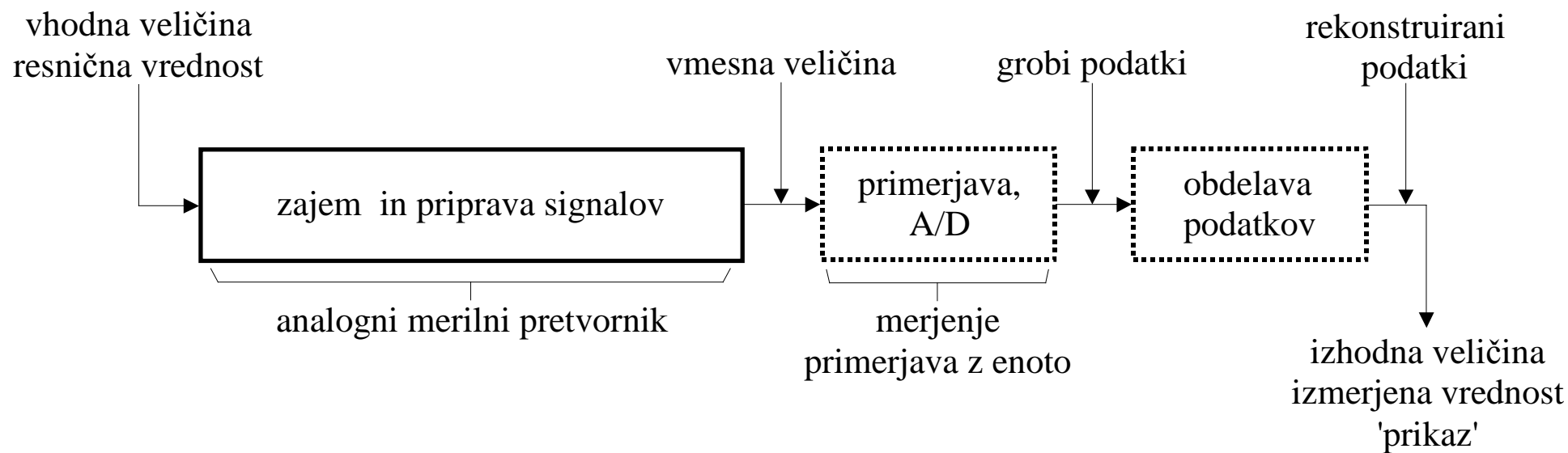




4. Analogni merilni pretvorniki in priprava signalov



Slika 4.1 Analogni merilni pretvorniki v merilnem sistemu





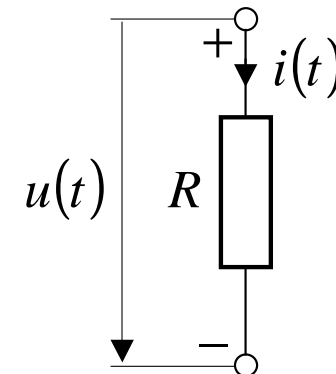
4.1 Prireditev z zmanjšanjem (atenuacijo) velikosti signalov

Za prireditev signalov uporabljamo pasivne in aktivne električne elemente:

- linearni pasivni člen (npr.: R , L , C),
- nelinearni pasivni člen (npr.: dioda),
- linearni aktivni člen (npr.: napetostni ojačevalnik),
- nelinearni aktivni člen (npr.: tranzistor) itd.

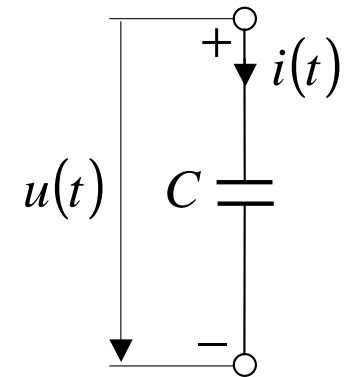
Pri zmanjšanju signalov pogosto uporabljamo linearne **pasivne** električne elemente, kot so:

- **Upor** z upornostjo R : $u(t) = R i(t)$
 - kompleksni zapis impedance: $\underline{Z}_R = R$

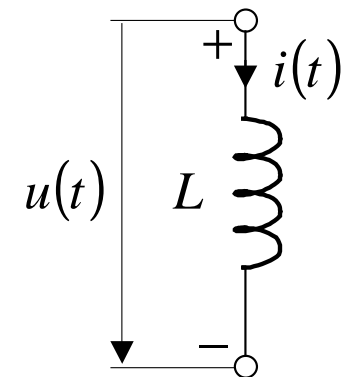




- **Kondenzator** s kapacitivnostjo C : $i(t) = C \frac{du(t)}{dt}$
 - kompleksni zapis impedance: $\underline{Z}_C = \frac{1}{j\omega C}$

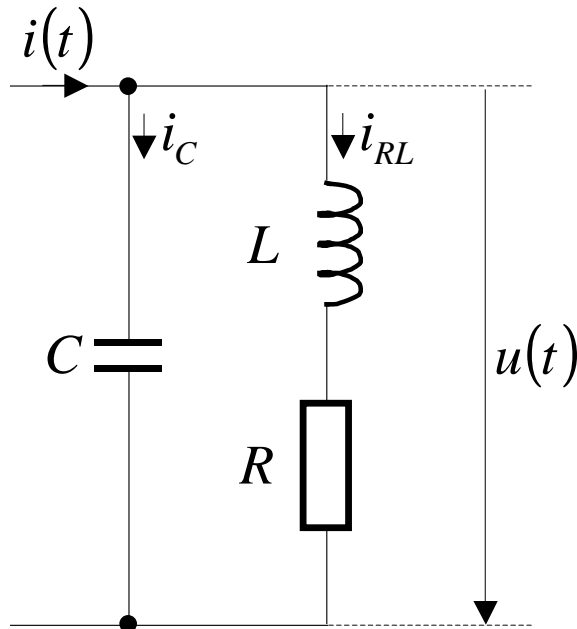


- **Tuljava** z induktivnostjo L : $u(t) = L \frac{di(t)}{dt}$
 - kompleksni zapis impedance: $\underline{Z}_L = j\omega L$





4.1.1 Realni upor

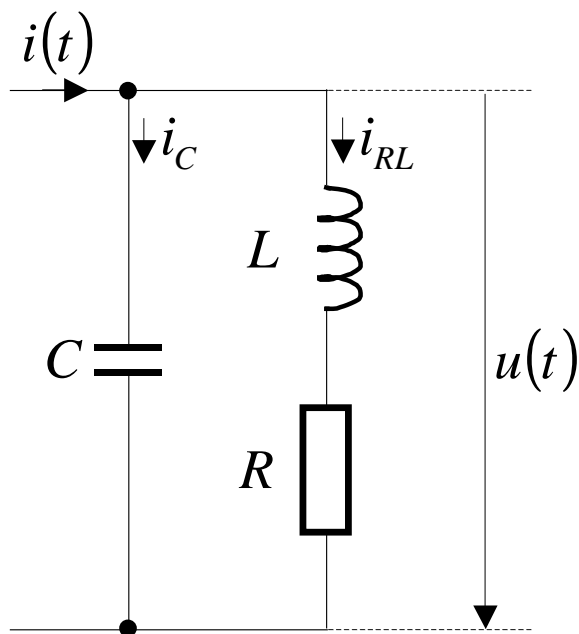


Vsak realni upor ima zaradi induktivnosti uporabljenega vodnika (npr. induktivnost žice navite na telo, itd.) še **induktivno komponento**, ki jo tipično ponazorimo z **zaporedno vezavo tuljavice** k upor, in tudi **kapacitivno komponento** zaradi stresane kapacitivnosti med obema koncema upora, ki jo ponazorimo z **vzporedno vezavo kondenzatorja**.

Impedanco danega vezja \underline{Z} sestavljata impedanca kapacitivne veje $\underline{Z}_C = 1/j\omega C$ in impedanca induktivne veje $\underline{Z}_{RL} = R + j\omega L$:

$$\frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \underline{Z} = \underline{Z}_C \parallel \underline{Z}_{RL} = \frac{\underline{Z}_C \cdot \underline{Z}_{RL}}{\underline{Z}_C + \underline{Z}_{RL}} = \frac{1/j\omega C (R + j\omega L)}{R + j\omega L + 1/j\omega C}$$





Dano vezje analizirajmo še v časovnem prostoru. Velja:

$$u = R i_{RL} + L \frac{di_{RL}}{dt}, \quad i_C = C \frac{du}{dt};$$

Vsota tokov v vozliščni točki je enaka nič.

Ker je $i_{RL} = i - i_C$, zapišemo:

$$u = R i_{RL} + L \frac{di_{RL}}{dt} = R \left(i - C \frac{du}{dt} \right) + L \frac{d}{dt} \left(i - C \frac{du}{dt} \right)$$

Po odvajanju in preureditvi dobimo nehomogeno linearno diferencialno enačbo člena drugega reda:

$$LC \frac{d^2 u}{dt^2} + RC \frac{du}{dt} + u = Ri + L \frac{di}{dt}$$





$$LC \frac{d^2 u}{dt^2} + RC \frac{du}{dt} + u = 0 - \text{homogeni del}$$

Če primerjamo karakteristični homogeni del enačbe z osnovno homogeno linearno diferencialno enačbo člena drugega reda

$$\frac{1}{\omega_0^2} \frac{d^2 u}{dt^2} + \frac{2\xi}{\omega_0} \frac{du}{dt} + u = 0$$

sta **stopnja dušenja** $\xi = \frac{RC\omega_0}{2} = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$ in **lastna kotna frekvenca** nedušenega nihanja člena drugega reda:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \bullet \text{ zelo visoka } (C_{\text{stresana}} \approx \times 10 \text{ pF}, L_{\text{vodnika}} \approx \times 10 \text{ nH}): \quad \omega_0 \approx 1 \text{ GHz}$$

Impedanco realnega upora sedaj zapišemo:

$$\underline{Z} = \frac{1/j\omega C (R + j\omega L)}{R + j\omega L + 1/j\omega C} = \frac{R + j\omega L}{1 + j\omega RC - \omega^2 LC} = \frac{R + j\omega L}{1 - \omega^2/\omega_0^2 + j\omega RC}$$





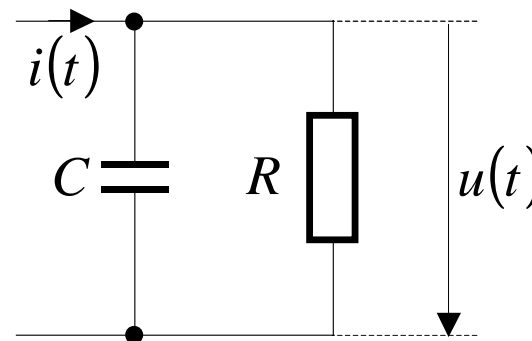
$$\underline{Z} = \frac{R + j\omega L}{1 - \omega^2 / \omega_0^2 + j\omega RC}$$

Kadar uporabljamo upor pri nižjih frekvencah $\omega^2 \ll \omega_0^2$, preide enačba impedance realnega upora v obliko: $\underline{Z} \doteq \frac{R + j\omega L}{1 + j\omega RC}$

in je **značaj impedance** odvisen od vrednosti upornosti.

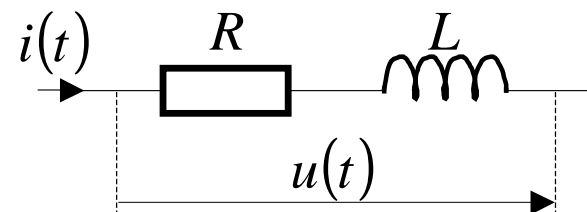
- pri **velikih vrednostih** upornostih ($R \gg \omega L$) dobimo **kapacitivni** značaj:

$$\underline{Z} \doteq \frac{R}{1 + j\omega RC}$$



- pri **majhnih vrednostih** upornostih ($R \ll 1/\omega C$) dobimo **induktivni** značaj:

$$\underline{Z} \doteq R + j\omega L$$





4.2 Zmanjšanje in prireditev napetostnih signalov

Za zmanjšanje in prireditev napetostnih signalov uporabljamo najbolj pogosto **napetostne delilnike** in **napetostne merilne transformatorje**.

Poznamo več vrst napetostnih delilnikov:

- uporovni delilnik,
- uporovno-kapacitivni delilnik,
- kapacitivni delilnik,
- induktivni delilnik,
- uporovni induktivno-kapacitivni delilnik, itd.





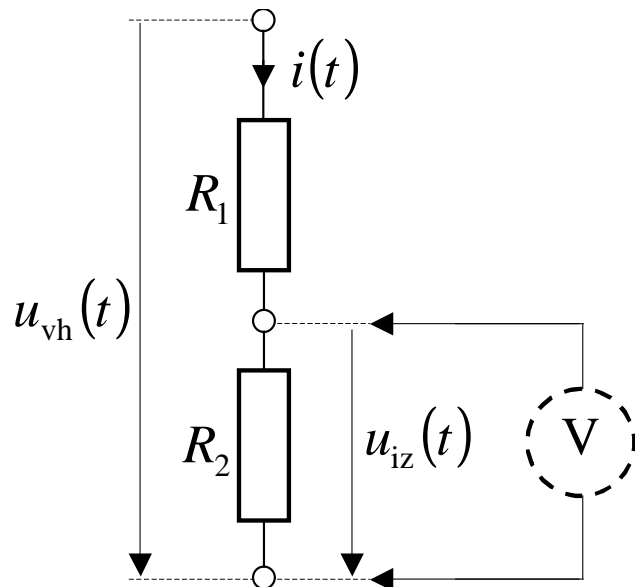
4.2.1 Napetostni delilniki

Napetostne delilnike v osnovi delimo na **uporovne**, **kapacitivne** in **induktivne**.

