4. Električni merilni instrumenti

Ločimo jih po tem, na kakšnem fizikalnem principu temeljijo:

- instrumenti **z vrtljivo tuljavico** – magnetoelektrični,
- instrumenti **z vrtljivim magnetom**,
- **elektrodinamični** instrumenti,
- instrumenti **z vrtljivim železom**,
- **elektrostatični** instrumenti,
- **indukcijski** instrumenti,
- itd.

K **električnim** merilnim instrumentom prištevamo tudi tiste, ki imajo vgrajene:

- **usmernike**,
- ali **termopretvornike**.

K **elektronskim** merilnim instrumentom prištevamo tiste, ki imajo vgrajene **elektronske sestavne dele**:

- **ojačevalniki** z različnimi vrstami **povratnih zvez**,
- **aktivni filtri**,
- **pretvorniki**,
- itn.

4.1 Splošno o električnih merilnih instrumentih

Merilo veličine je **položaj kazalca** na skali.

V **stacionarnem stanju** vplivata nanj dva vrtilna momenta:

- **aktivni** vrtilni moment – sorazmeren **električni merjeni veličini** T_e,
- **mehanski protimoment** T_m – izkorišča silo spiralnih vzmeti.

Vsaj eden od obeh momentov mora biti **odvisen od odklona** α:

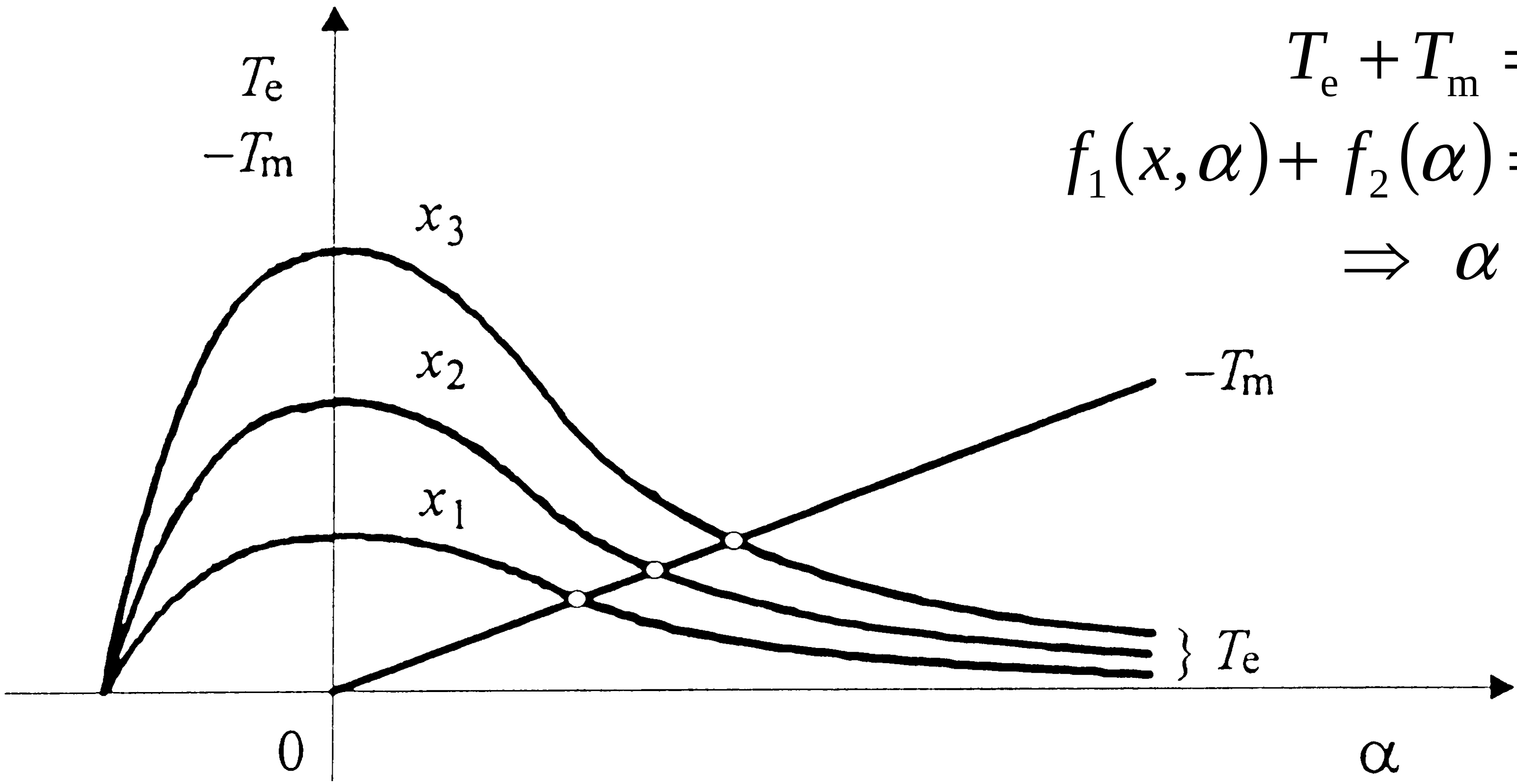
$$T_\mathrm{e} = f_1(x,\alpha) \qquad T_\mathrm{m} = f_2(\alpha)$$

V ravnovesju je **vsota obeh navorov enaka nič**:

$$T_\mathrm{e} + T_\mathrm{m} = 0$$

$$f_1(x,\alpha) + f_2(\alpha) = 0$$

$$\Rightarrow \quad \alpha = f(x)$$



Slika 4.1 Električni vrtilni moment in mehanski proti moment

Mehanski protimoment je izveden s:

- torzijskim trakom,
- parom spiralnih vzmeti.

Sorazmeren je odklonskemu kotu: $T_{\mathrm{m}} = -D\alpha$

Kriterij za stopnjo **zanesljivosti vrnitve** v ravnovesni položaj je **specifični nastavitveni moment**:

$$T_{\mathrm{n,s}} = \frac{\partial\left(T_{\mathrm{e}} + T_{\mathrm{m}}\right)}{\partial\alpha}\frac{\pi}{2}$$ - čim **večja je sprememba vsote** momentov

- pri **nestabilnem** ravnovesju je **pozitiven**,
- pri **stabilnem** ravnovesju je **negativen**.

Obstajajo tudi električni merilni instrumenti, katerih **protimoment ni mehanski**:

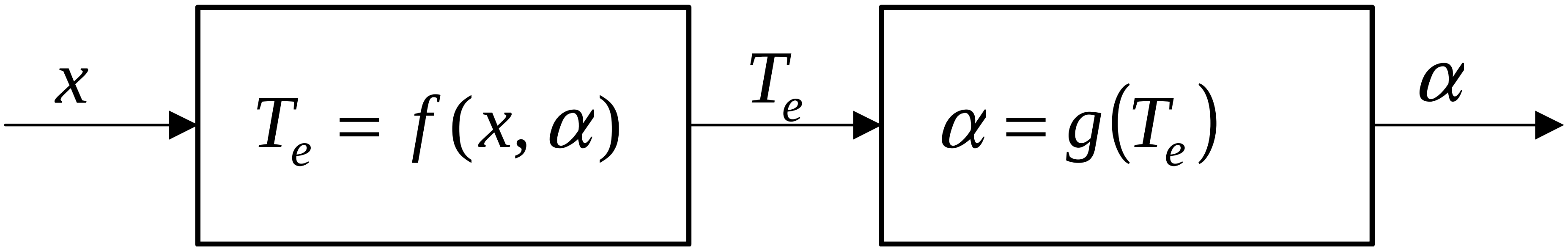
$$T_{e1} = f_1(x_1, \alpha) \quad \text{in} \quad T_{e2} = f_2(x_2, \alpha)$$

- V **ravnovesju** :

$$T_{e1} + T_{e2} = 0: \qquad f_1(x_1, \alpha) + f_2(x_2, \alpha) = 0$$

$$\Rightarrow \quad \alpha = f(x_1, x_2)$$

  - Največkrat je funkcija $\alpha = f(x_1, x_2)$ enaka kvocientu:
    - govorimo o **kvocientnih merilnih instrumentih**



Slika 4.2 Blokovna shema električnih instrumentov

- **Prvi blok** povezuje **vhodno** električno veličino (napetost, tok) in **električni navor**.
- **Drugi blok** povezuje **odklon** z **električnim navorom**,
  - pri vseh instrumentih podobno;
  - **dinamika instrumentov**.

