokih frekvencah.**)

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

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

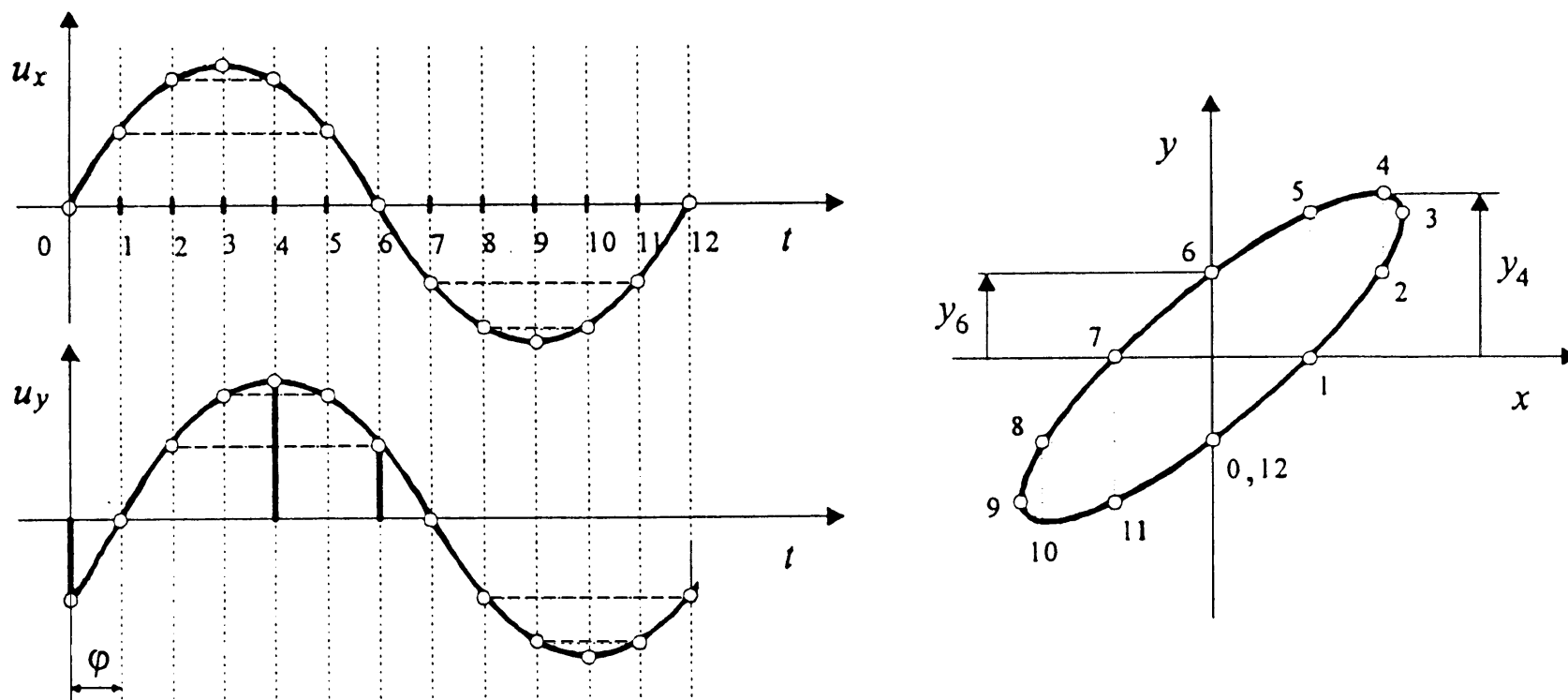
- Napetost **neznane frekvence** pripeljemo na **Y-vhod**,
- Napetost **znane frekvence** pripeljemo na **Z-vhod**.
 - napetost Wehneltovega cilindra se spreminja in s tem **pretok elektronov** (\rightarrow **svetlost slike**)
 - npr.: $f_N = 10 f_x \rightarrow$ deset parov **svetlo-temnih** odsekov.





Uporaba Lissajousevih figur

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



Slika 7.50: Napetosti enake frekvence in Lissajouseva figura



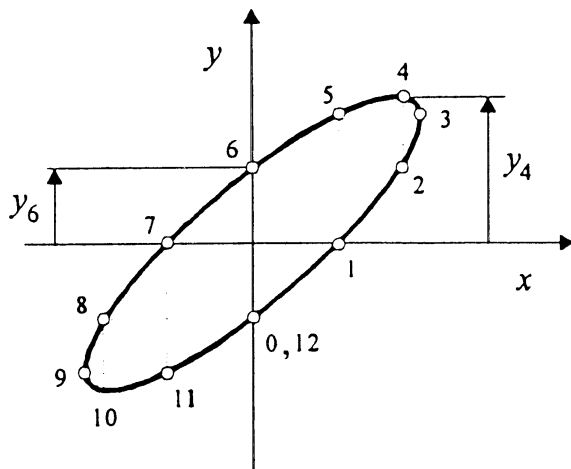


Slika je **elipsa**, če sta **frekvenci enaki**.