4.2.1.1 Uporovni napetostni delilnik

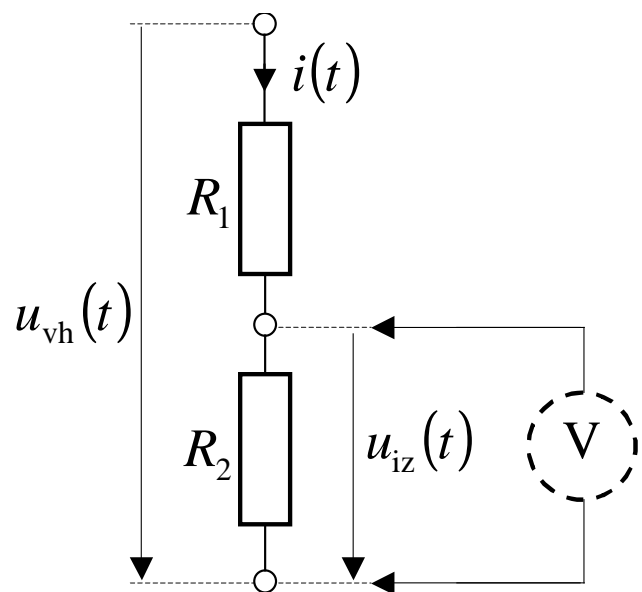
Izhodno in vhodno napetost povezuje enačba člena ničtega reda $u_{iz} = k \cdot u_{vh}$. Konstanto k določa **uporovni delilnik**:

$$k = \frac{u_{iz}}{u_{vh}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$



- Uporovni delilniki nudijo široko frekvenčno območje (od enosmernih vrednosti do več sto kilohertzov).
- Sami zase ne omogočajo galvanske ločitve vhodne napetosti od izhodne.





$$k = \frac{u_{iz}}{u_{vh}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Standardna negotovost prenosnega faktorja k se izrazi z:

$$u(k) = \sqrt{\left(\frac{\partial k}{\partial R_1} u(R_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial R_2} u(R_2)\right)^2} = \frac{1}{(R_1 + R_2)^2} \sqrt{(R_2 u(R_1))^2 + (R_1 u(R_2))^2}$$

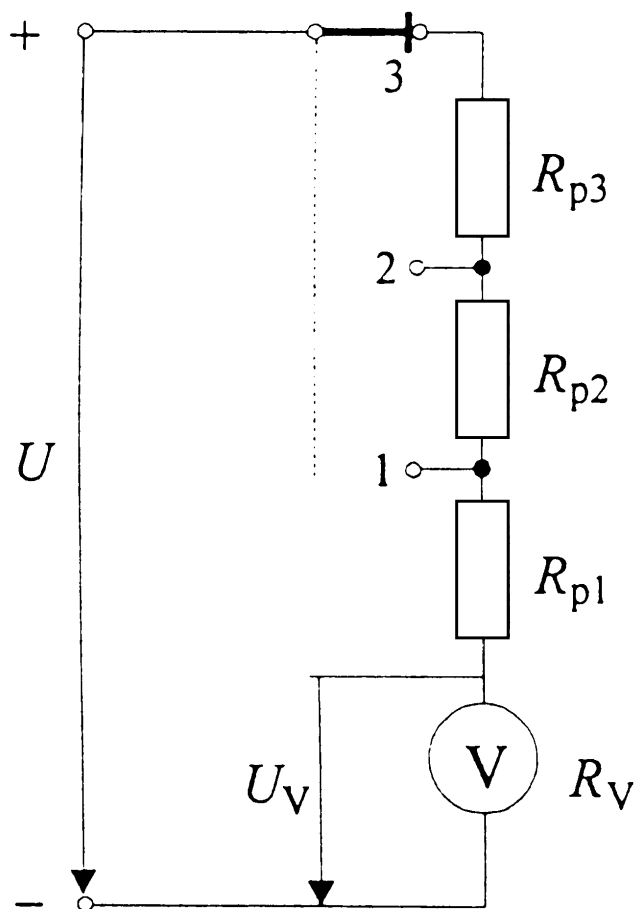
$$w(k) = \frac{u(k)}{k} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \sqrt{\left(\frac{u(R_1)}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{u(R_2)}{R_2}\right)^2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \sqrt{w^2(R_1) + w^2(R_2)}$$





Zaporedna razširitev merilnega območja voltmetra

Voltmetru razširimo merilno območje z zaporedno vezanim preduporom R_p (večkratni predupor).



Slika 4.9. Razširitev merilnega območja voltmetra

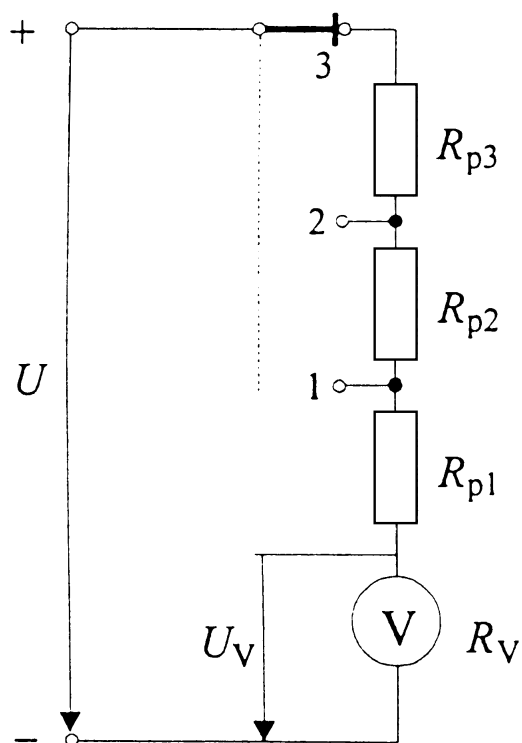
Merilni doseg (narisani položaj 3) je:

$$U_3 = \frac{U_V}{R_V} (R_{p1} + R_{p2} + R_{p3} + R_V)$$

$R_{V0} = \frac{R_V}{U_V}$ - karakteristična upornost voltmetra

- od $100\Omega/V$ do $100k\Omega/V$
- upornost, ki razširi merilno območje za en volt

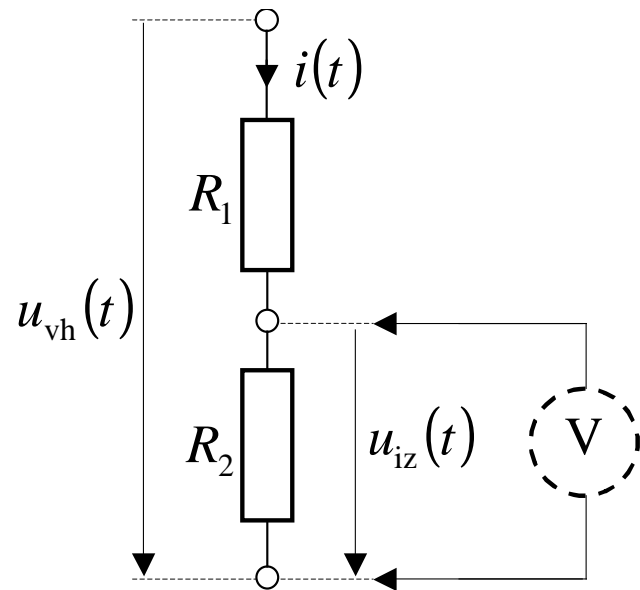




Primer: $R_{V0} = 10 \text{ k}\Omega/\text{V}$; $I_V = 1/(10 \text{ k}\Omega/\text{V}) = 100 \mu\text{A}$

- Če želimo razširiti območje za 100 V moramo imeti $R_p = 100 \text{ V} \cdot 10 \text{ k}\Omega/\text{V} = 1 \text{ M}\Omega$





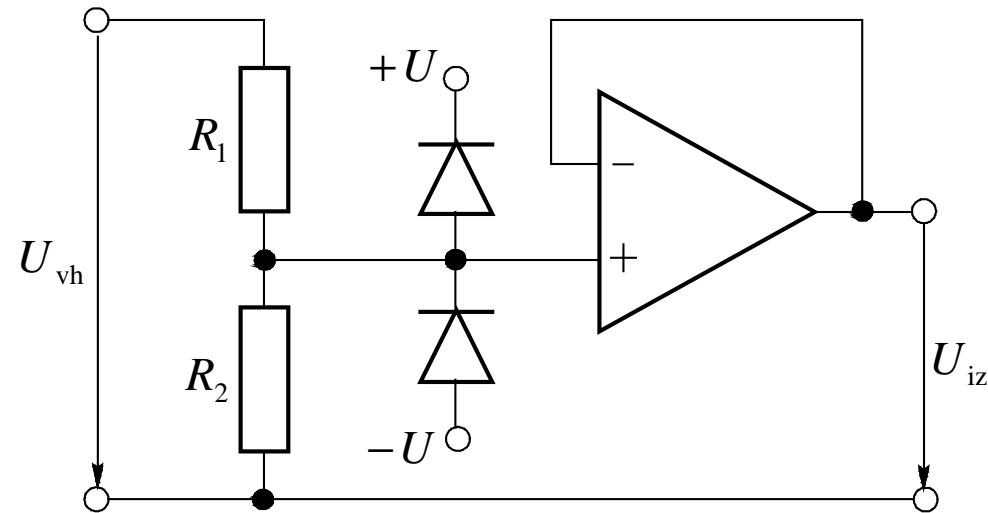
Skupna upornost $R_1 + R_2$ mora biti čim večja, kot kaže enačba dopustne moči, če želimo meriti veliko vhodno napetost.

$$R_1 + R_2 > U_{\text{vh}}^2 / P_{\text{max}}$$

- Večanje upornosti pa na drugi strani zmanjšuje dinamiko delilnika. Upori dobivajo kapacitivni značaj ($\tau \approx RC$).
- Za napetosti niskonapetostnega sekundarnega omrežja (230 V/ 400 V) so vrednosti upornosti delilnika okoli enega megaohma.

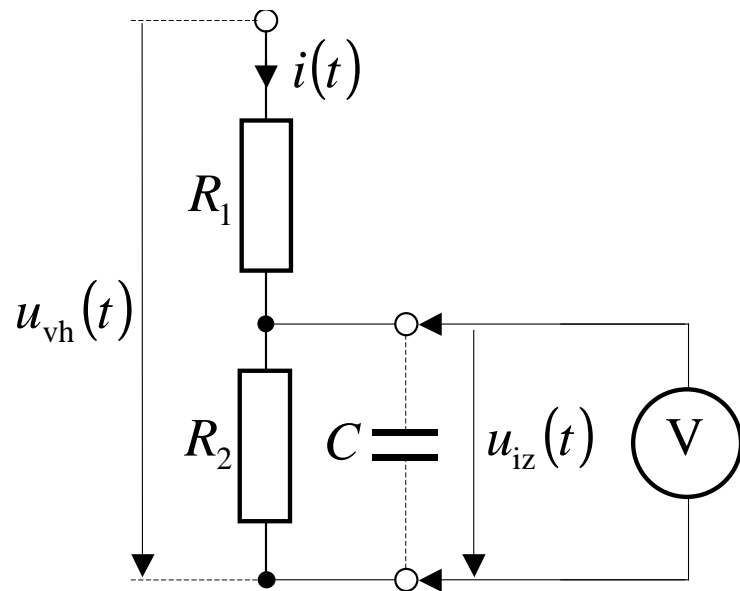


- Praktična realizacija napetostnega delilnika



Slika 4.11 Napetostni delilnik z diodno zaščito in impedančno ločitvijo

Za neobremenjenost izhoda delilnika lahko skrbi napetostni izravnalnik z visoko vhodno impedanco ($Z_{vh} \gg 1\text{M}\Omega \parallel 100\text{pF}$) in majhno preostalo napetostjo ($U_p \leq 100\mu\text{V}$), ki ima zaščiten vhod z diodama.



Pri dinamičnem obnašanju vezja pa ne moremo zanemariti vplive:

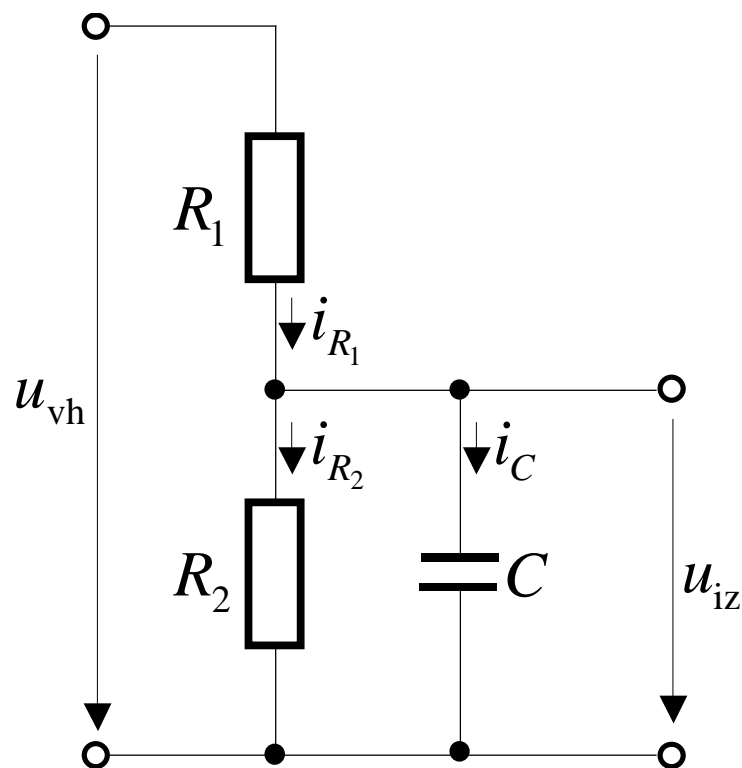
- stresane kapacitivnosti na uporu,
- kapacitivnosti vhodne stopnje voltmetra
- in priključnih kablov,

ki jih ponazorimo s kondenzatorjem C . Vpliv vhodne upornosti voltmetra lahko zanemarimo, ker je dovolj visoka (tipično $10\text{M}\Omega$) proti uporu R_2 .





S temi predpostavkami je za analizo pred nami naslednji merilni člen.



Velja:

$$i_{R_1} = \frac{u_{vh} - u_{iz}}{R_1}, \quad i_{R_2} = \frac{u_{iz}}{R_2}, \quad i_C = C \frac{du_{iz}}{dt}$$

Vsota tokov v vozliščni točki med uporoma je enaka nič ($i_{R_1} - i_{R_2} - i_C = 0$), zato zapišemo:

$$\frac{u_{vh} - u_{iz}}{R_1} - \frac{u_{iz}}{R_2} - C \frac{du_{iz}}{dt} = 0$$

Po preureditvi dobimo:

$$\frac{du_{iz}}{dt} + \frac{u_{iz}}{C} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{u_{vh}}{CR_1} \rightarrow \frac{du_{iz}}{dt} + \frac{u_{iz}}{C} \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} = \frac{u_{vh}}{CR_1}$$

$$\bullet \frac{du_{iz}}{dt} + \frac{1}{\tau} u_{iz} = \frac{k}{\tau} u_{vh}$$





$$\frac{du_{iz}}{dt} + \frac{1}{\tau} u_{iz} = \frac{k}{\tau} u_{vh}$$

V izrazu je τ časovna konstanta vezja, ki jo sestavljata delilno razmerje $k = R_2 / (R_1 + R_2)$ in časovna konstanta $\tau_1 = R_1 C$:

$$\tau = \frac{R_2}{R_1 + R_2} R_1 C = k R_1 C = k \tau_1$$

a) Odziv napetostnega delilnika na skočno spremembo vhodne napetosti $u_{vh} = U_0$

Napetostni delilnik aproksimiramo s členom 1. reda.