Dinamika električnega merilnega instrumenta

1. Odziv na stopnico

Če se merjena veličina **hipno spremeni**, instrument zaradi **vztrajnosti** vrtljivega organa (prisotnost mase) **ne more v trenutku** zavzeti nove vrednosti.

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

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

Za **opis gibanja** moramo upoštevati štiri vrtilne momente:

- vztrajnostni T_v: $$T_\mathrm{v} = -J\frac{\mathrm{d}^2\alpha}{\mathrm{d}t^2},$$
  - J - vztrajnostni moment vrtljivega organa
- moment dušenja T_d: $$T_\mathrm{d} = -P\frac{\mathrm{d}\alpha}{\mathrm{d}t},$$
  - P - konstanta dušenja
- mehanski protim. T_m: $$T_\mathrm{m} = -D\alpha$$
  - D - konstanta vzmeti
- električni T_e. $$T_\mathrm{e} = f(x,\alpha)$$

$$T_\mathrm{v} + T_\mathrm{d} + T_\mathrm{m} + T_\mathrm{e} = 0$$

Enačba, ki opisuje **gibanje vrtljivega organa** $\alpha(t)$:

$$J\frac{\mathrm{d}^2\alpha}{\mathrm{d}t^2}+P\frac{\mathrm{d}\alpha}{\mathrm{d}t}+D\alpha=f(x,\alpha) \qquad \text{oz.} \qquad J\ddot{\alpha}+P\dot{\alpha}+D\alpha=T_\mathrm{e}$$

Vpeljemo nove veličine ($\frac{P}{J}=2\eta$):

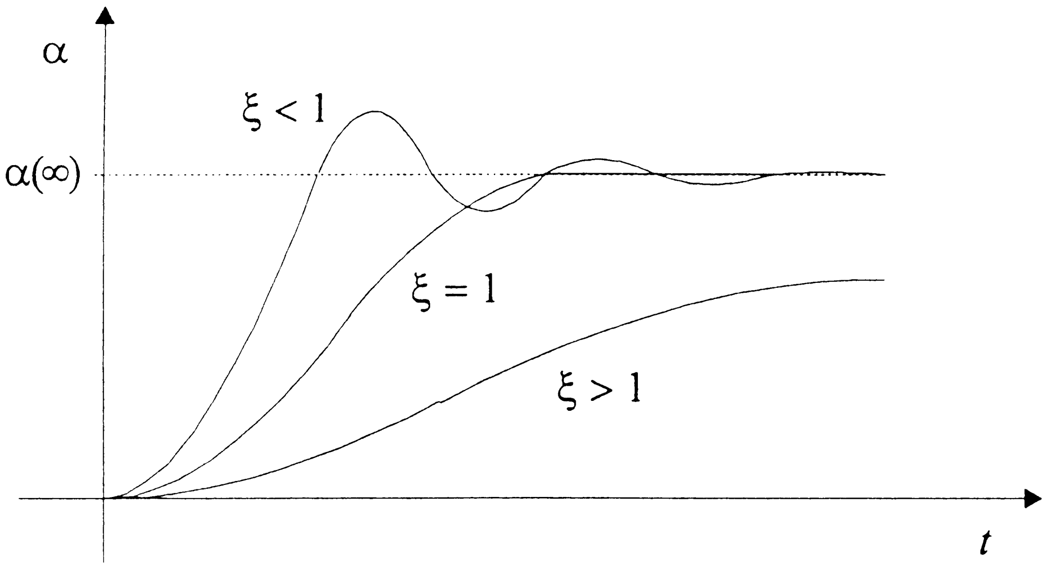
- $\sqrt{\frac{D}{J}}=\omega_0$ - **lastna** (krožna) **frekvenca nedušenega nihanja**,
- $\frac{P}{2\sqrt{DJ}}=\xi$ - **stopnja dušenja**.

Dobimo **linearno diferencialno enačbo drugega reda**:

$$\ddot{\alpha} + 2\xi\omega_0\dot{\alpha} + \omega_0^2\alpha = \frac{T_\mathrm{e}}{J}$$

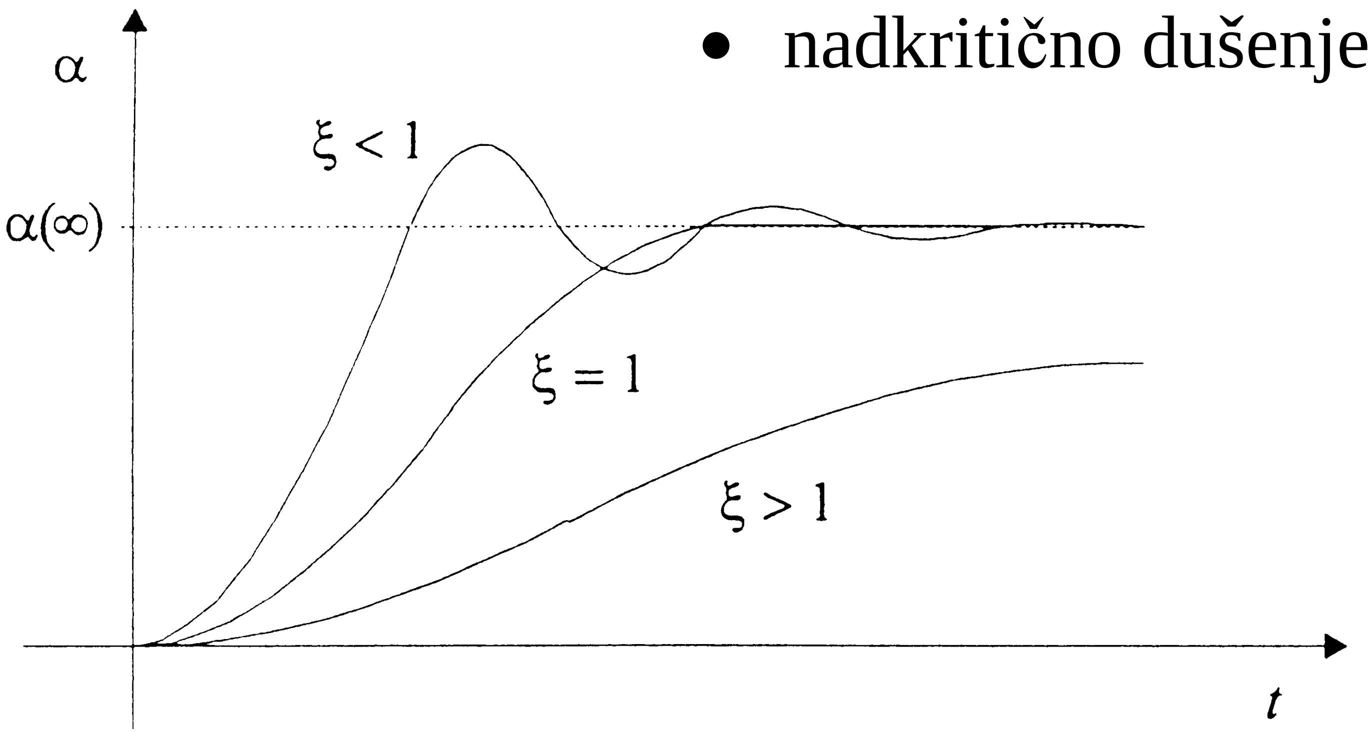
Če je stopnja dušenja $\xi < 1$, je rešitev enačbe dušeno nihanje:

$$\alpha = \frac{T_\mathrm{e}}{\omega_0^2 J}\left[1 - \frac{e^{-\xi\omega_0 t}}{\sqrt{1-\xi^2}}\sin\left(\omega_0\sqrt{1-\xi^2}\,t + \arccos\xi\right)\right]$$