- 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:** $y_4 = \frac{\hat{u}_y}{k_y} \sin(\omega t_4 - \varphi)$

$$\sin(\omega t_4 - \varphi) = 1$$

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





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

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

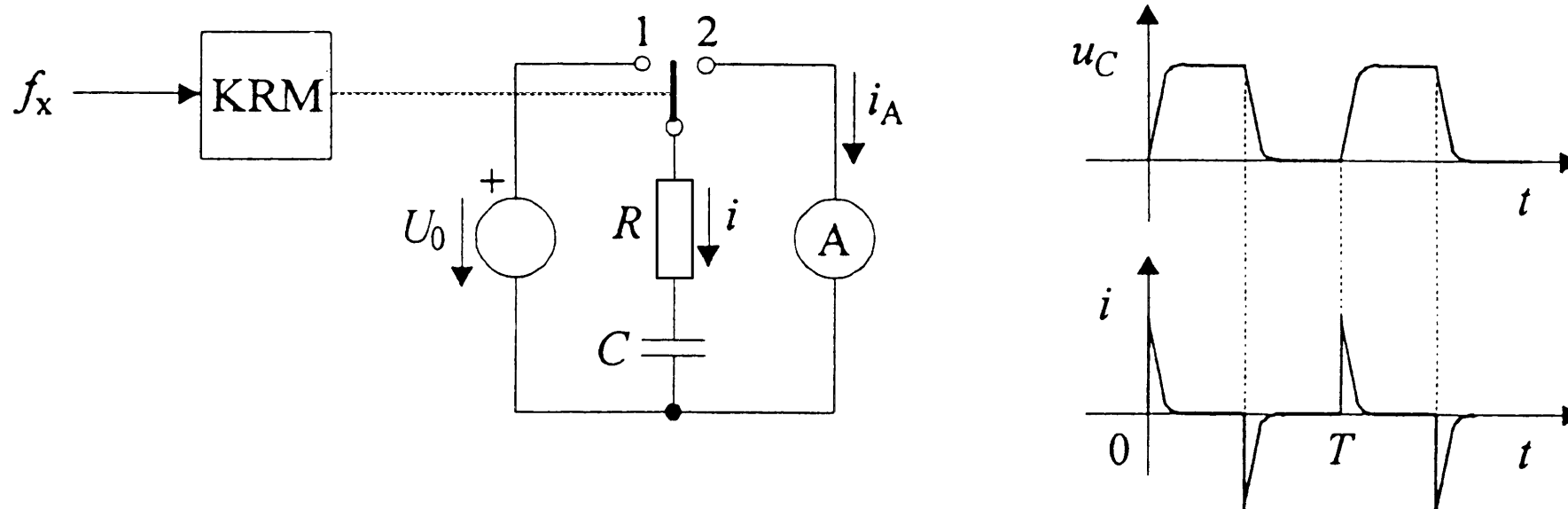
$$\frac{f_x}{f_y} = \frac{m}{n} \quad m, n = (1, 2, 3, \dots)$$