Rešitev diferencialne enačbe člena 1. reda $\frac{du_{iz}}{dt} + \frac{1}{\tau} u_{iz} = \frac{k}{\tau} u_{vh}$

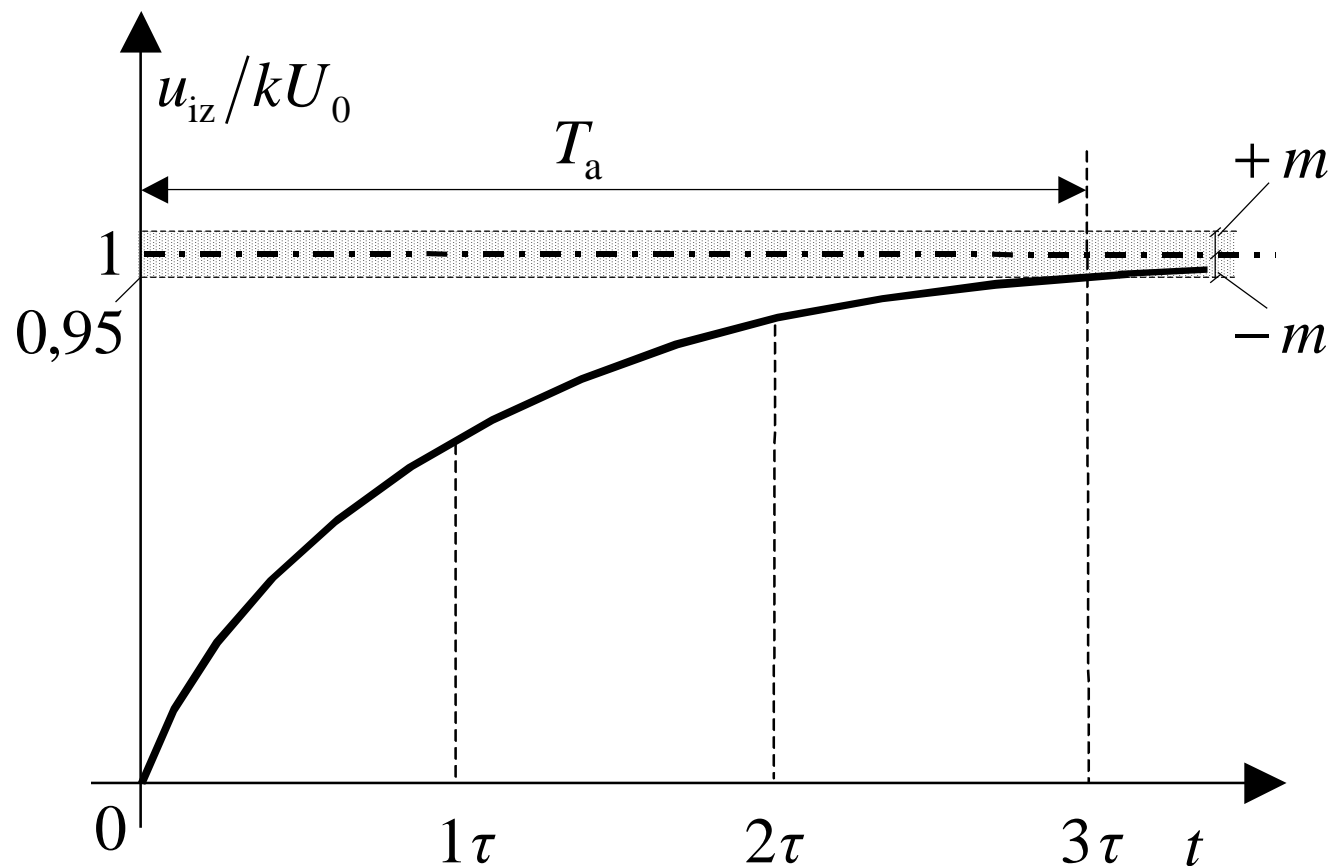
nam da:

$$u_{iz} = k U_0 (1 - e^{-t/\tau})$$





Potek izhodne napetosti prikazuje naslednja slika:



m	T_a / τ
0,1	2,30
0,05	3,00
0,01	4,61
0,005	5,30
0,001	6,91

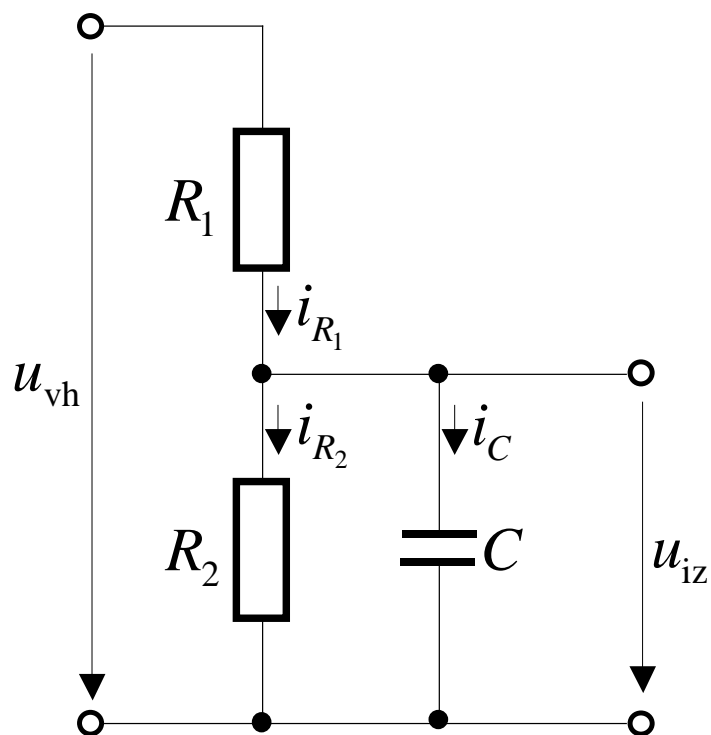
Pri željeni mejni vrednosti m , je odzivni čas enak:

$$\frac{u_{iz}}{kU_0} = 1 - m = \left(1 - e^{-T_a/\tau}\right) \Rightarrow T_a = \tau \ln(1/m)$$





b) Odziv napetostnega delilnika na sinusno obliko vhodne napetosti



Odnos med izhodno in vhodno napetostjo napetostnega delilnika določata upor R_1 in impedanca \underline{Z}_2 vzporedne vezave upora R_2 in kondenzatorja C :

$$\underline{Z}_2 = R_2 \parallel \frac{1}{j\omega C} = \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C}$$

Pri sinusni vzbujalni napetosti zapišemo za napetostni delilnik:

$$\underline{U}_{iz} = \underline{U}_{vh} \frac{\underline{Z}_2}{R_1 + \underline{Z}_2} = \underline{U}_{vh} \frac{\frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C}}{R_1 + \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C}} = \underline{U}_{vh} \frac{R_2}{(R_1 + R_2) + j\omega R_1 R_2 C} = \underline{U}_{vh} \frac{k}{1 + j\omega \tau}$$





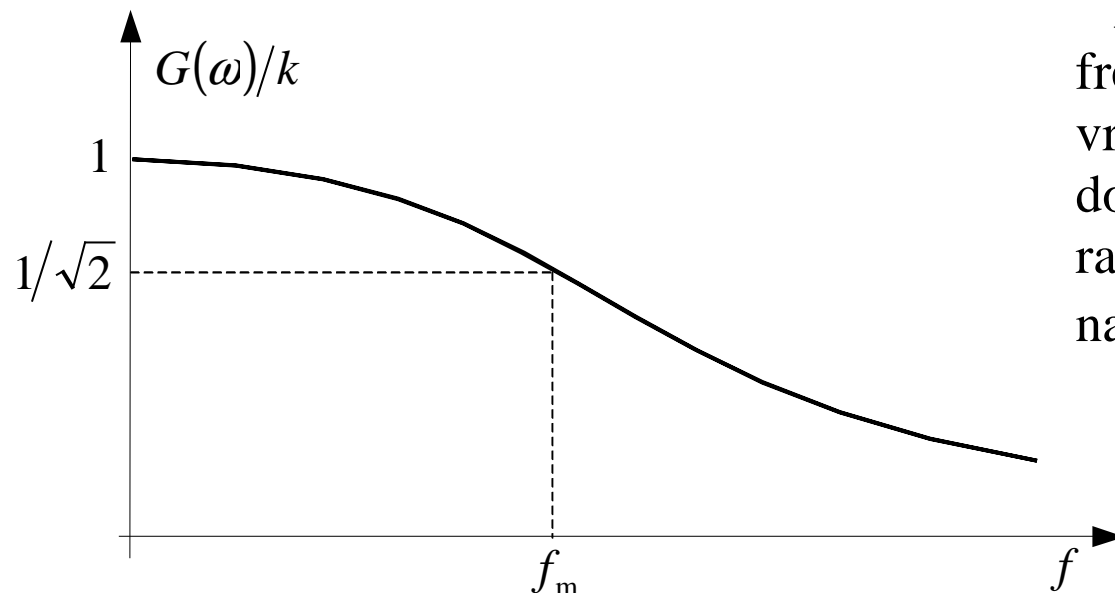
Razmerje izhodne in vhodne napetosti imenujemo frekvenčno karakteristiko $G(j\omega)$ in je v našem primeru:

$$G(j\omega) = \frac{\underline{U}_{iz}}{\underline{U}_{vh}} = \frac{U_{iz}(j\omega)}{U_{vh}(j\omega)} = \frac{k}{1 + j\omega\tau} = k \frac{1 - j\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2}$$

Njena absolutna vrednost je enaka:

$$|G(j\omega)| = G(\omega) = k \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2\tau^2}} = \frac{\hat{u}_2(\omega)}{\hat{u}_1(\omega)}$$

in se imenuje amplitudna karakteristika, prikazuje pa jo naslednja slika:



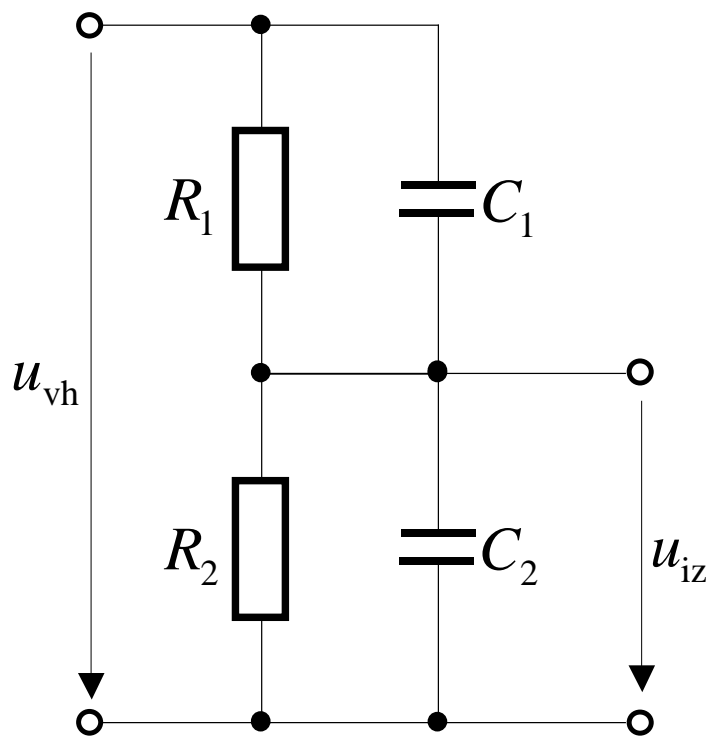
Frekvenčna meja je po dogovoru tista frekvenca, pri kateri pade absolutna vrednost frekvenčne karakteristike na določeno vrednost glede na statične razmere. Zelo razširjen kriterij je padec na $1/\sqrt{2}$. $f_m = 1/(2\pi\tau)$





4.2.1.2 Uporovno-kapacitivni delilnik

Kadar moramo upoštevati tudi kapacitivnost, paralelno k uporam R_1 , dobimo **uporovno-kapacitivni** delilnik:



$$\frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} = \frac{1}{1 + \underline{Z}_1/\underline{Z}_2} = \frac{1}{1 + \underline{Y}_2/\underline{Y}_1} = \frac{\underline{Y}_1}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2}$$

izražen z admitancama:

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

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

Delilnik je frekvenčno odvisen:

$$\frac{\underline{U}_{iz}}{\underline{U}_{vh}} = \frac{(1/R_1 + j\omega C_1)}{(1/R_1 + j\omega C_1) + (1/R_2 + j\omega C_2)} = \frac{(1 + j\omega R_1 C_1)/R_1}{(1 + j\omega R_1 C_1)/R_1 + (1 + j\omega R_2 C_2)/R_2}$$





$$\frac{\underline{U}_{iz}}{\underline{U}_{vh}} = \frac{(1/R_1 + j\omega C_1)}{(1/R_1 + j\omega C_1) + (1/R_2 + j\omega C_2)} = \frac{(1 + j\omega R_1 C_1)/R_1}{(1 + j\omega R_1 C_1)/R_1 + (1 + j\omega R_2 C_2)/R_2}$$

Če izberemo $R_1 C_1 = R_2 C_2$, ga naredimo frekvenčno neodvisnega

$$\frac{\underline{U}_{iz}}{\underline{U}_{vh}} = \frac{(1 + j\omega R_1 C_1)/R_1}{(1 + j\omega R_1 C_1)/R_1 + (1 + j\omega R_2 C_2)/R_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

- napetostno razmerje neodvisno od f .

Primer:

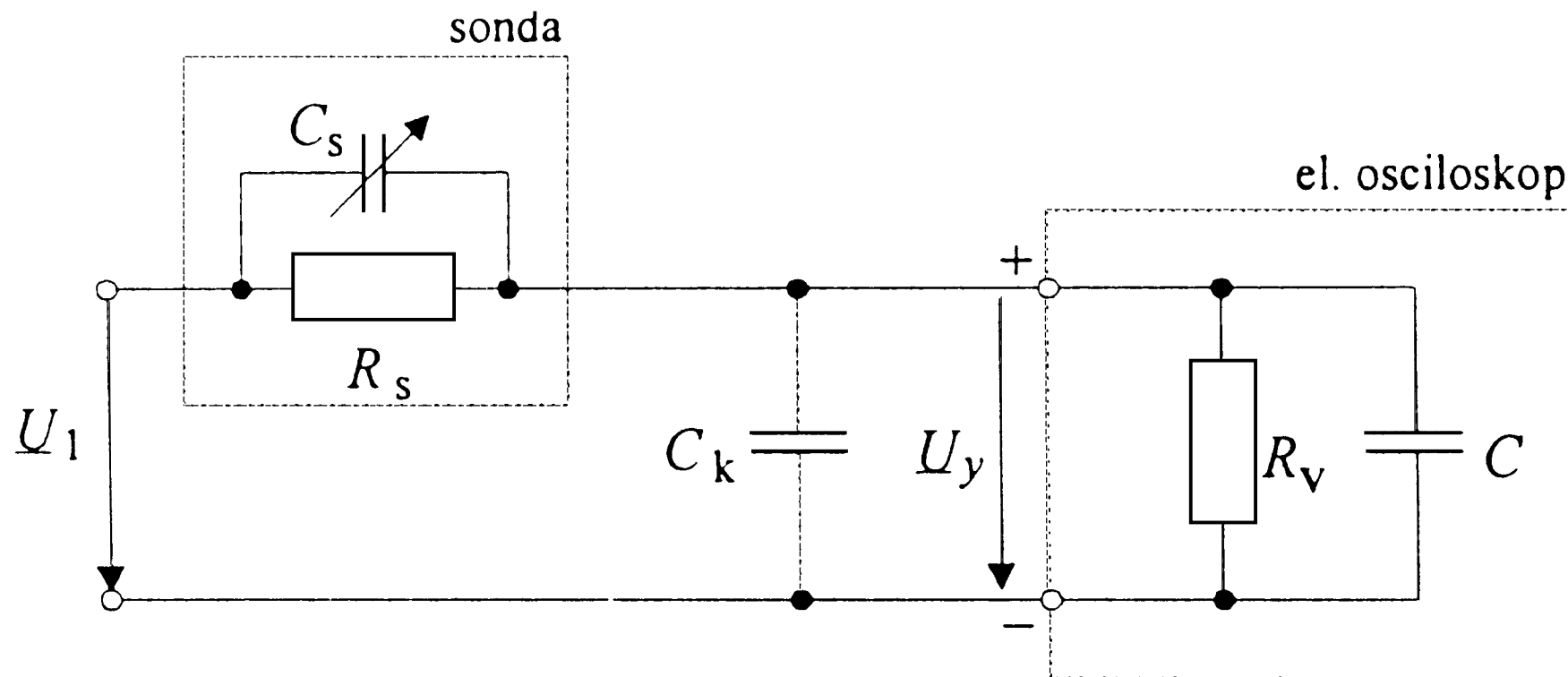
- Osciloskop z napetostno sondo





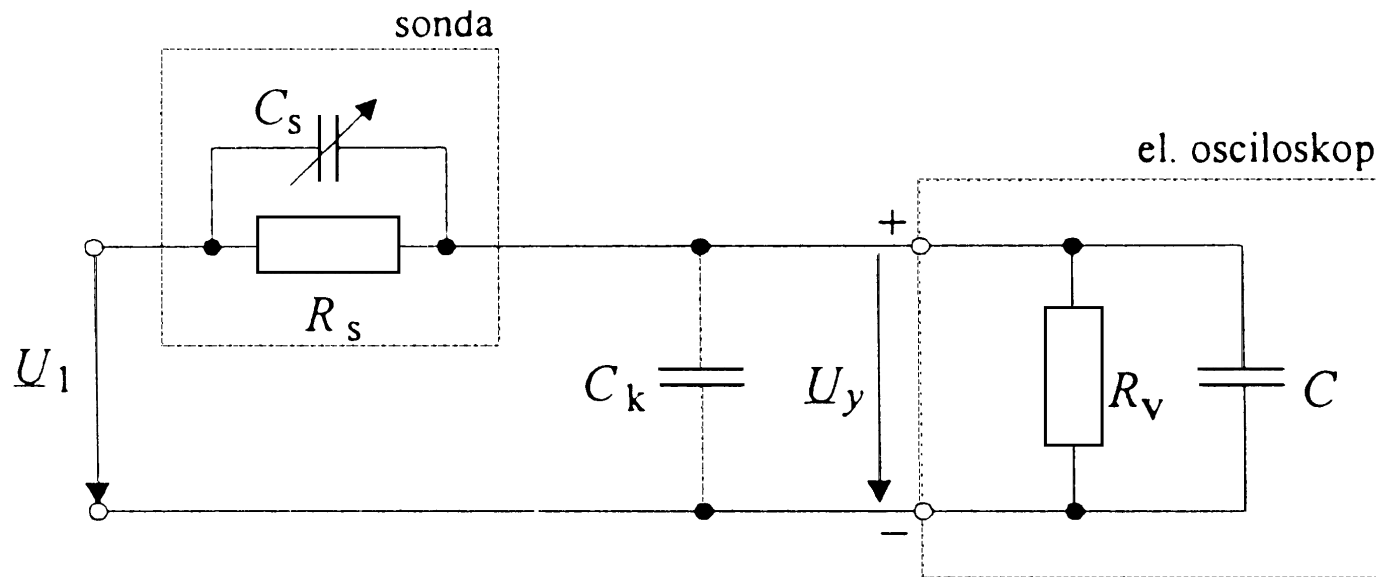
Osciloskop z napetostno sondo

Delilnik sestavljajo elementi **sonde**, **koaksialen kabel** in sam vhod EO (**BNC vhod**).