Značilne odzive razdelimo v tri skupine:

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

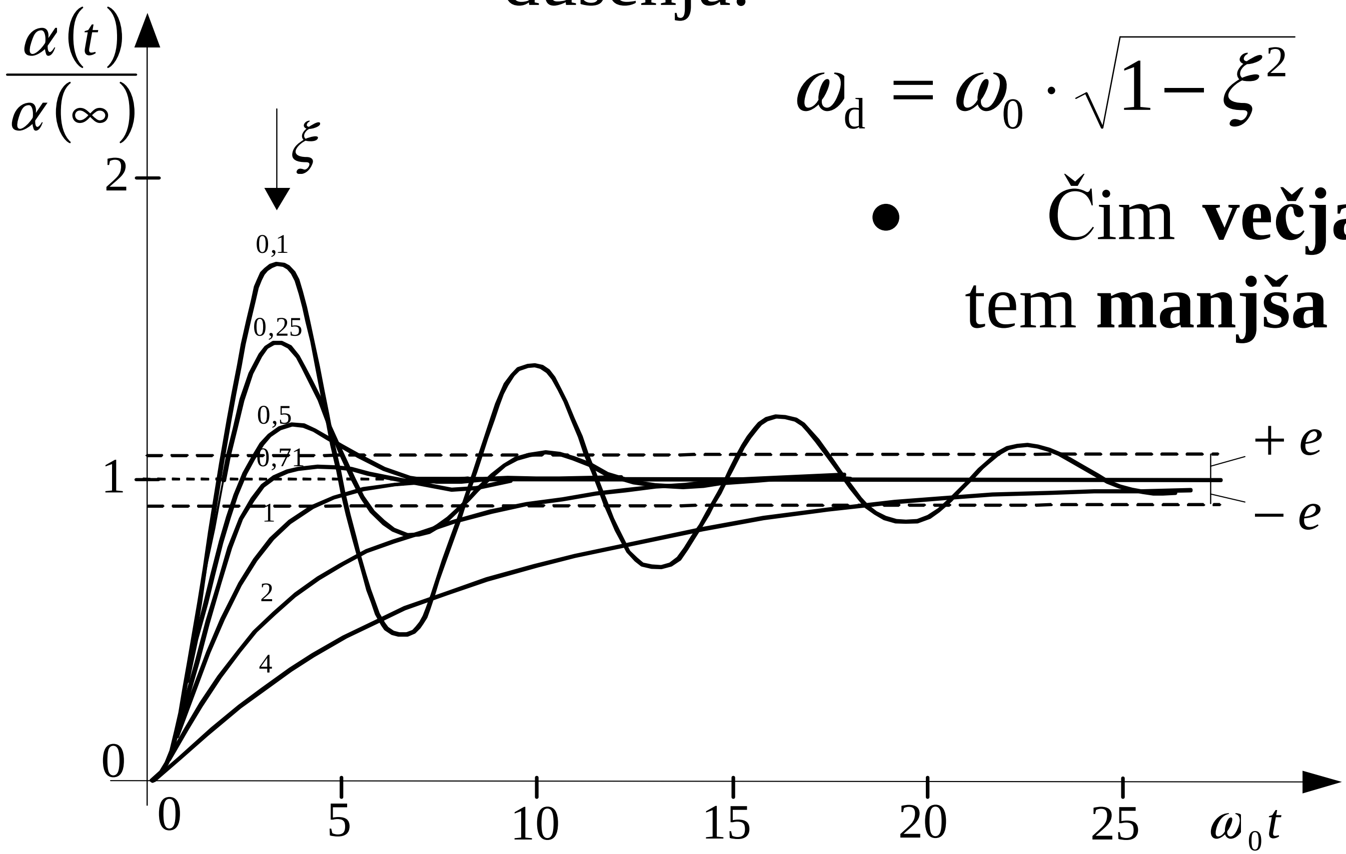


Slika 4.3 Gibanje vrtljivega organa po prikjučitvi stalnega navora

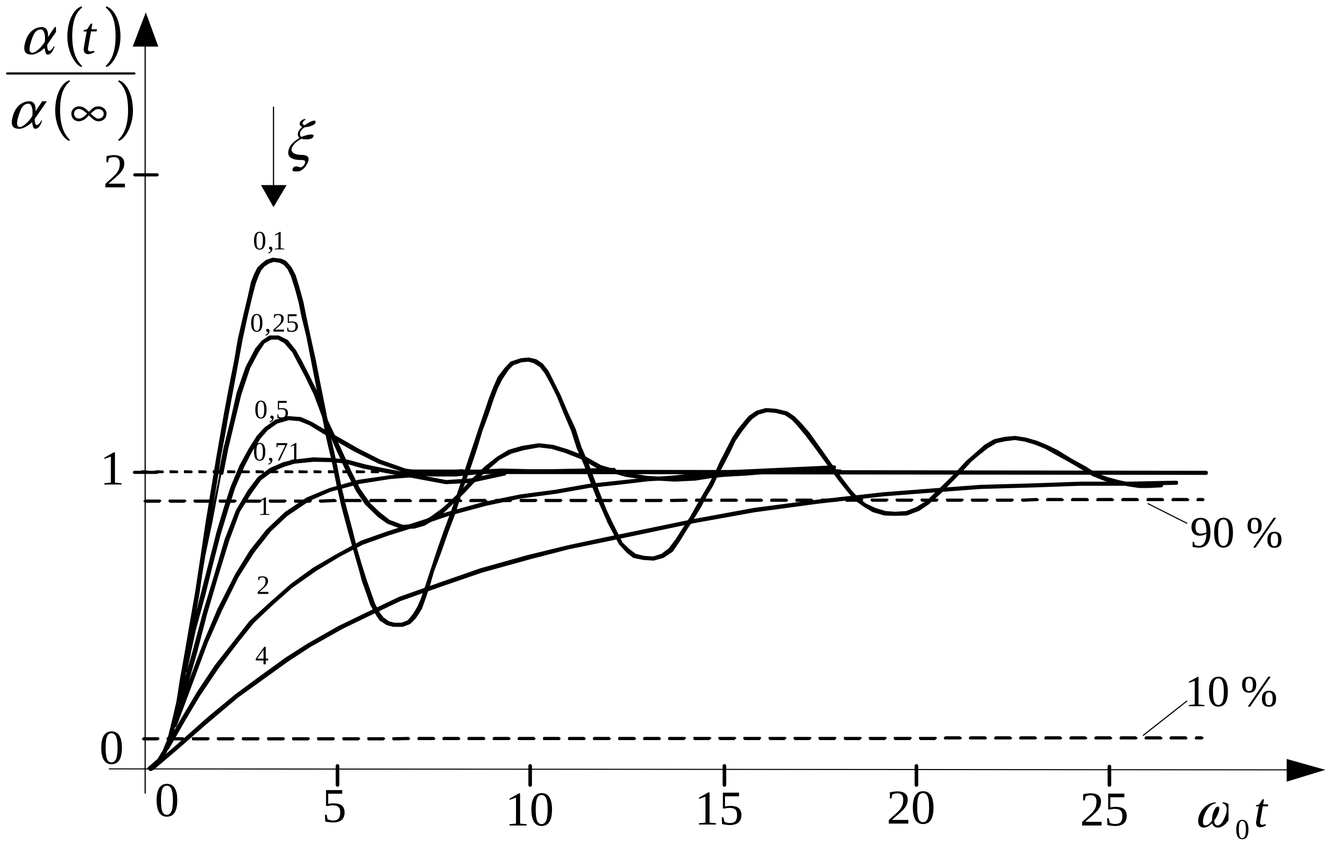
Za **podkritično dušenje** je **kotna frekvenca** ω_d odvisna od stopnje dušenja:

$$\omega_\mathrm{d} = \omega_0 \cdot \sqrt{1-\xi^2}$$

- Čim **večja** je **stopnja dušenja**, tem **manjša je kotna frekvenca**.

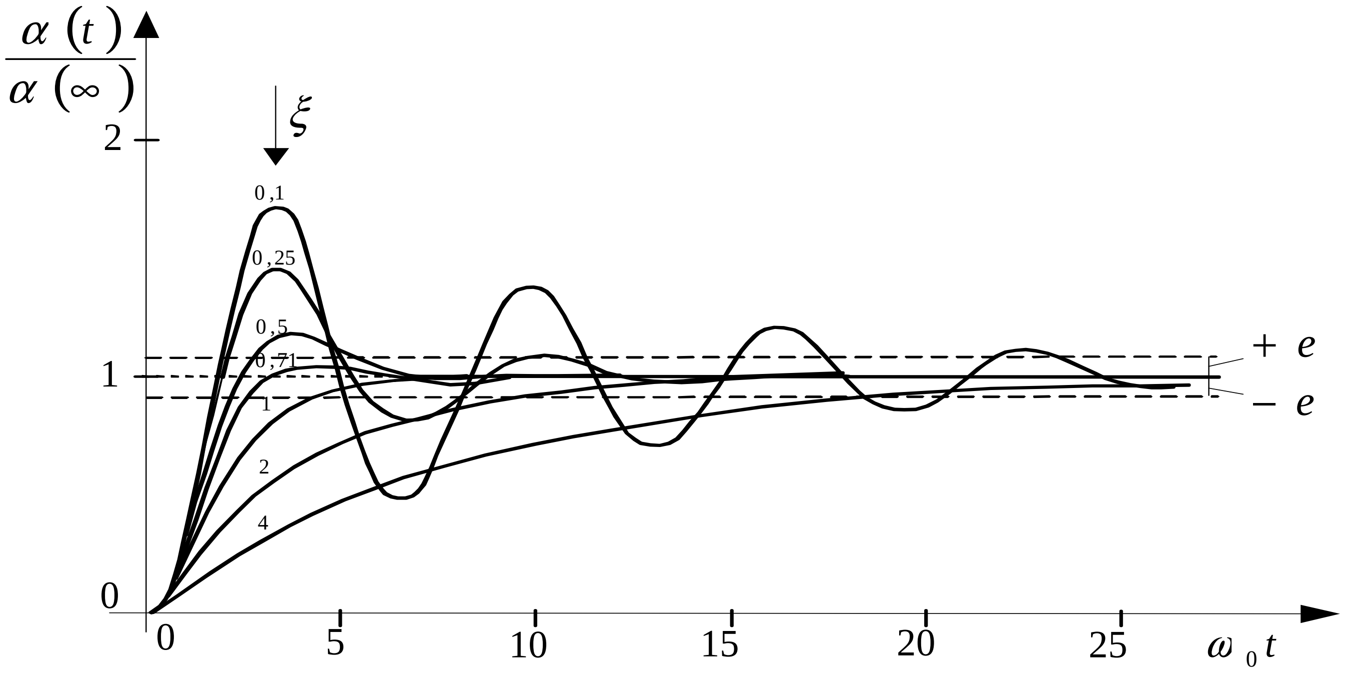


Slika 4.3a: Primeri različnih vrst odzivov sistema drugega reda na stopničasti vhod



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

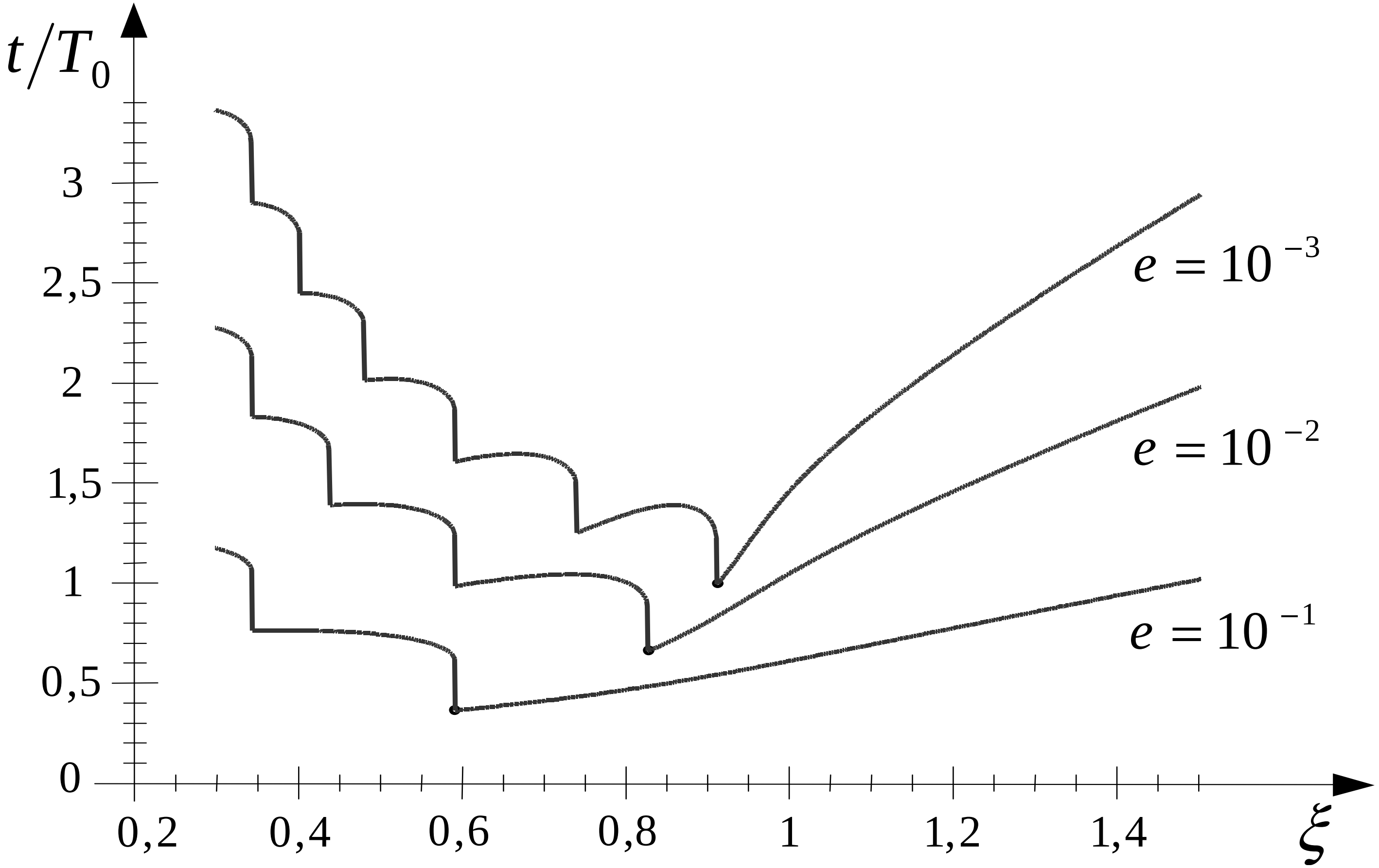
- Čim **večja** je **stopnja dušenja**, tem **daljši je dvižni čas**.