Merjenje frekvence s pretvorbo v impulzno veličino

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

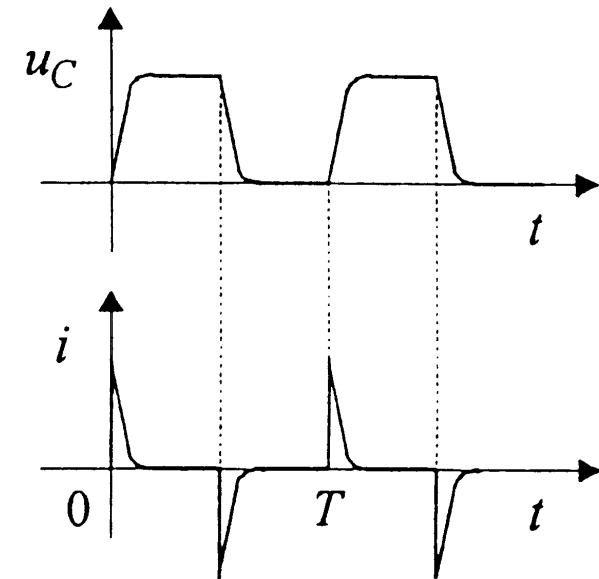
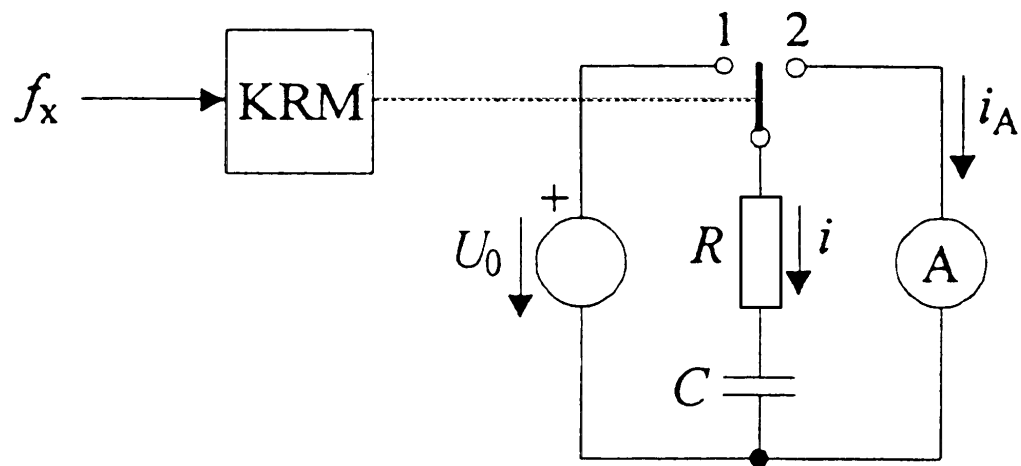


Slika 7.51: Princip pretvorbe v impulzno veličino

Preklopnik se krmili s frekvenco 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:

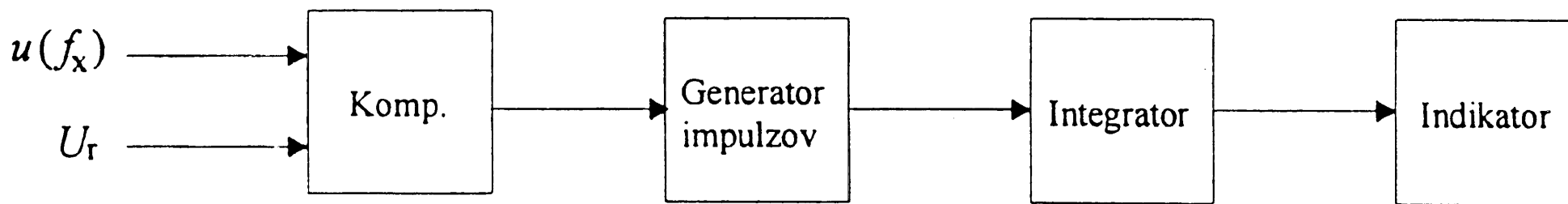
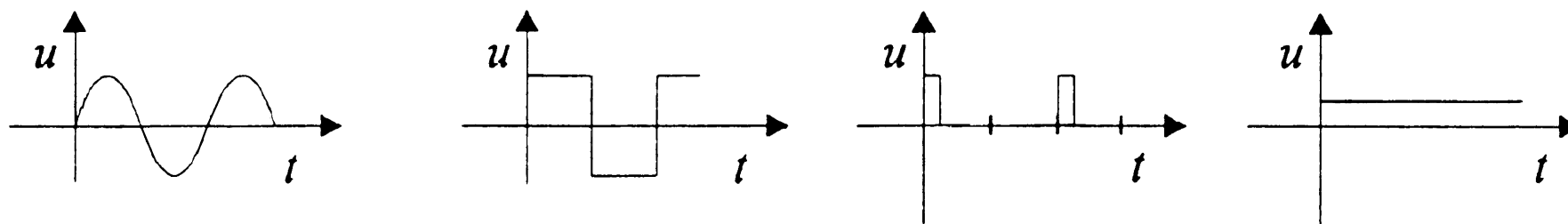
$$I = \frac{1}{T} \int_0^T i_A dt = f_x \cdot Q = f_x \cdot CU_0 \rightarrow f_x = \frac{1}{CU_0}$$





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

- Primer pretvornika frekvence v enosmerno napetost



Slika 7.52: Blokovna shema pretvornika frekvence v enosmerno napetost