Slika 4.16 Nadomestno vezje osciloskopa z napetostno sondo





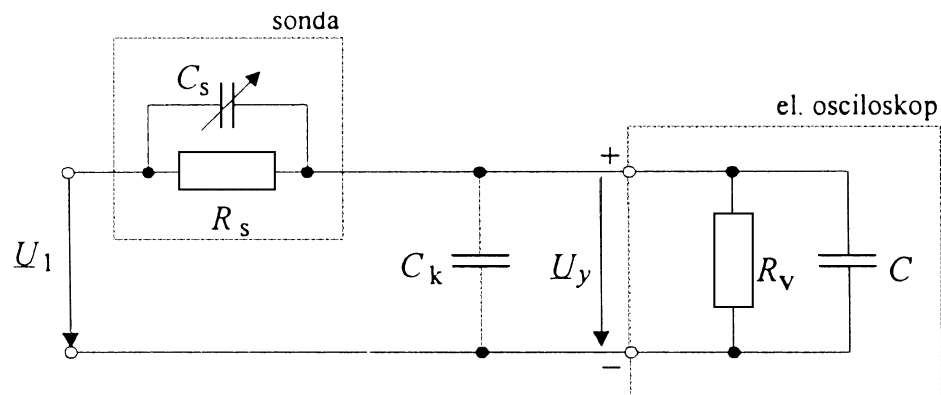
Vhodno impedanco osciloskopa sestavljata:

- **vzporedna upornost:** $R_v \approx 1\text{M}\Omega$,
- **kapacitivnost:** $C(30\text{pF} \div 50\text{pF})$.

Koaksialni kabel ima svojo impedanco, katere bistveni del je **kapacitivnost** C_k podana na dolžino (ca. 50pF/m).

- je frekvenčno odvisna. $C_v = C + C_k$





Frekvenčno odvisnost kompenziramo s **frekvenčno kompenzirano napetostno sondo**.

- ne pači signal, manj obremenjuje vir, signal pa slabi.

Napetostni delilnik:

$$\frac{U_y}{U_1} = \frac{Z_V}{Z_V + Z_s} = \frac{1}{1 + Z_s/Z_V} = \frac{1}{1 + Y_V/Y_s} = \frac{Y_s}{Y_s + Y_V} \quad \text{z elementi:}$$

$$\frac{U_y}{U_1} = \frac{(1/R_s + j\omega C_s)}{(1/R_s + j\omega C_s) + (1/R_v + j\omega C_v)} = \frac{(1 + j\omega R_s C_s)/R_s}{(1 + j\omega R_s C_s)/R_s + (1 + j\omega R_v C_v)/R_v}$$

- s C_s nastavimo $R_s C_s = R_v C_v$ in **kompenziramo** sondo:

$$\frac{U_y}{U_1} = \frac{R_v}{R_v + R_s} = \frac{C_s}{C_s + C_v} \quad \text{- napetostno razmerje neodvisno od } f$$



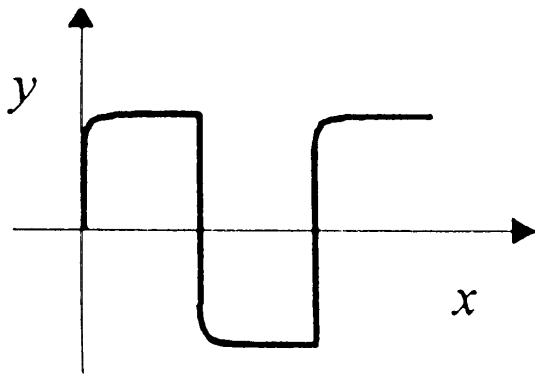


- sondo kompenziramo s pomočjo **pravokotnega signala** (priključek na osciloskopu):

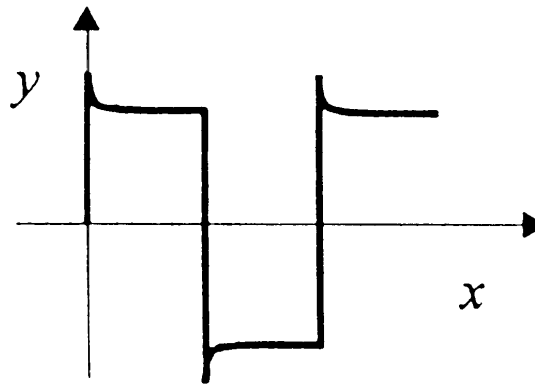
- **podkompenzirana (a):** $R_s C_s < R_v C_v$

- **nadkompenzirana (b):** $R_s C_s > R_v C_v$,

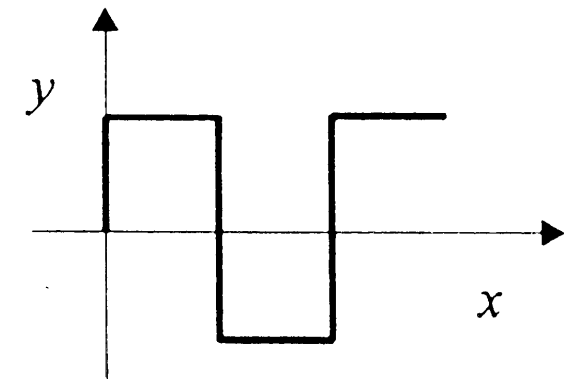
- **pravilno kompenzirana (c):** $R_s C_s = R_v C_v$,



a)



b)



c)

Slika 4.17 Slika na zaslonu EO za različne stopnje kompenzacije sonde





Impedanca osciloskopa je še vedno **odvisna** od **frekvence**:

$$\underline{Z} = \underline{Z}_s + \underline{Z}_v = \frac{1}{\underline{Y}_s} + \frac{1}{\underline{Y}_v} = \frac{1}{1/R_s + j\omega C_s} + \frac{1}{1/R_v + j\omega C_v} = \frac{R_s + R_v}{1 + j\omega R_v C_v}$$

- če je sonda 1:10, je \underline{Z} deskrat večja kot \underline{Z}_v brez sonde.

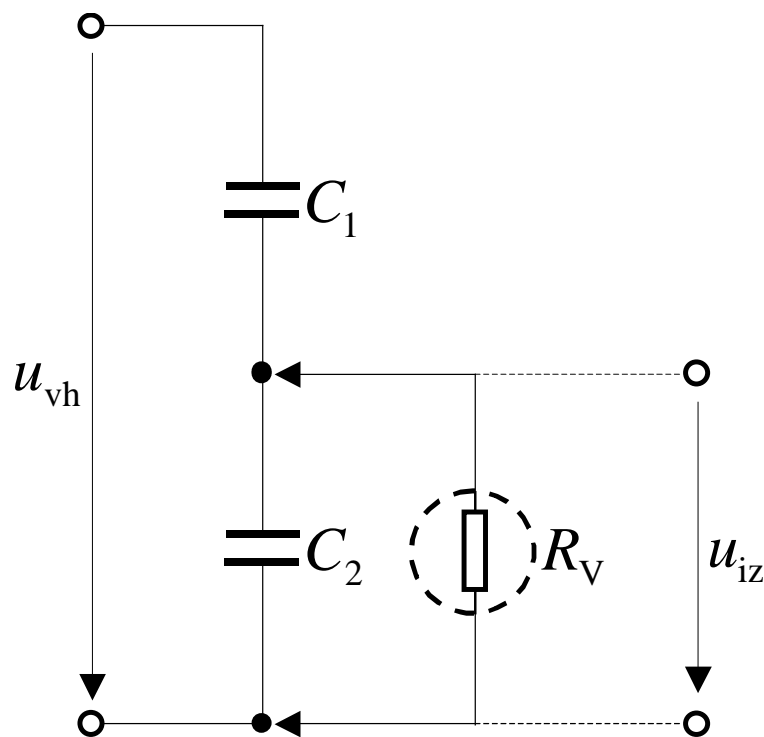
$$\underline{Z} = \frac{R_s + R_v}{R_v} \frac{R_v}{1 + j\omega R_v C_v} = \frac{R_s + R_v}{R_v} \frac{1}{1/R_v + j\omega C_v} = 10 \underline{Z}_v$$





4.2.1.3 Kapacitivni napetostni delilnik

Napetostno območje lahko razširimo tudi s kapacitivnim delilnikom. **Kapacitivni delilniki** se običajno uporabljajo za merjenje napetosti višjih od 150 kV. Sestavljeni so iz zaporedno vezanih kondenzatorjev C_1 in C_2 ($C_1 \ll C_2$).

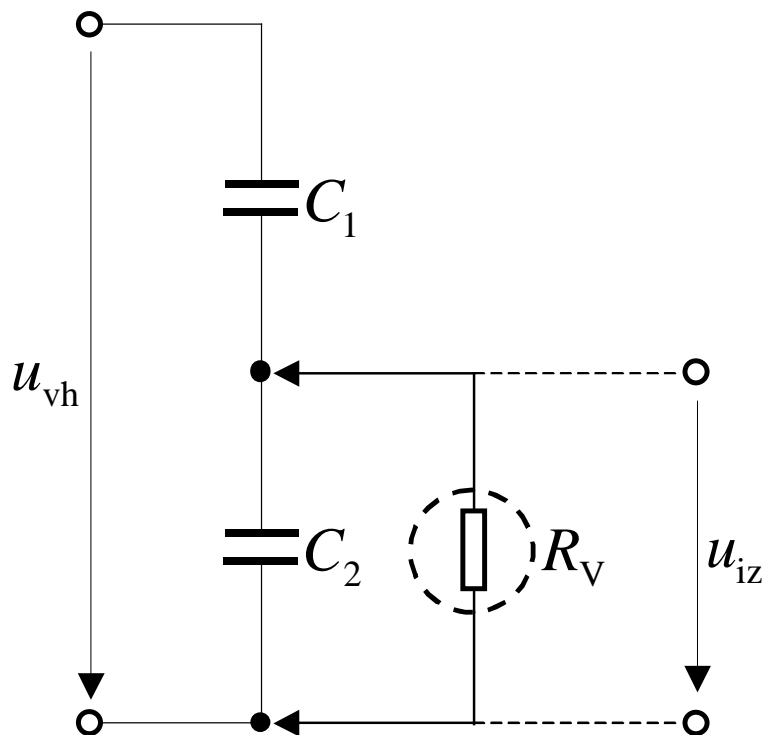


Odnos med izhodno in vhodno napetostjo kapacitivnega delilnika določata impedanca $\underline{Z}_1 = 1/j\omega C_1$ in impedanca \underline{Z}_2 vzporedne vezave kondenzatorja C_2 in upornosti voltmetra R_V :

$$\underline{Z}_2 = R_V \parallel \frac{1}{j\omega C_2} = \frac{R_V}{1 + j\omega R_V C_2}$$

Slika 4.18 Kapacitivni delilnik





Pri sinusni vzbujaalni napetosti zapišemo za kapacitivni delilnik:

$$\underline{U}_{iz} = \underline{U}_{vh} \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} = \underline{U}_{vh} \frac{\frac{R_v}{1 + j\omega R_v C_2}}{\frac{1}{j\omega C_1} + \frac{R_v}{1 + j\omega R_v C_2}}$$

Problem te vezave je upornost voltmetra, saj močno vpliva na izmerjeno napetost. Če bi bila upornost voltmetra neskončna, bi bila napetost odvisna samo od kondenzatorjev.

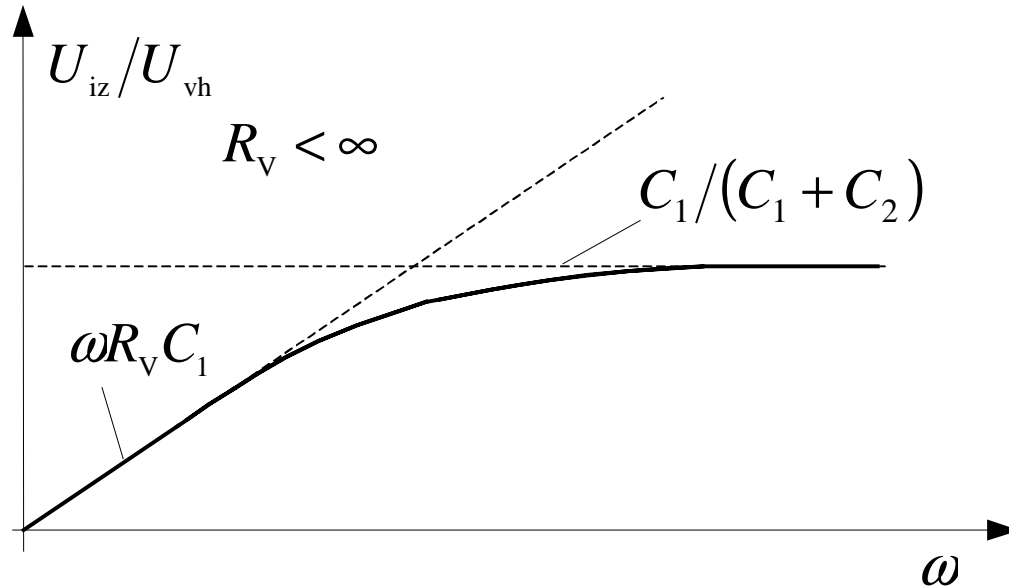
$$R_v = \infty \Rightarrow \frac{U_{iz}}{U_{vh}} = \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$





Ob končni upornosti voltmetra temu ni tako.

$$U_{iz} = \frac{j\omega \frac{C_1}{C_1 + C_2}}{j\omega + \frac{1}{R_V(C_1 + C_2)}} \cdot U_{vh} \approx \begin{cases} j\omega R_V C_1 U_{vh} & \Leftarrow R_V \ll \frac{1}{j\omega(C_1 + C_2)} \\ \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_{vh} & \Leftarrow R_V \gg \frac{1}{j\omega(C_1 + C_2)} \end{cases}$$