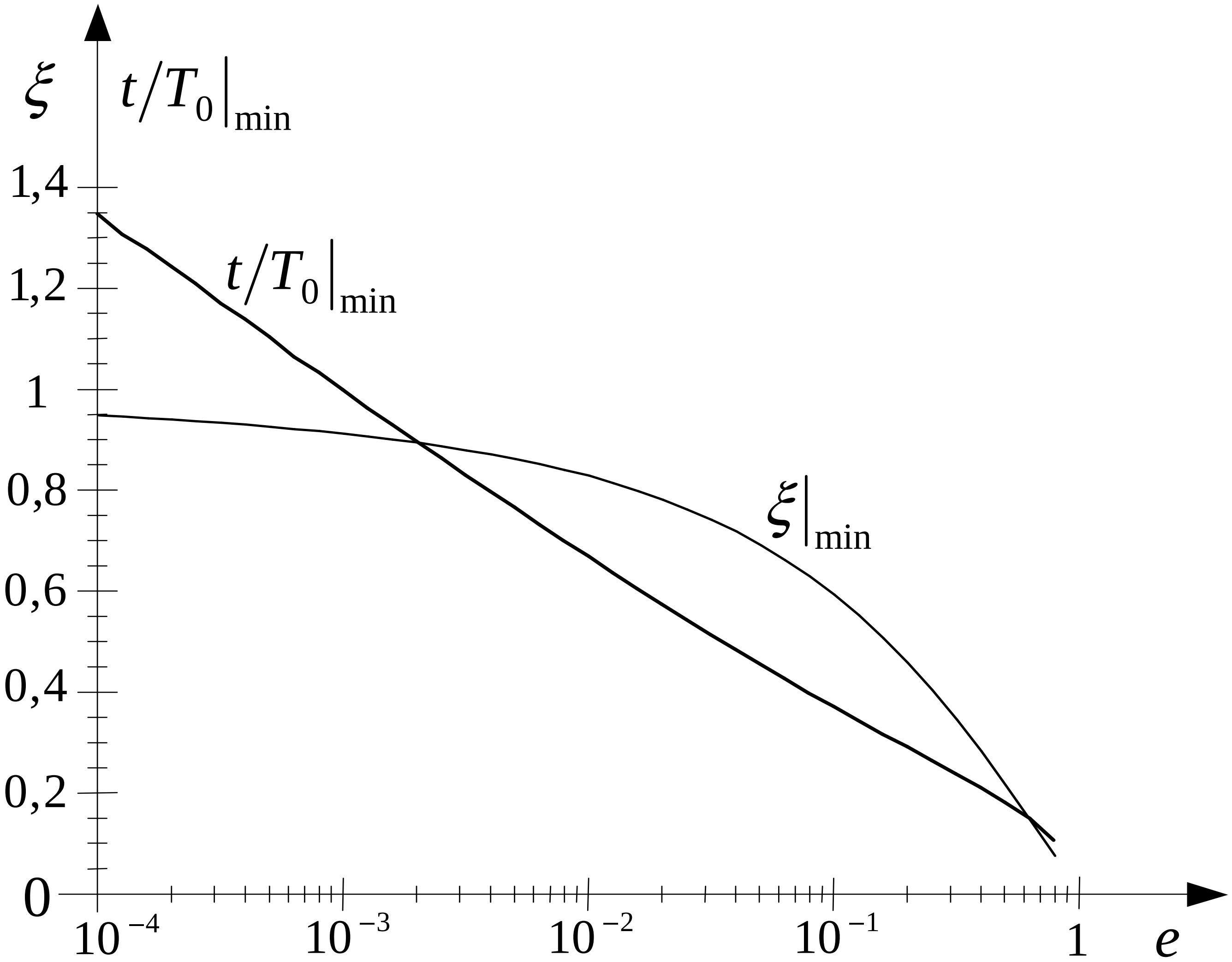
Odzivni čas merilnega člena znotraj odstopanja *e* od končnega odklona se:

- 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 4.3b Odzivni čas v odvisnosti od stopnje dušenja pri različnih vrednostih e $(T_0 = 2\pi/\omega_0$ - nihajni čas nedušenega nihanja)



Slika 4.3c Najkrajši odzivni čas in stopnja dušenja v odvisnosti od *e*

2. Odziv na sinusno obliko

Če imamo na vhodu **sinusno obliko signala** in je njej proporcionalen tudi električni navor, je takšne oblike **v ustaljenem stanju** tudi odklonski kot α:

$$\underline{T}_{\mathrm{e}} = T_{\mathrm{e,m}} \mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t} \qquad \Rightarrow \qquad \underline{\alpha} = \alpha_{\mathrm{m}} \mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t + \varphi)}$$

Kompleksna oblika enačbe gibanja:

$$J \frac{\mathrm{d}^2 \underline{\alpha}}{\mathrm{d}t^2} + P \frac{\mathrm{d}\underline{\alpha}}{\mathrm{d}t} + D\underline{\alpha} = \underline{T}_{\mathrm{e}}$$

- kjer sta odvoda: $\dfrac{\mathrm{d}\underline{\alpha}}{\mathrm{d}t} = \mathrm{j}\omega\alpha_{\mathrm{m}} \mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t + \varphi)} = \mathrm{j}\omega\underline{\alpha}$

$$\frac{\mathrm{d}^2 \underline{\alpha}}{\mathrm{d}t^2} = -\omega^2 \underline{\alpha}$$

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

- razmerje frekvence ω vsiljenega električnega navora v primeri z lastno frkvenco nedušenega gibanja.

Povezava med navorom in odklonom je:

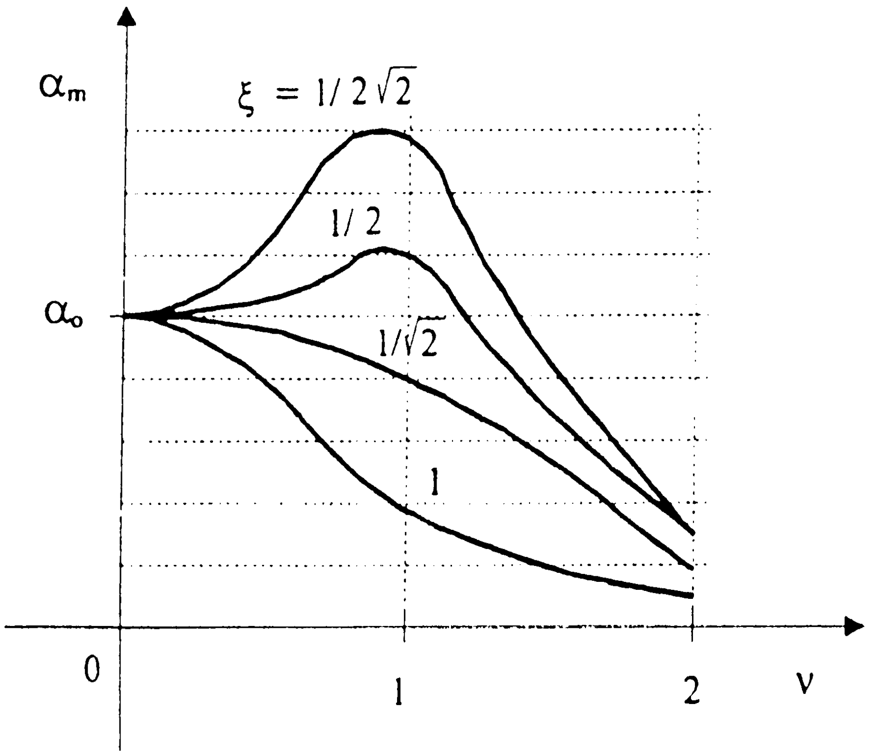
$$\underline{\alpha} = \frac{\underline{T}_\mathrm{e}}{D - \omega^2 J + \mathrm{j}\omega P} \qquad \text{oz.} \qquad \underline{\alpha} = \frac{\underline{T}_\mathrm{e}}{D} \frac{1}{\left(1 - \nu^2\right) + \mathrm{j}2\nu\xi}$$