Napetost na delilniku se razdeli v razmerju:

$$\frac{U_{iz}}{U_{vh}} = \frac{\omega R_V C_1}{\sqrt{1 + (\omega R_V)^2 (C_1 + C_2)^2}}$$





Poglejmo si razmere na primeru. Denimo, da je

$$U_{\text{vh}} = 100 \text{ kV}, U_{\text{iz}} = 100 \text{ V}, C_1 = 1 \text{ nF}, C_2 = 999 \text{ nF}$$

- Ob navedenih podatkih je impedanca delilnika Z_{iz} (notranja impedanca delilnika na izhodu):

$$Z_{\text{iz}} = \frac{1}{\omega (C_1 + C_2)} \approx 3,2 \text{ k}\Omega \quad (f = 50 \text{ Hz})$$

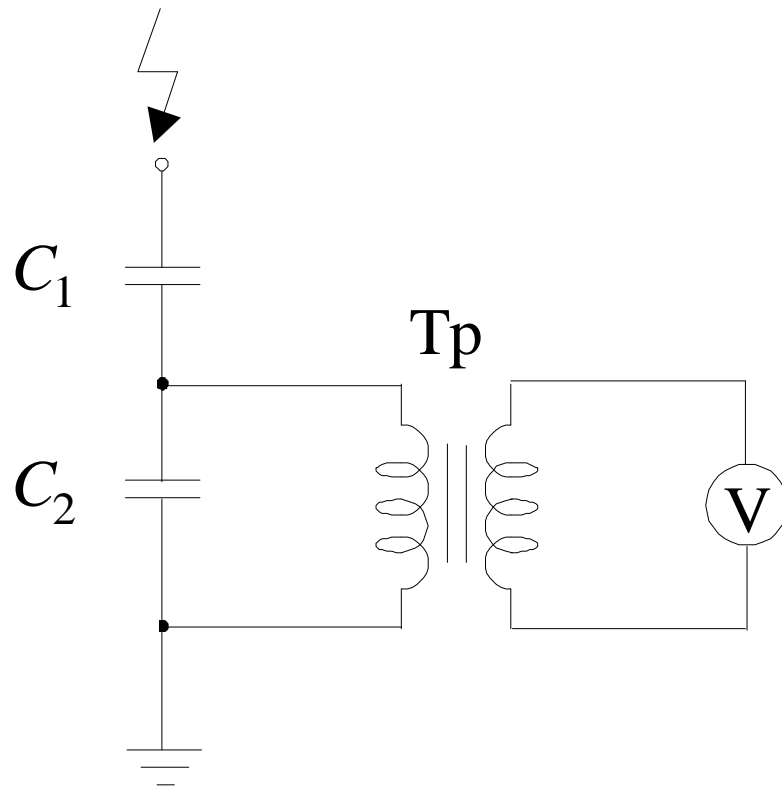
- Nazivna obremenitev napetostnega delilnika z nazivno močjo $S_n = 10 \text{ VA}$ je

$$Z_n = \frac{U_{\text{iz}}^2}{S_n} = \frac{100^2 \text{ V}^2}{10 \text{ VA}} = 1 \text{ k}\Omega = R_v$$

- Vidimo, da je nazivna obremenitev (upornost voltmetra) celo manjša od impedance delilnika, kar vnaša nesprejemljiv sistematični pogrešek zaradi vključitve instrumentarija. Med obema je sicer 90° zamik, kar nekoliko ublaži razmere.



Vpliva prenizke obremenitve se lahko znebimo tako, da delilno razmerje kapacitivnega delilnika zmanjšamo in uporabimo dodatni merilni transformator.



Slika 4.20 Kapacitivni delilnik s transformatorjem

Naj bo nazivna prestava tega transformatorja $k_{T_p} = 10 \text{ kV} / 100 \text{ V} = 100$. Zato mora biti delilno razmerje kapacitivnega delilnika zmanjšano na 10.

$$U_{\text{vh}} = 100 \text{ kV}, U_{\text{iz}} = 10 \text{ kV},$$

$$C_1 = 1 \text{ nF}, C'_2 = 9 \text{ nF} \Rightarrow Z_{\text{iz}} \approx 0,32 \text{ M}\Omega$$

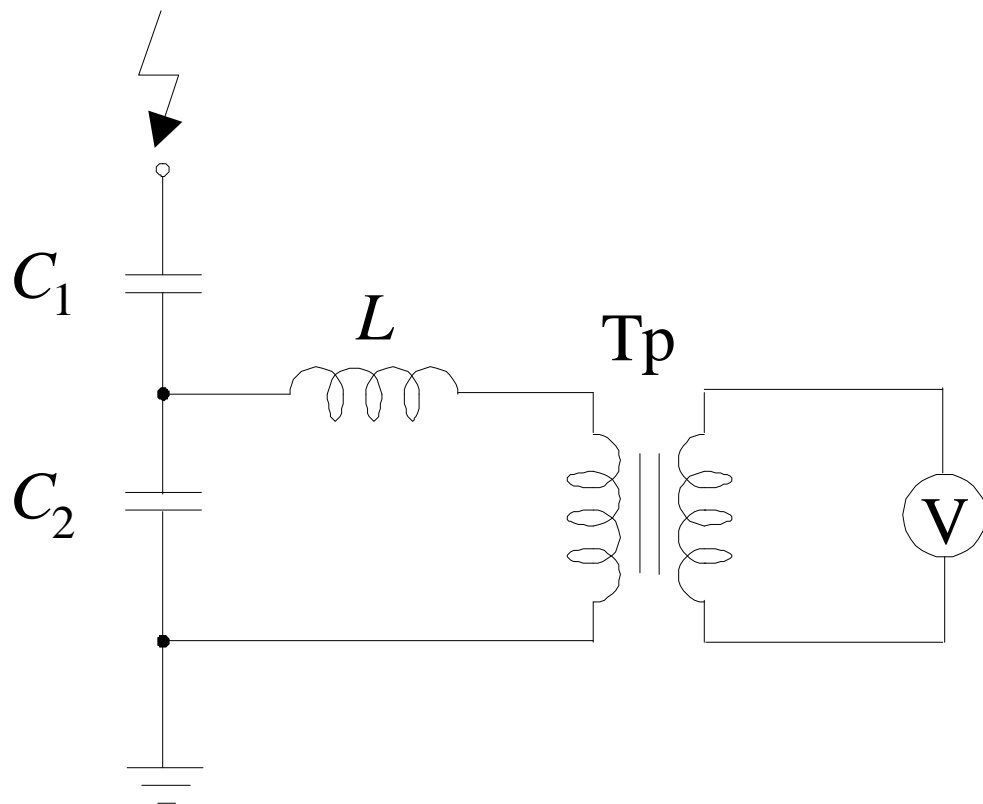
Upornost voltmetra na primarni strani transformatorja, ki jo čuti kapacitivni delilnik, pa je: $(10 \text{ kV} / 100 \text{ V})^2 1 \text{ k}\Omega = 10 \text{ M}\Omega$

Na ta način je postala upornost instrumentarija ($10 \text{ M}\Omega$) večja, kot je impedanca kapacitivnega delilnika Z_{iz} ($0,32 \text{ M}\Omega$), kar sistematični pogrešek zmanjša.





Opisani sistematični pogrešek zaradi vključitve instrumentarija pa lahko še bolj zmanjšamo, če uporabimo dodatno kompenzacijsko tuljavo, ki hkrati izniči tudi fazne premike (ni kotnih pogreškov).



Ker ima impedanca delilnika $Z_{iz} \approx 0,32 \text{ M}\Omega$ negativno imaginarno komponento, jo s primerno dimenzionirano tuljavico (pozitivna imaginarna komponenta) lahko učinkovito izničimo.

$$\omega L = 1/(\omega (C_1 + C_2))$$

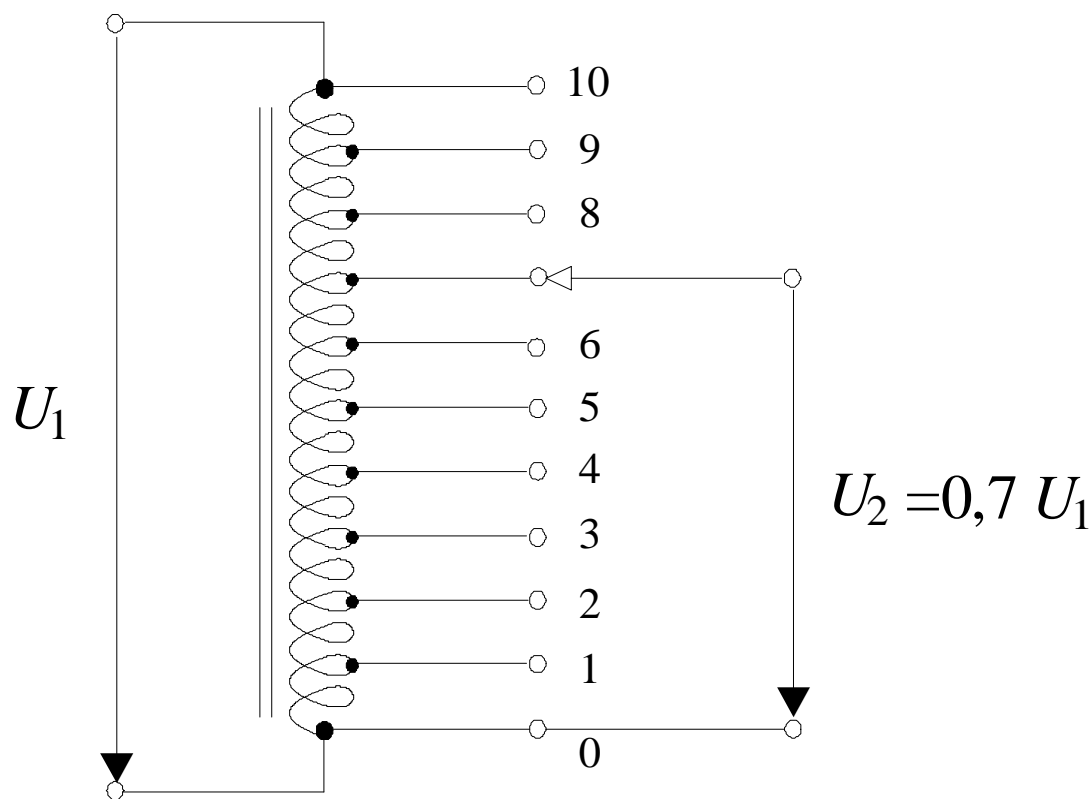
Slika 4.21 Kapacitivni delilnik s transformatorjem in tuljavo





4.2.1.4 Induktivni napetostni delilnik

Induktivni delilniki so napetostniki - napetostni transformatorji, ki s svojimi odcepi omogočajo zelo natančne porazdelitve pritisnjene napetosti.



Slika 4.22 Člen induktivnega delilnika

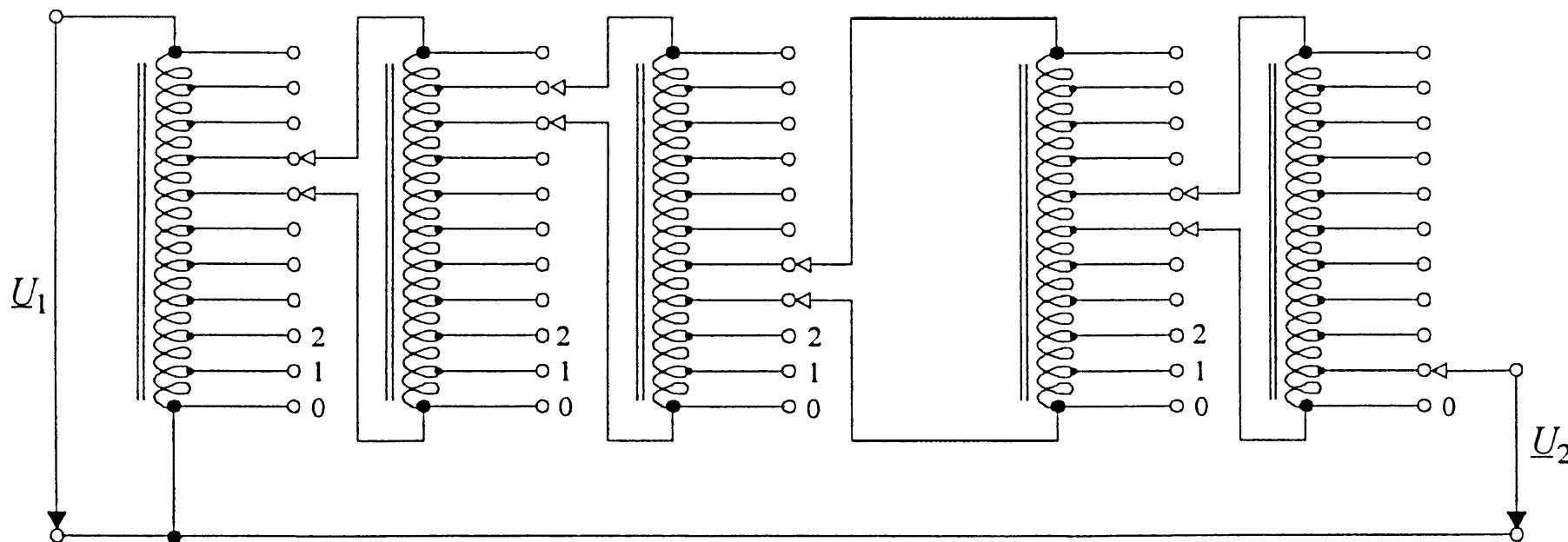
Visoko točnost dosežemo s prepletanjem vodnikov enakih presekov, ki so naviti okoli jedra odlične magnetne vodljivosti. Vodniki so nato vezani zaporedno.

Takšna vezava omogoča, da teče po vsakem delu praktično enak magnetni pretok, zaradi česar se v vseh delih inducira enaka napetost.





Več takšnih členov lahko vežemo v kaskado (verigo), tako da dobimo celo 8-stopenjske kaskade z zelo točno napetostno prestavo. Dosežemo lahko napetostne pogreške manjše od 10^{-7} .



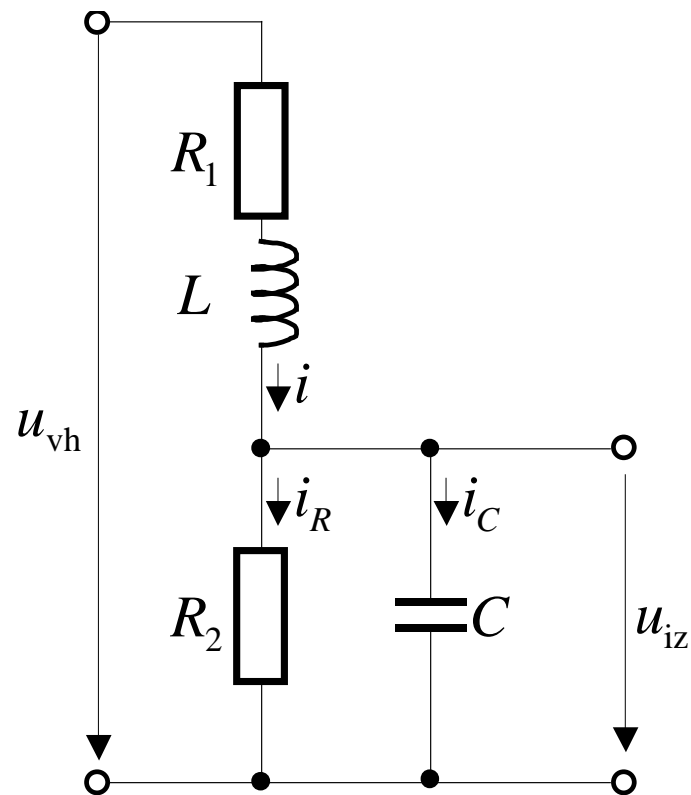
Slika 4.23 Večstopenjski induktivni delilnik $\underline{U}_2 = 0,683xxx51\underline{U}_1$

- bremenitev predhodne deкаде je minimalna, ker je magnetilni tok majhen,
- izhodna impedanca je majhna, ker je žica velikega preseka.