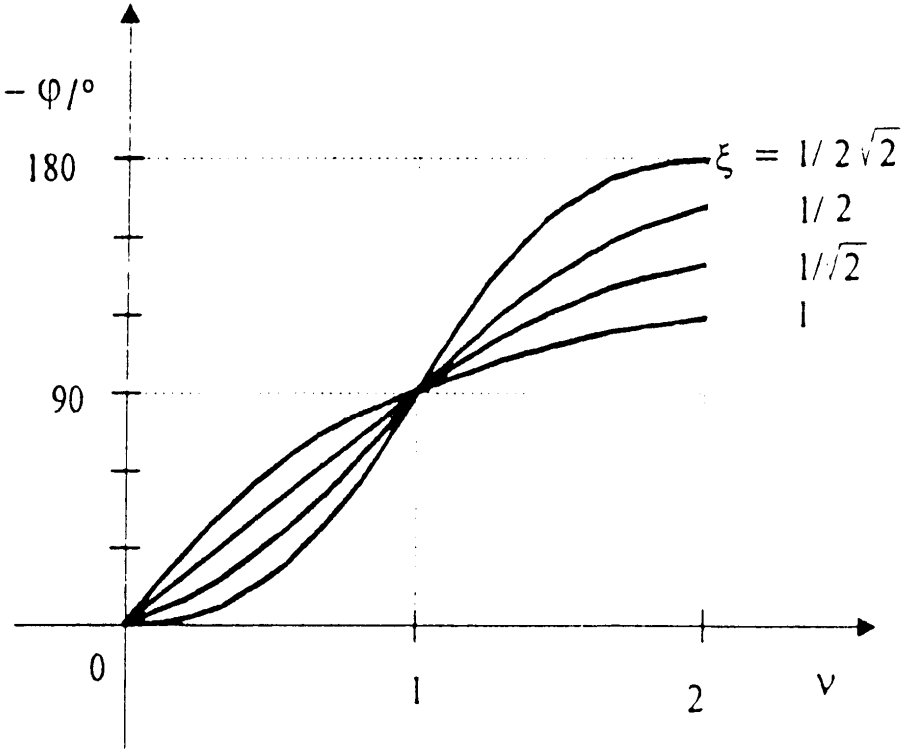
Zanimata nas temenska vrednost odklonskega kota (**amplitudna karakteristika**):

$$\alpha_\mathrm{m} = \frac{\underline{T}_\mathrm{e,m}}{D} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \nu^2\right)^2 + (2\nu\xi)^2}}$$

amplitudna karakteristika: $\alpha_\mathrm{m} = \frac{T_\mathrm{e,m}}{D} \frac{1}{\sqrt{\left(1-\nu^2\right)^2 + (2\nu\xi)^2}}$

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





Slika 4.4 Amplitudni in fazni odziv merilnega instrumenta

$\alpha_0 = T_\mathrm{e,m}/D$ - odklon pri konstantnem električnem navoru

Zaradi **majhne lastne frekvence** (velik vztrajnostni moment *J*) se instrument obnaša kot **nizkoprepustni filter**.

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

Primer: $\xi = 1, \quad T_0 = 1\,\mathrm{s}, \quad$ frekvenca navora je $f = 50\,\mathrm{Hz}$

Kolikokrat manjši je odklon kot pri konstantnem navoru?

$$\upsilon = \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{2\pi/T}{2\pi/T_0} = T_0 f = 1s \cdot 50\,\mathrm{Hz} = 50$$

$$\frac{\alpha_\mathrm{m}}{\alpha_0} = \frac{1}{\sqrt{\left(1-\nu^2\right)^2 + (2\nu\xi)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\left(1-50^2\right)^2 + (2\cdot 50\cdot 1)^2}} = 4\cdot 10^{-4}$$

- pri $\alpha_0 = 100\,\mathrm{mm}$ **človeško oko** amplitude $\alpha_\mathrm{m} = \pm 0{,}04\,\mathrm{mm}$ **ne opazi**!

4.2 Instrument z vrtljivo tuljavico

Instrument z vrtljivo tuljavico (**magnetoelektrični** instr.) ima vrsto lastnosti:

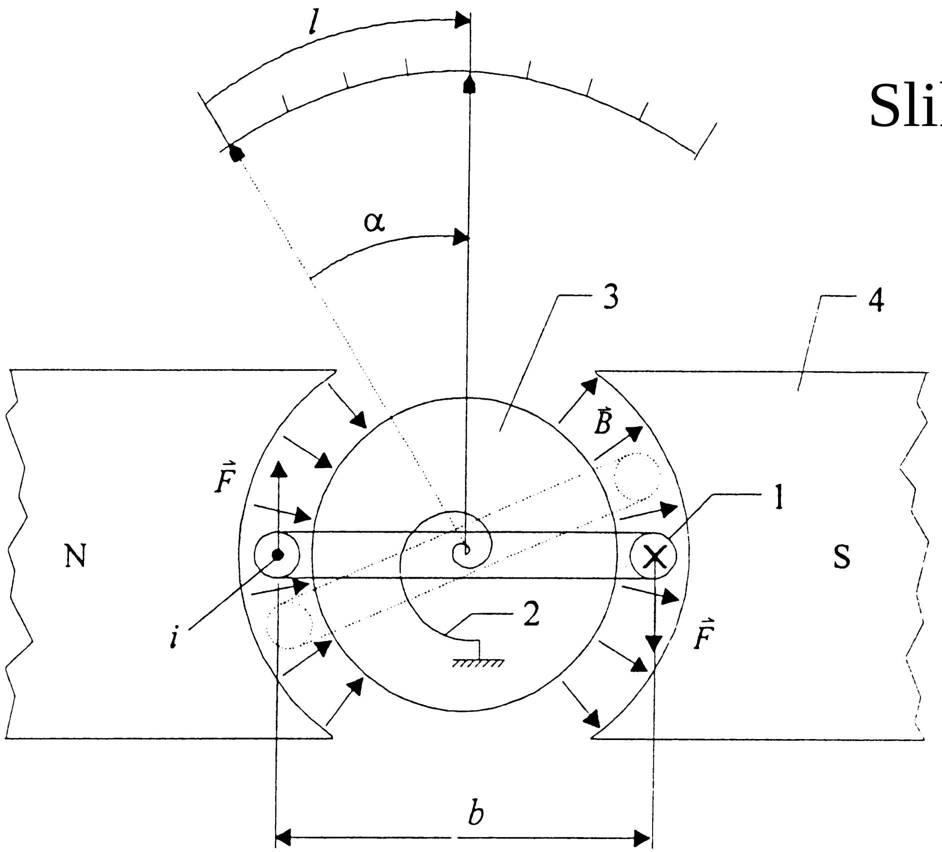
- relativno majhna lastna poraba,
- **linearna skala**,
- **velika** tokovna **občutljivost**,
- velik razpon toka, ki ga lahko merimo,
- sposobnost merjenja **tokovnih pulzov**,
- **nizka cena** …