4.2.1.5 Uporovni induktivno-kapacitivni napetostni delilnik



Kadar zmanjšamo napetostni signal le delno ($<1\%$), je upor R_1 precej manjši kot upor R_2 in imamo namesto upora R_1 serijsko nadomestno vezavo z induktivnostjo (velja za majhne vrednosti upornosti) in poleg upora R_2 še paralelno nadomestno vezavo kapacitivnosti (velja za velike vrednosti upornosti).

Dano vezje analizirajmo v časovnem prostoru. Velja:

$$u_{vh} = R_1 i + L \frac{di}{dt} + u_{iz} \quad \text{in} \quad i = i_R + i_C = \frac{u_{iz}}{R_2} + C \frac{du_{iz}}{dt}$$





$$u_{\text{vh}} = R_1 i + L \frac{di}{dt} + u_{\text{iz}} \quad \leftarrow \quad i = i_R + i_C = \frac{u_{\text{iz}}}{R_2} + C \frac{du_{\text{iz}}}{dt}$$

Po vstavitvi toka iz druge enačbe v prvo, odvajanju in preureditvi dobimo linearno **diferencialno enačbo drugega reda**:

$$u_{\text{vh}} = \frac{R_1}{R_2} u_{\text{iz}} + R_1 C \frac{du_{\text{iz}}}{dt} + \frac{L}{R_2} \frac{du_{\text{iz}}}{dt} + LC \frac{d^2 u_{\text{iz}}}{dt^2} + u_{\text{iz}}$$

$$LC \frac{d^2 u_{\text{iz}}}{dt^2} + \left(R_1 C + \frac{L}{R_2} \right) \frac{du_{\text{iz}}}{dt} + \frac{R_1 + R_2}{R_2} u_{\text{iz}} = u_{\text{vh}}$$

Če primerjamo dobljeno enačbo z osnovno linearno diferencialno enačbo člena drugega reda

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = x$$





so parametri obnašanja merilnega člena drugega reda naslednji:

- **prenosni faktor** ali delilno razmerje stacionarnega stanja:

$$k = \frac{u_{iz}}{u_{vh}} = \frac{1}{a_0} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

- **lastna kotna frekvenca** nedušenega nihanja:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{a_0}{a_2}} = \sqrt{\frac{R_1 + R_2}{R_2 LC}}$$

- **in stopnja dušenja:**

$$\xi = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0 a_2}} = \frac{R_1 C + L/R_2}{2\sqrt{LC \cdot (R_1 + R_2)}/R_2}$$

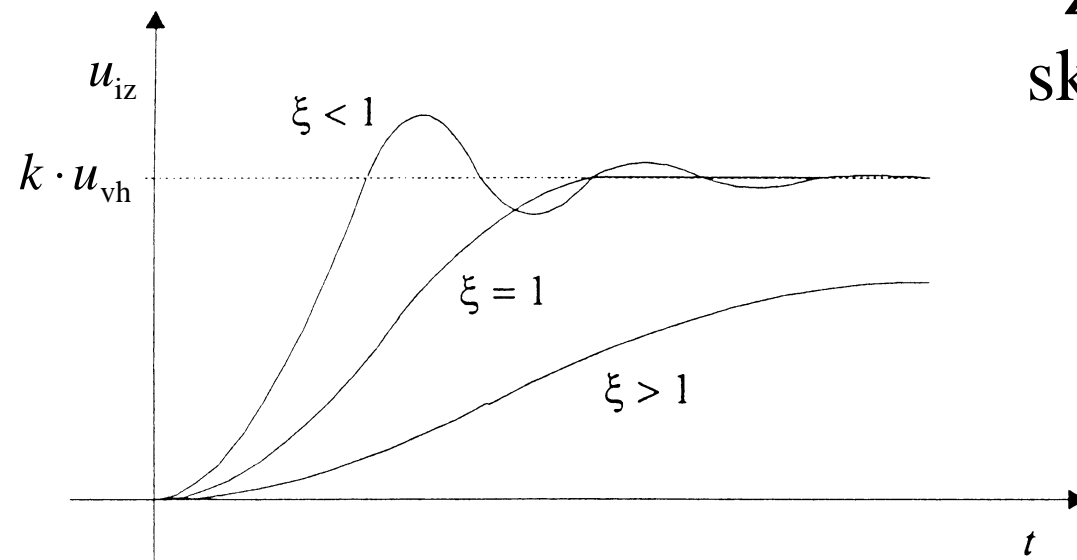




Če se vhodna veličina – napetost – **hipno spremeni**, izhodna napetost merilnega člena **ne more v trenutku** zavzeti nove vrednosti.

Tudi **ustaviti se ne more v trenutku** (niha okrog novega ravnovesnega položaja).

- Da lahko čim hitreje odčitamo novo vrednost, mora biti **nihanje dušeno**.



Značilne odzive razdelimo v tri skupine:

- podkritično dušenje $\xi < 1$,
- kritično dušenje $\xi = 1$,
- nadkritično dušenje $\xi > 1$.

Slika 4.25 Gibanje izhodne napetosti po prikjučitvi stalne napetosti na vходу

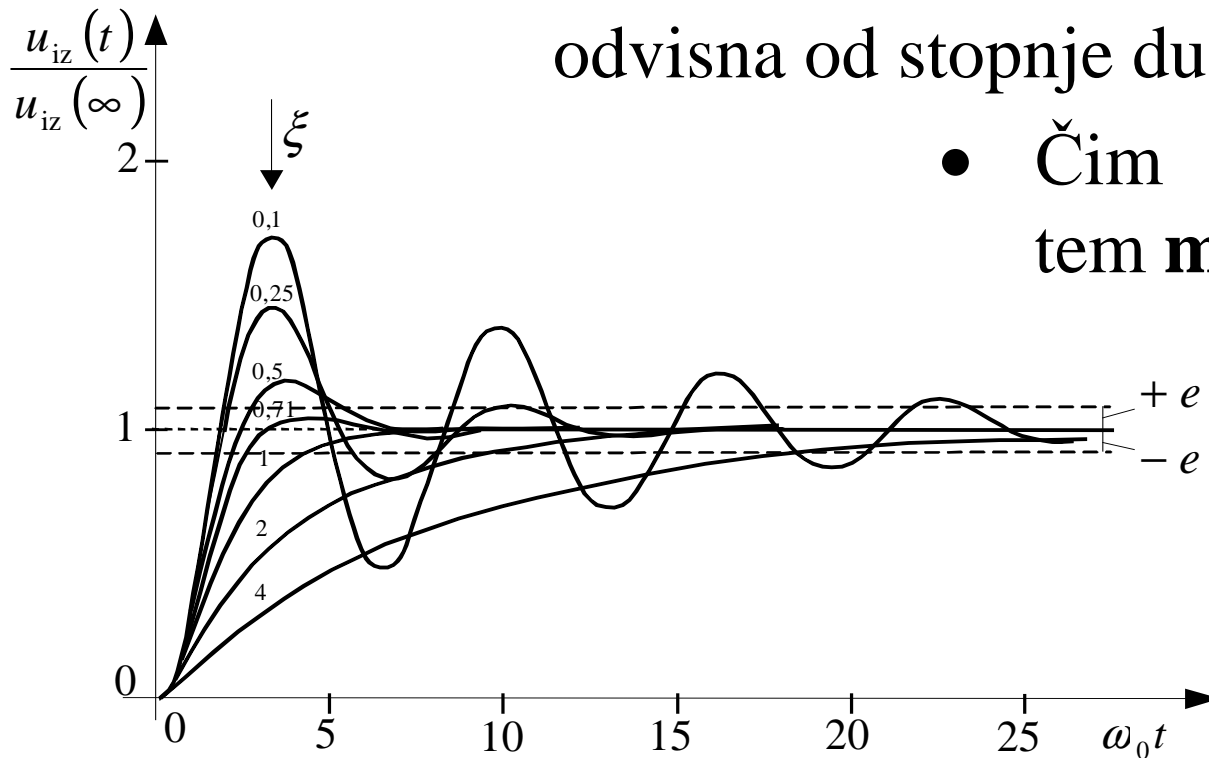




Če je stopnja dušenja $\xi < 1$, je rešitev enačbe dušeno nihanje:

$$\frac{u_{iz}}{u_{vh}} = 1 - \frac{e^{-\xi\omega_0 t}}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin\left(\sqrt{1-\xi^2} \omega_0 t + \arccos \xi\right)$$

- Za **podkritično dušenje** je **kotna frekvenca** ω_d odvisna od stopnje dušenja: $\omega_d = \omega_0 \cdot \sqrt{1-\xi^2}$
 - Čim **večja** je stopnja dušenja, tem **manjša** je **kotna frekvenca**.



Slika 4.26: Primeri različnih vrst odzivov sistema drugega reda na stopničasti vhod



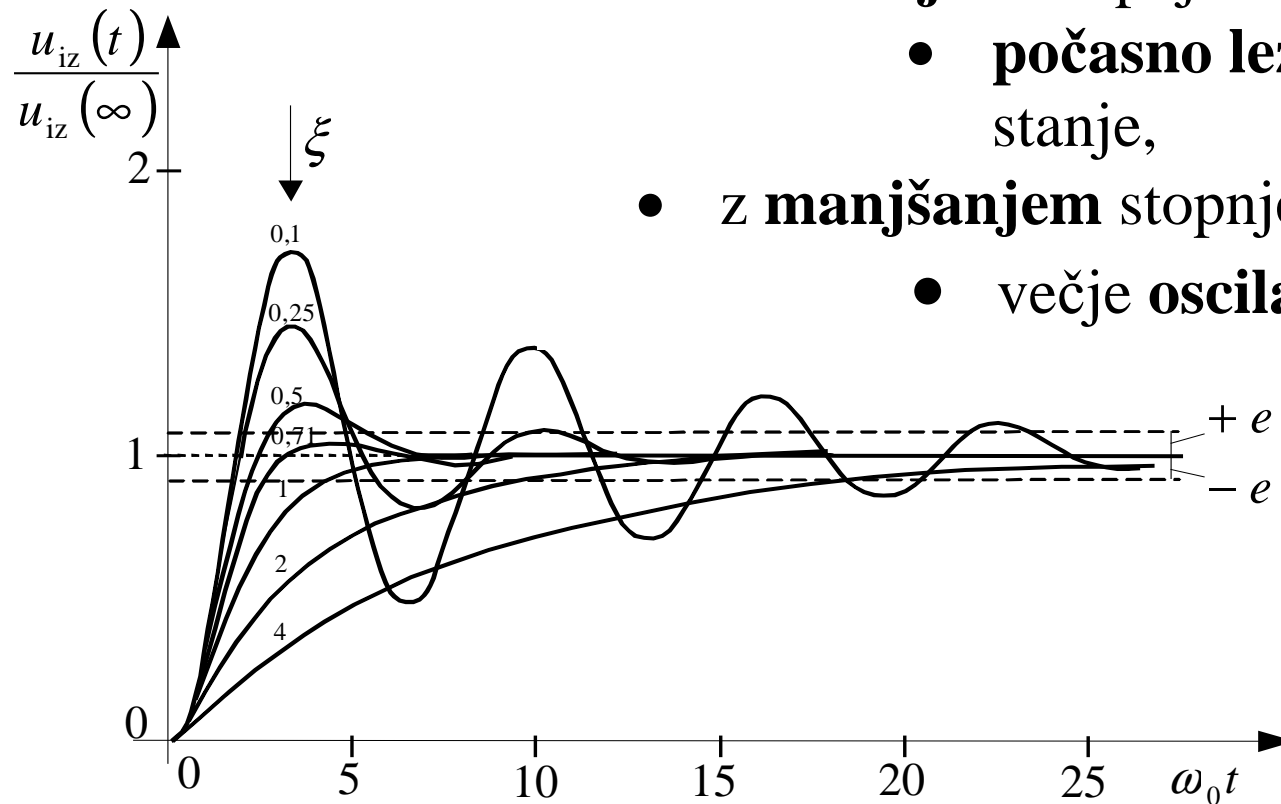


Dvižni čas je čas, ki je potreben, da signal izhoda preleti interval med 10% in 90% svoje končne vrednosti.

- Čim **večja** je **stopnja dušenja**, tem **daljši** je **dvižni čas**.

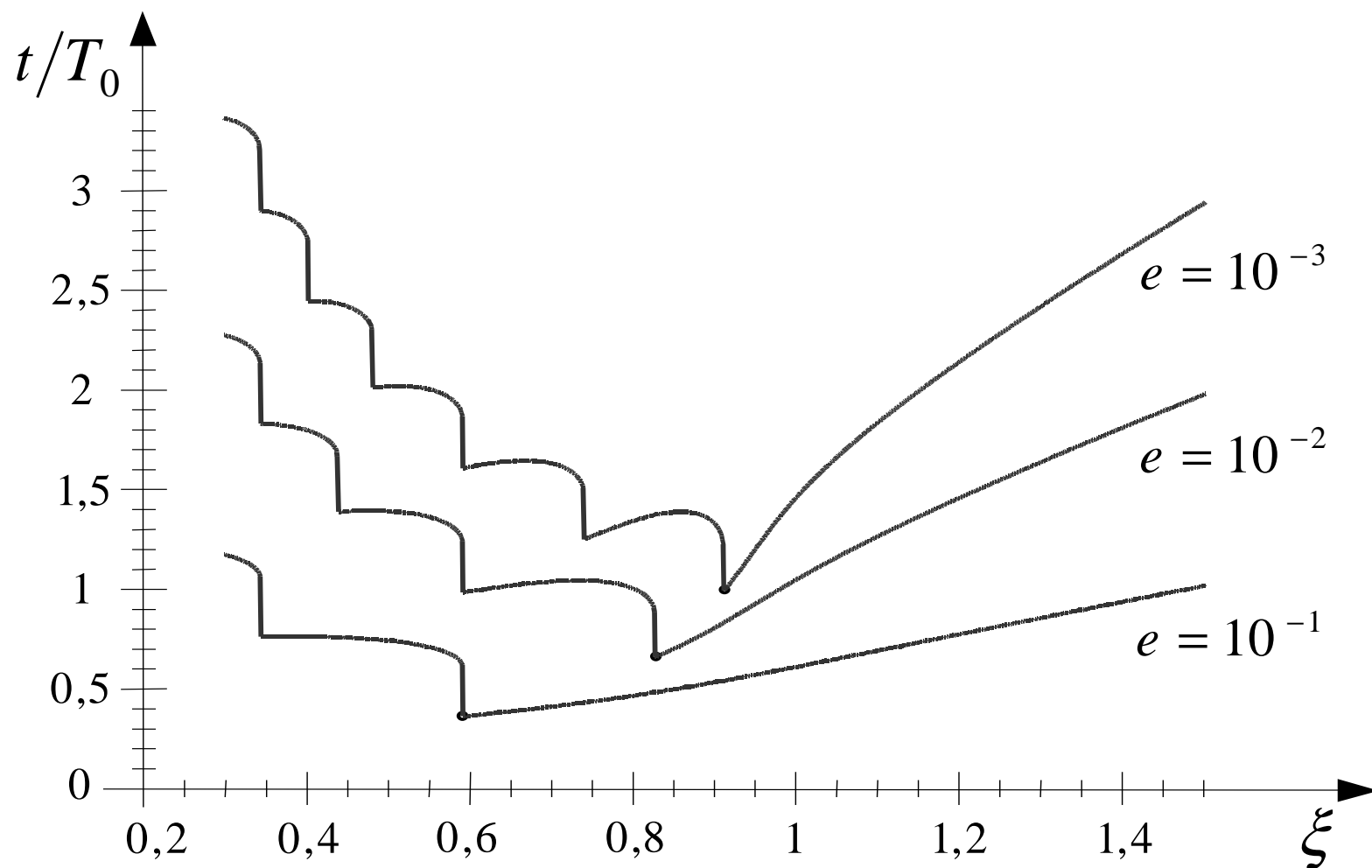
Odzivni čas merilnega člena znotraj odstopanja e od končnega odklona se:

- z **večanjem** stopnje dušenja **povečuje**
 - **počasno lezenje** v novo stacionarno stanje,
- z **manjšanjem** stopnje dušenja **tudi povečuje**,
 - večje **oscilacije**.



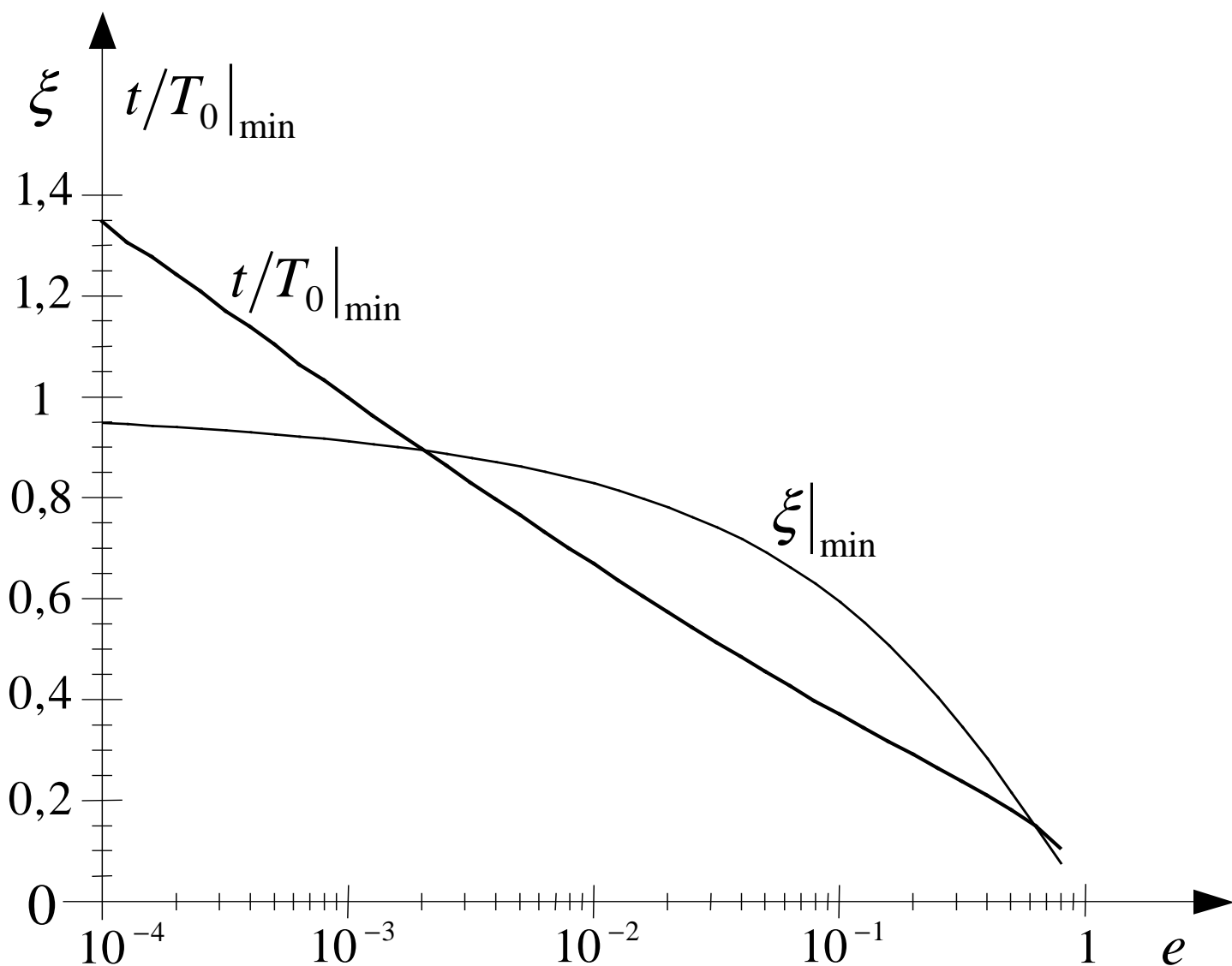
Kompromisna vrednost stopnje dušenja: $\xi = 0,8 \div 0,9$





Slika 4.27 Odzivni čas v odvisnosti od stopnje dušenja pri različnih vrednostih e ($T_0 = 2\pi/\omega_0$ - nihajni čas nedušenega nihanja)





Slika 4.28 Najkrajši odzivni čas in stopnja dušenja v odvisnosti od e





Odziv člana drugega reda na sinusno obliko

Če imamo na vходу **sinusna obliko** napetostnega signala, je takšne oblike **v ustaljenem stanju** tudi izhodna napetost:

$$u_{\text{vh}} = \hat{u}_{\text{vh}} e^{j\omega t} \Rightarrow u_{\text{iz}} = \hat{u}_{\text{iz}} e^{j(\omega t + \varphi)}$$

Kompleksna oblika enačbe spreminjanja je:

$$LC \frac{d^2 u_{\text{iz}}}{dt^2} + \left(R_1 C + \frac{L}{R_2} \right) \frac{du_{\text{iz}}}{dt} + \frac{R_1 + R_2}{R_2} u_{\text{iz}} = u_{\text{vh}}$$

$$a_2 \frac{d^2 u_{\text{iz}}}{dt^2} + a_1 \frac{du_{\text{iz}}}{dt} + a_0 u_{\text{iz}} = u_{\text{vh}}$$

- kjer sta odvoda: $\frac{du_{\text{iz}}}{dt} = j\omega \hat{u}_{\text{iz}} e^{j(\omega t + \varphi)} = j\omega u_{\text{iz}}$

$$\frac{d^2 u_{\text{iz}}}{dt^2} = -\omega^2 u_{\text{iz}}$$





Relativna frekvenca: $\nu = \omega / \omega_0$

- razmerje frekvence ω vsiljene napetosti v primerjavi z lastno frekvenco nedušenega nihanja.

Povezava med vhomom in izhodom je:

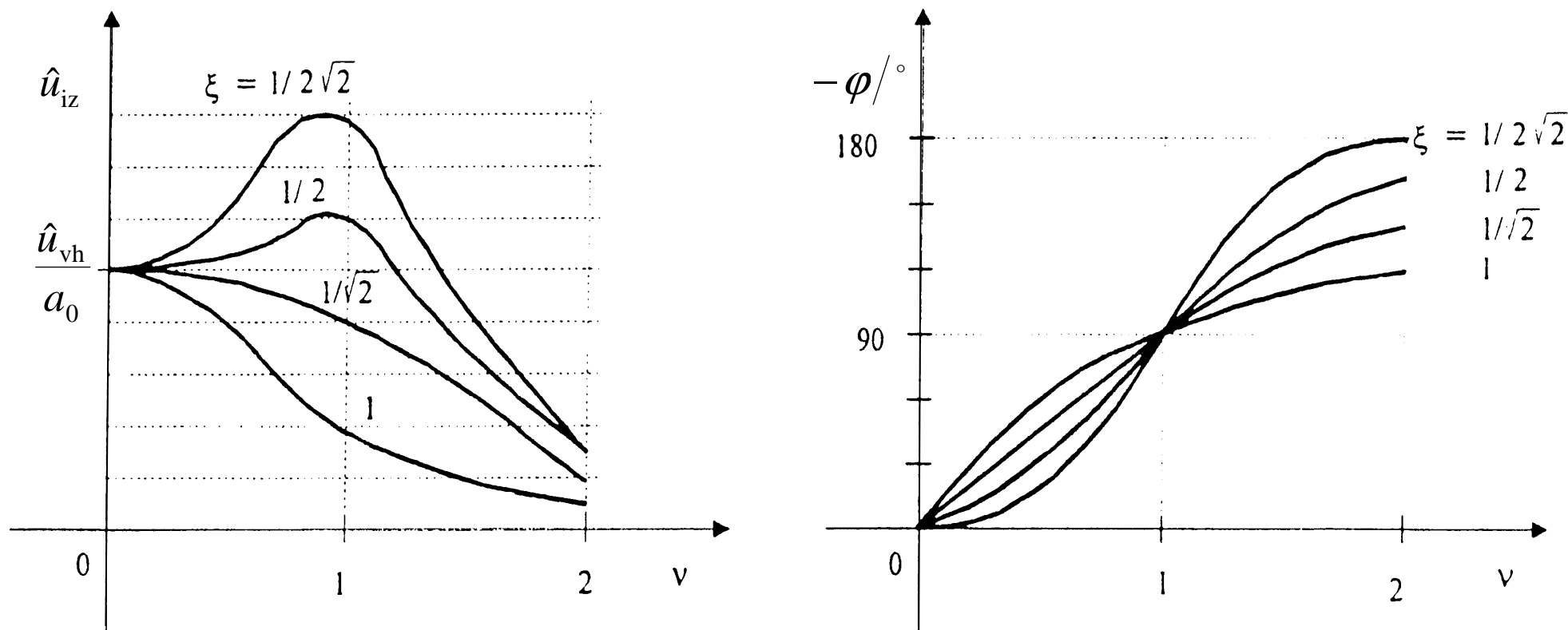
$$u_{iz} = \frac{u_{vh}}{a_0 - \omega^2 a_2 + j\omega a_1} \quad \text{OZ.} \quad u_{iz} = \frac{u_{vh}}{a_0} \cdot \frac{1}{(1 - \nu^2) + j2\nu\xi}$$

Zanimata nas temenska vrednost izhodnega signala
(amplitudna karakteristika):

$$\hat{u}_{iz} = \frac{\hat{u}_{vh}}{a_0} \frac{1}{\sqrt{(1 - \nu^2)^2 + (2\nu\xi)^2}}$$

in fazni zamik **(fazna karakteristika):** $\varphi = -\arctg \frac{2\nu\xi}{1 - \nu^2}$





Slika 4.29 Amplitudni in fazni odziv merilnega člana drugega reda
 $\hat{u}_{iz} = \hat{u}_{vh}/a_0$ - odklon pri konstantni vhodni napetosti





Kadar je **lastna frekvenca majhna** se merilni člen drugega reda obnaša kot **nizkoprepustni filter**.

- Za **odklon** je bolj pomembna **povprečna vrednost**.

Primer: $\xi = 1$, $T_0 = 1\text{s}$, frekvenca vzbujanja je $f = 50\text{Hz}$
Kolikokrat manjši je odklon kot pri konstantnem vzbujanju $f = 0\text{Hz}$?

$$\nu = \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{2\pi/T}{2\pi/T_0} = T_0 f = 1\text{s} \cdot 50\text{Hz} = 50$$

$$\frac{a_0 \hat{u}_{iz}}{\hat{u}_{vh}} = \frac{1}{\sqrt{(1-\nu^2)^2 + (2\nu\xi)^2}} = \frac{1}{\sqrt{(1-50^2)^2 + (2 \cdot 50 \cdot 1)^2}} = 4 \cdot 10^{-4}$$

- Tako male relativne spremembe zaznamo le z instrumentom, ker **človeško oko** tega **ne opazi**.





4.2.2 Napetostni merilni transformator

Z njim **razširimo** (zožimo) **merilno območje** voltmetrov, vatmetrov itn.

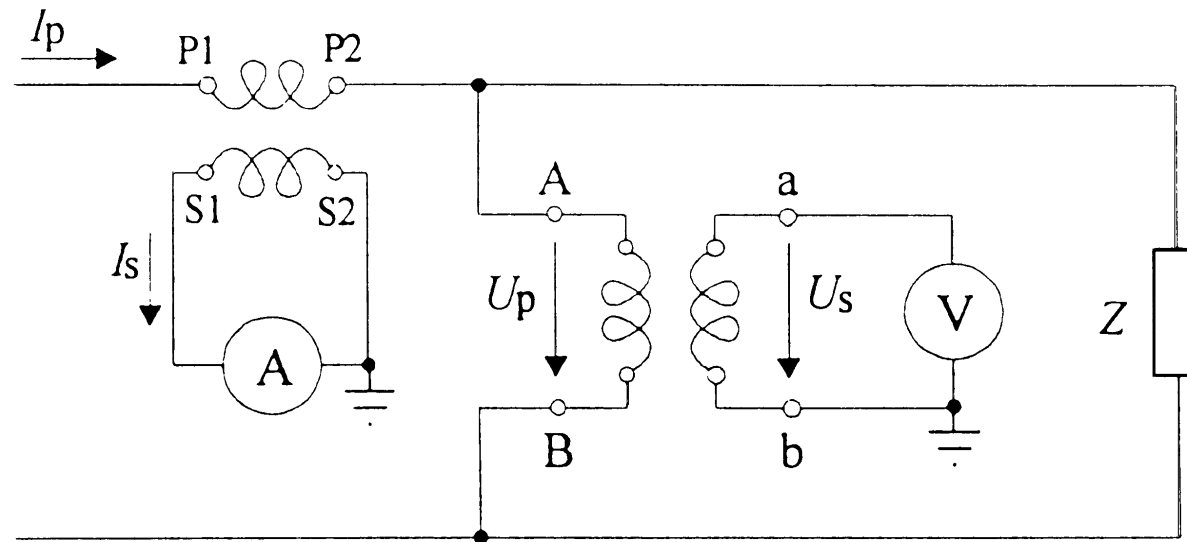
Sestavljen je iz:

- **feromagnetnega jedra,**
- **primarnega navitja,**
- **in galvansko ločenega sekundarnega navitja.**

Poznamo:

- **tokovni merilni transformator** (tokovnik),
- **napetostni merilni transformator** (napetostnik).





Slika 4.30 Priključek tokovnika in napetostnika

Poznati moramo **prestavo** transformatorja (K_i oz. K_u):

- $U_p = K_u U_s$ - za napetostnik
 - napetost primarnega navitja dobimo tako, da napetost sekundarnega navitja, ki jo merimo z voltmetrom, pomnožimo s prestavo!
- $I_p = K_i I_s$ - za tokovnik





Razmerje med primarno in sekundarno napetostjo – **prestava napetostnika** – je **odvisno od:**

- velikosti napetosti,
- bremena na sekundarni strani,
- frekvence, uporabljenega materiala...

Suče se okoli **nazivne vrednosti** prestave:

$K_{un} = U_{pn} / U_{sn}$ - razmerje primarne nazivne napetosti in sekundarne nazivne napetosti (podani)

- **odstopanje je odvisno od razreda** točnosti merilnega transformatorja.