V elektronske merilne instrumente je vgrajen kot **indikator**:

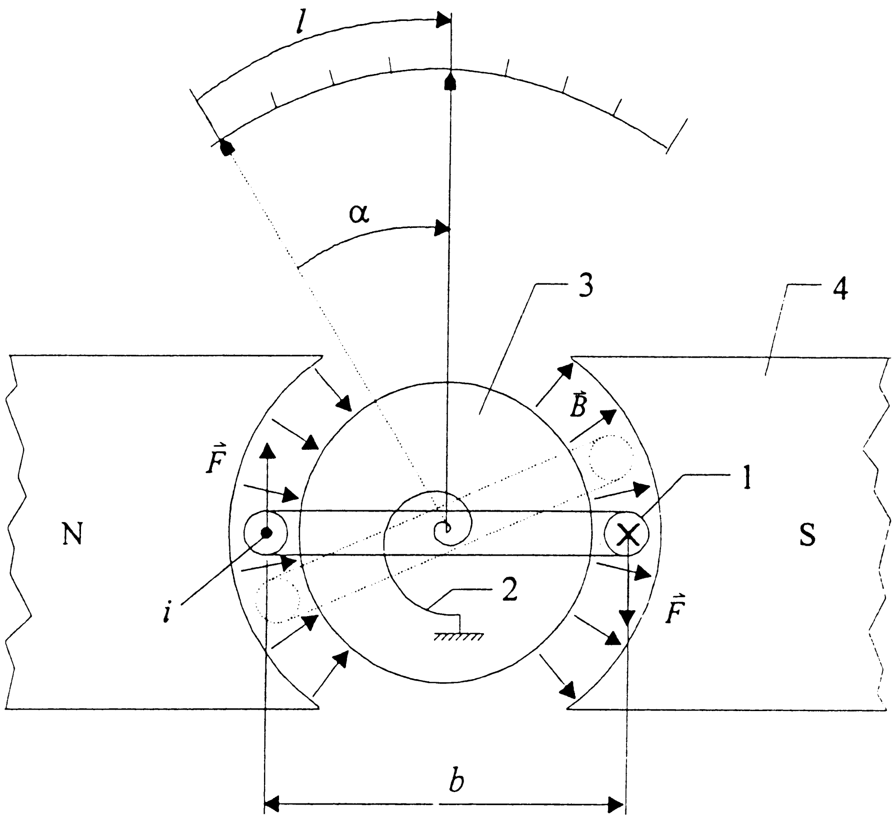
- odklonski,
- ničelni.

Merilni princip

Delovanje **temelji na sili na vodnik v magnetnem polju** trajnega magneta



Slika 4.5 Instrument z vrtljivo tuljavico



Kadar teče v tuljavici tok i v narisani smeri, se **tuljavica zavrti** za **odklonski kot α zaradi sile**:

$$\vec{F} = iN\,\vec{a} \times \vec{B} \qquad \text{oz.}$$
$$F = iN\,a \times B$$

- a - dolžina ovoja tuljavice, ki leži v radialno homogenem magnetnem polju,
- Tuljavica je v **reži** med **jedrom iz mehkega železa** (3) in **polovimi čevlji trajnega magneta** (4).

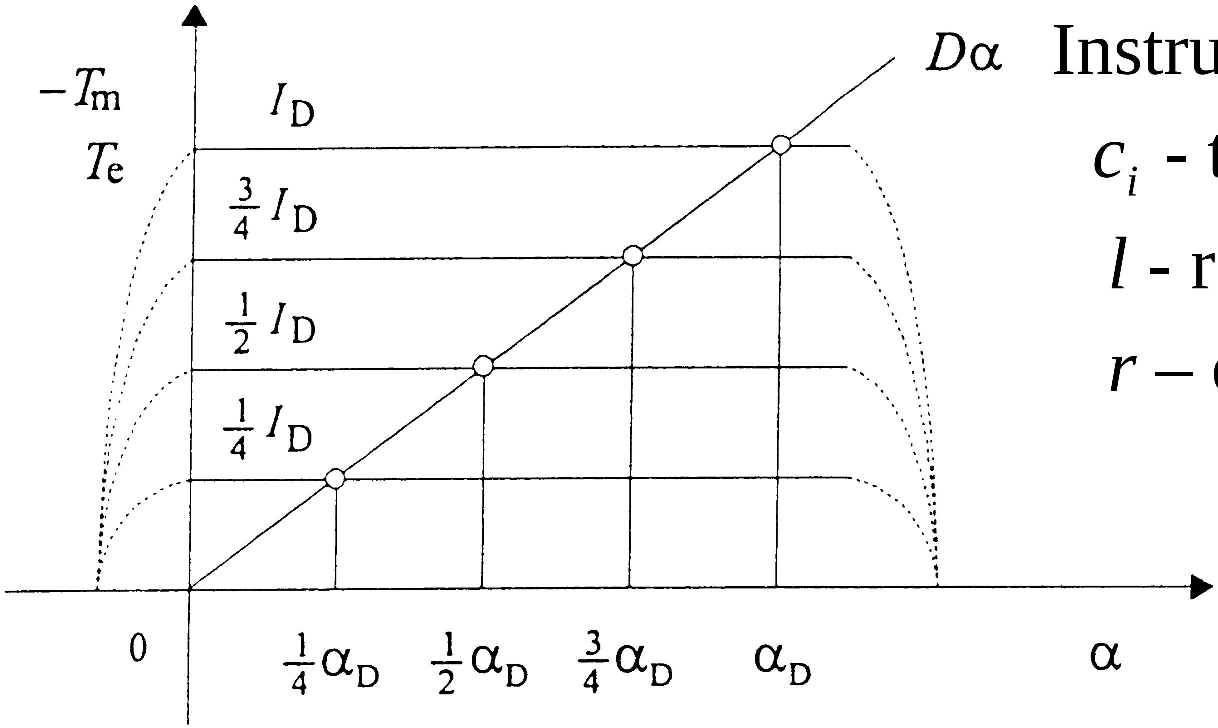
Električni merilni **moment** je enak:

$$T_e = 2 \cdot F \cdot \frac{b}{2} \;\Rightarrow\; T_e = iNabB = \phi_0\, i$$

ϕ_0 - celotni magnetni pretok

V ravnovesju velja: $\phi_0 i + (-D\alpha) = 0$

$$\Rightarrow i = \frac{D}{\phi_0}\alpha = c_i\alpha, \quad l = r\alpha = r\frac{\phi_0}{D} i$$