Ker **uporabljamo** pri izračunih primarnih vrednosti **nazivne prestave namesto dejanskih**, nastane **prestavni pogrešek:**

$$e = \frac{K_n - K}{K} \text{ oz. napetostni prestavni pogrešek: } e_u = \frac{K_{un} U_s - U_p}{U_p}$$

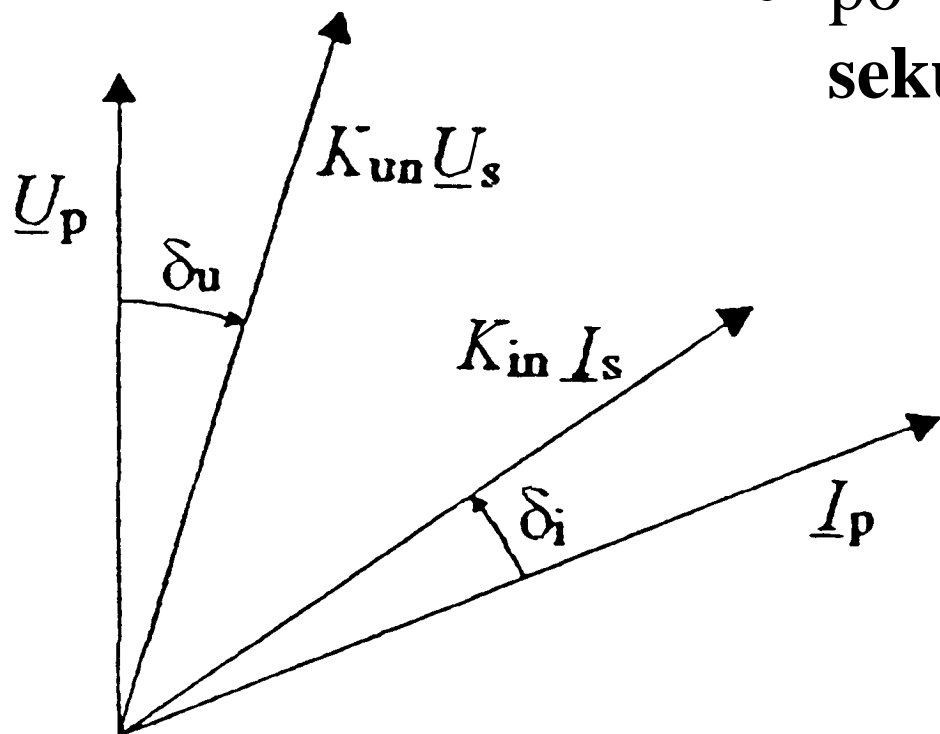




Pri posrednem merjenju moči, energije, ... moramo upoštevati tudi **kotni pogrešek**:

- **fazna razlika** med fazorjema primarnega in sekundarnega navitja.

- po dogovoru je **pozitiven**, če sekundar prehiteva primar.



e_u - pozitiven,
 δ_u - negativen,

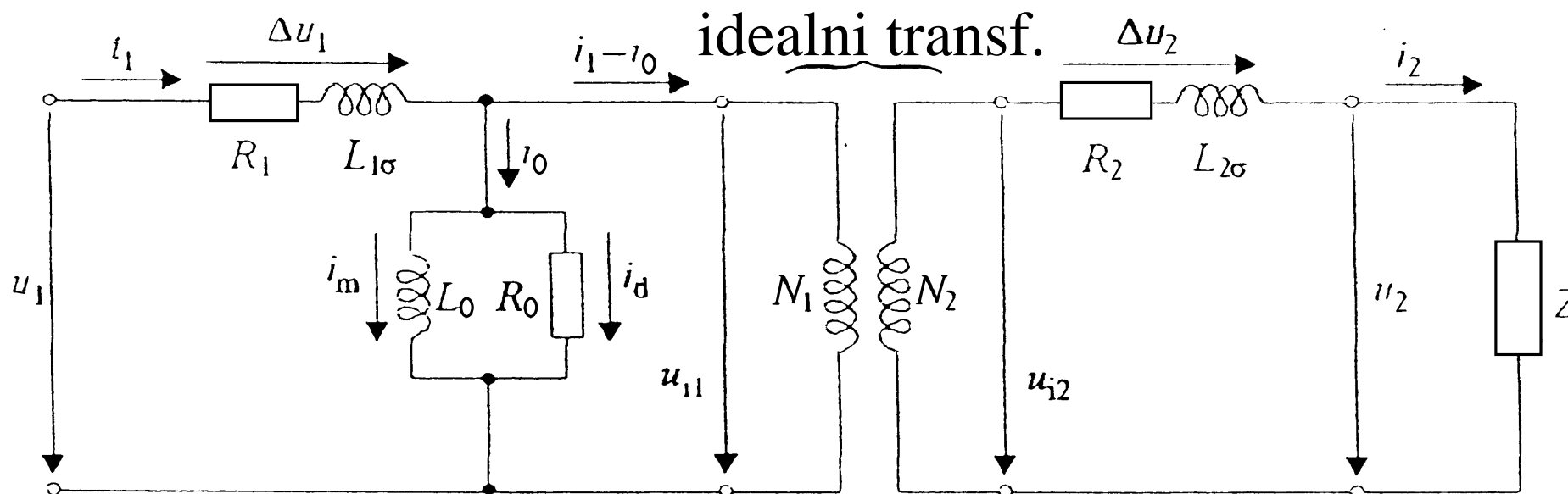
e_i - negativen,
 δ_i - pozitiven,

Slika 4.31 Pogreška tokovika in napetostnika





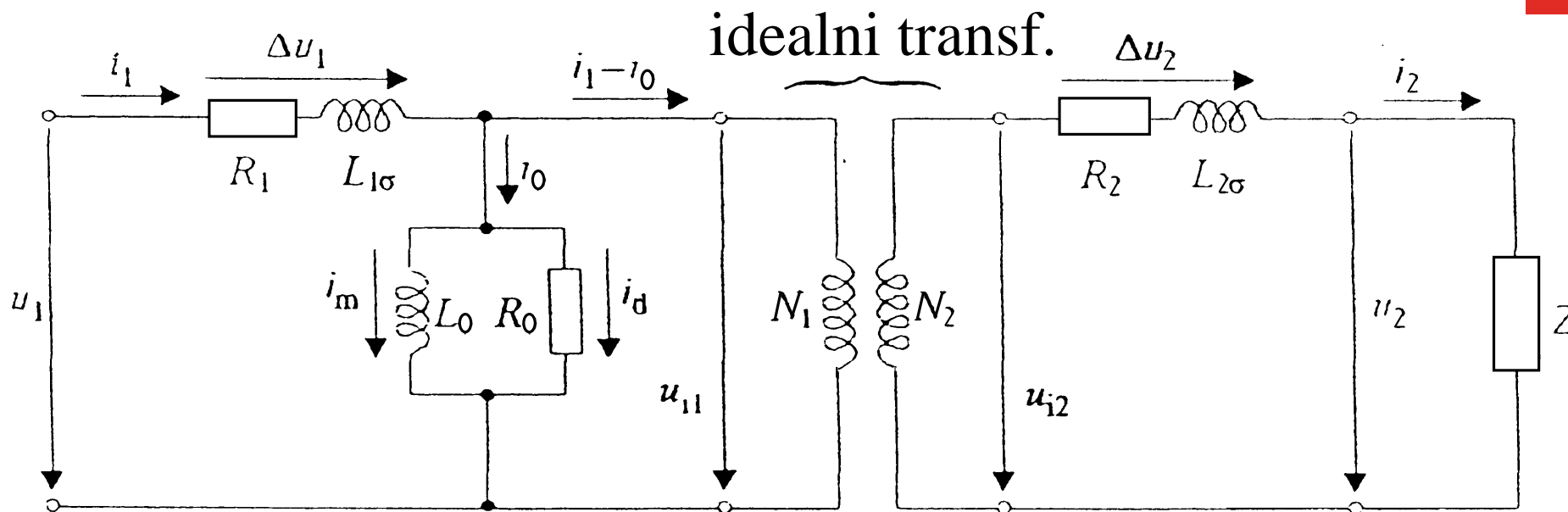
Nadomestno vezje merilnega transformatorja



Slika 4.32 Nadomestno vezje merilnega transformatorja

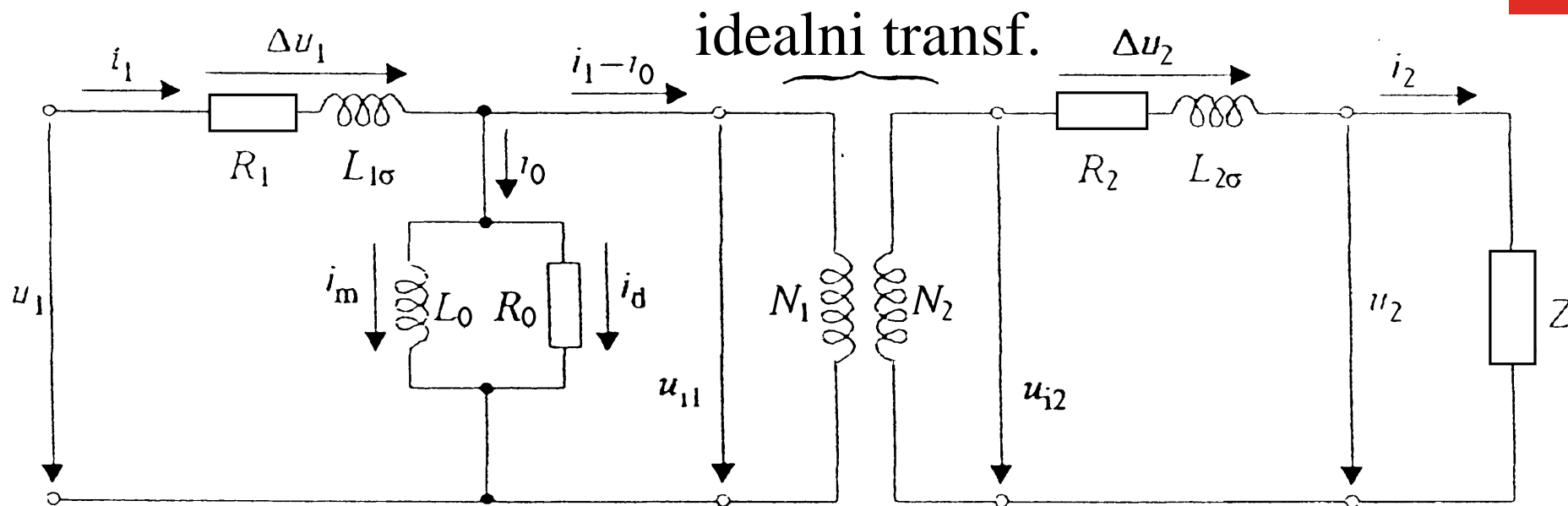
- R_1 - ohmska **upornost primarnega** navitja,
- $L_{1\sigma}$ - stresana **induktivnost primarnega** navitja,
- R_2 - ohmska **upornost sekundarnega** navitja,
- $L_{2\sigma}$ - stresana **induktivnost sekundarnega** navitja,





- L_0 - induktivnost jedra,
 - z magnetilnim tokom i_m vzbuja magnetni pretok v jedru
- R_0 - upornost jedra,
 - z i_d ponazarja izgube v jedru
- na sekundarju imamo priključeno impedanco Z





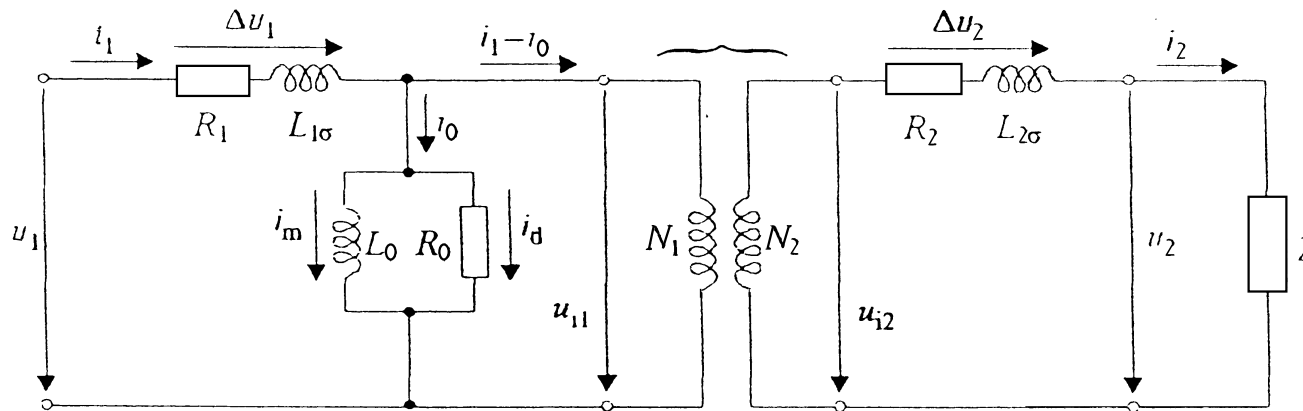
Slika 4.32 Nadomestno vezje merilnega transformatorja

Pri napetostniku imamo vsiljeno napetost (tok i_1 čim manjši).

Velja:

$$\frac{u_{i1}}{u_{i2}} = \frac{N_1 d\phi/dt}{N_2 d\phi/dt} = \frac{N_1}{N_2}$$





$$\frac{u_{i1}}{u_{i2}} = \frac{N_1 \frac{d\phi}{dt}}{N_2 \frac{d\phi}{dt}} = \frac{N_1}{N_2}$$

Upoštevati moramo še **padce napetosti** Δu_1 oz. Δu_2

- na **upornostih** navitij (R_1, R_2) in stresanih **induktivnostih** ($L_{\sigma 1}, L_{\sigma 2}$). $u_1 - u_{i1} - \Delta u_1 = 0$ $u_{i2} - u_2 - \Delta u_2 = 0$

$$u_2 + \Delta u_2 = u_{i2} = \frac{u_{i2}}{u_{i1}} u_{i1} = \frac{N_2}{N_1} (u_1 - \Delta u_1)$$

$$u_2 = u_1 \frac{N_2}{N_1} \left[1 - \left(\frac{\Delta u_1}{u_1} + \frac{\Delta u_2}{u_2} \right) \right]$$

- **prestava** je odvisna tudi **od padcev napetosti** na navitjih.





Osnovni podatki napetostnih merilnih transformatorjev

Po mednarodnih priporočilih IEC 186-1987 so napetostniki razvrščeni v pet razredov točnosti:

0,1 – 0,2 – 0,5 – 1 – 3

- pogoji:
 - nazivna frekvenca,
 - napetost med 80% in 120% nazivne napetosti,
 - breme med 25% in 100% nazivnega bremena,
 - faktor moči 0,8 induktivnega značaja.

Tabela 4.1 Meje pogreškov napetostnikov

razred točnosti	0,1	0,2	0,5	1	3
meje napetostnega pogreška	$\pm 0,1\%$	$\pm 0,2\%$	$\pm 0,5\%$	$\pm 1,0\%$	$\pm 3,0\%$
meje kotnega pogreška	$\pm 5'$	$\pm 10'$	$\pm 20'$	$\pm 40'$	/





Priporočene **standardne vrednosti**:

- primarna nazivna napetost v skladu z nazivnimi vrednostmi omrežij,
- sekundarna nazivna napetost: 100 V, (200 V)
- **nazivna moč**: (10 – 25 – 50 – 100 – 200 – 500) VA.
 - To je **vrednost navidezne moči**, ki jo napetostnik daje v sekundarni tokokrog pri **nazivni sekundarni napetosti** in **nazivni obremenitvi**:

$$S_n = U_{sn}^2 Y_n$$





- **nazivno breme** je admitanca podana v siemensih:

$$Y_n = \frac{S_n}{U_{sn}^2} = \frac{50 \text{ VA}}{(100 \text{ V})^2} = 5 \text{ mS}$$

- ustreza impedanci 200Ω

- 25% nazivnega bremena:

$$Y_{25\%} = \frac{S_{25\%}}{U_{sn}^2} = \frac{12,5 \text{ VA}}{(100 \text{ V})^2} = 1,25 \text{ mS}$$

- ustreza impedanci 800Ω