Instrument ima **linearno skalo**,

c_i - tokovna konstanta (A/rd),

l - razdalja na skali,

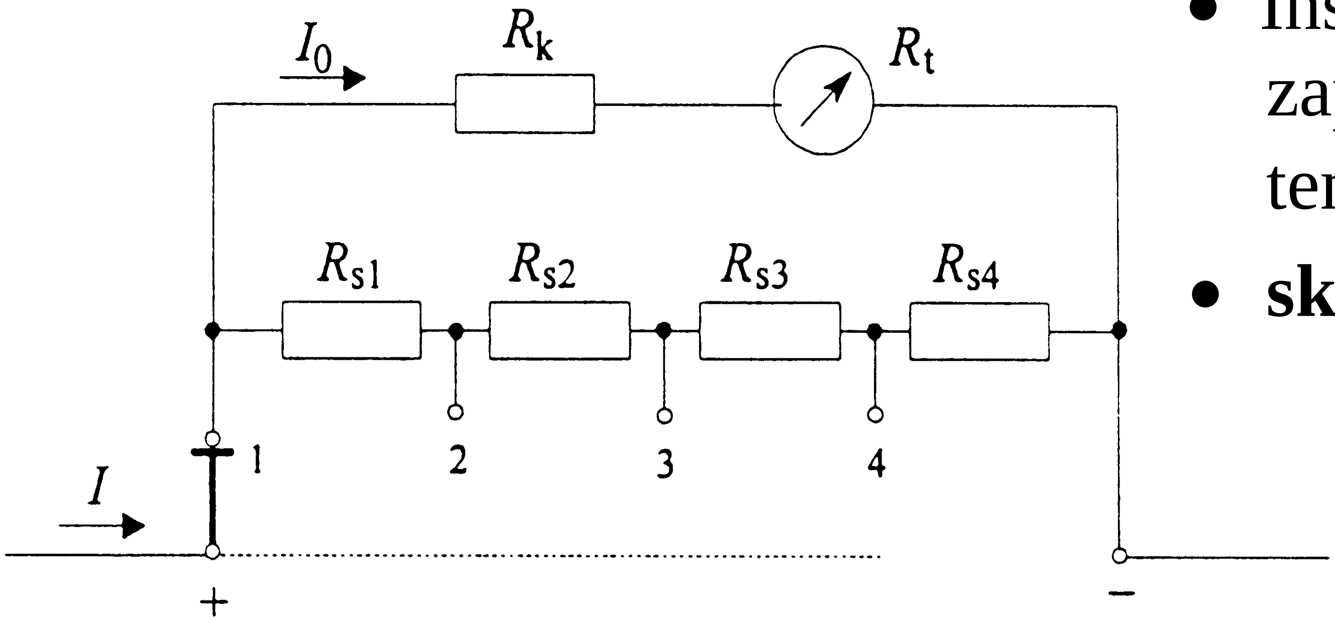
r – dolžina kazalca.

Slika 4.6 Vrtilna momenta instrumenta z vrtljivo tuljavico pri radialno homogenem magnetnem polju

Razširitev merilnega območja

Ampermetru razširimo merilno območje **z** vzporedno vezanim **souporom** R_s.

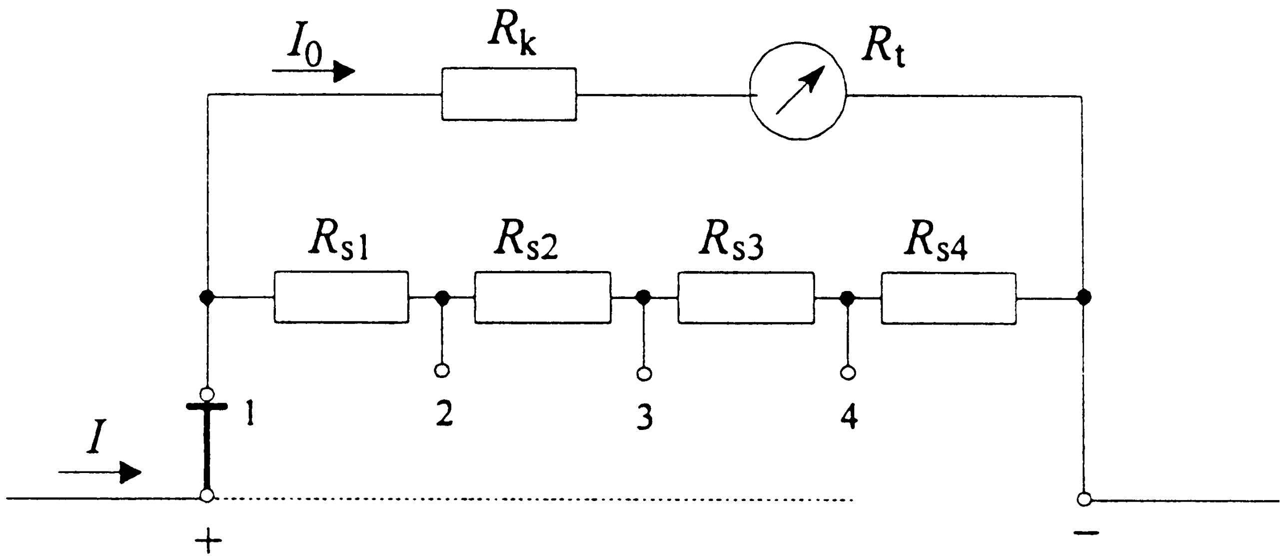
- **Večkratni soupor** imenujemo **univerzalni** ali **Ayrtonov soupor**:



- Instrumentu dodamo zaporedno upor R_k za temper. kompenzacijo.
- **skupna upornost** :

$$R_0 = R_k + R_t.$$

Slika 4.11 Razširitev merilnega območja ampermetra



Merilni doseg (narisani položaj 1) je:

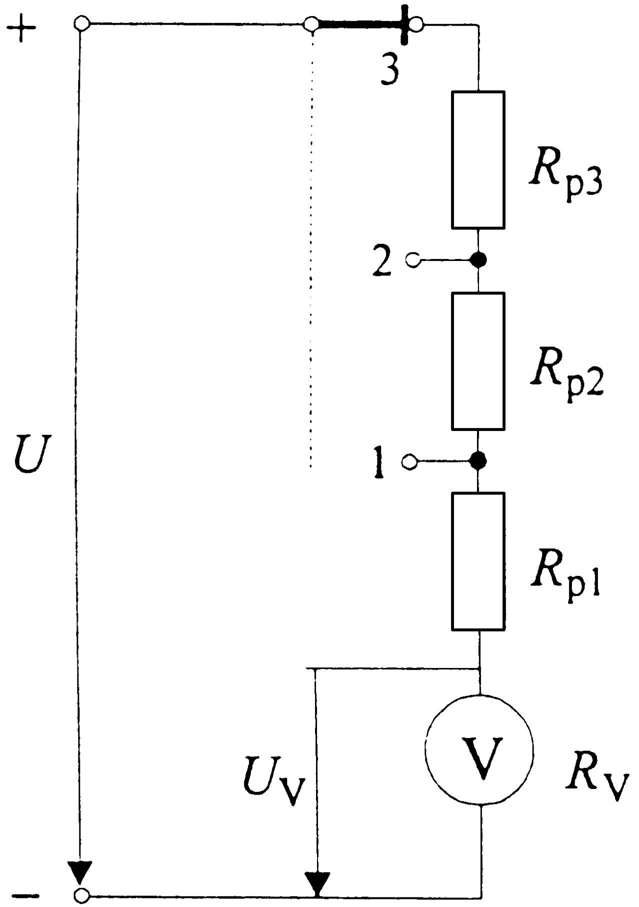
$$I_1 = I_0 \frac{R_0 + R_{s1} + R_{s2} + R_{s3} + R_{s4}}{R_{s1} + R_{s2} + R_{s3} + R_{s4}}$$

I_0 - največji tok čez sam merilni instrument.

Karakteristični padec napetosti (napetost med + in – vhodom) je malo odvisen od merilnega območja:

- od $I_0 R_0$ do $I_0 (R_0 + R_{s1} + R_{s2} + R_{s3})$
  - zadnji ni bistveno večji: $R_{s1} + R_{s2} + R_{s3} << R_0$

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



Slika 4.12 Razširitev merilnega območja voltmetra

Merilni doseg (narisani položaj 3) je:

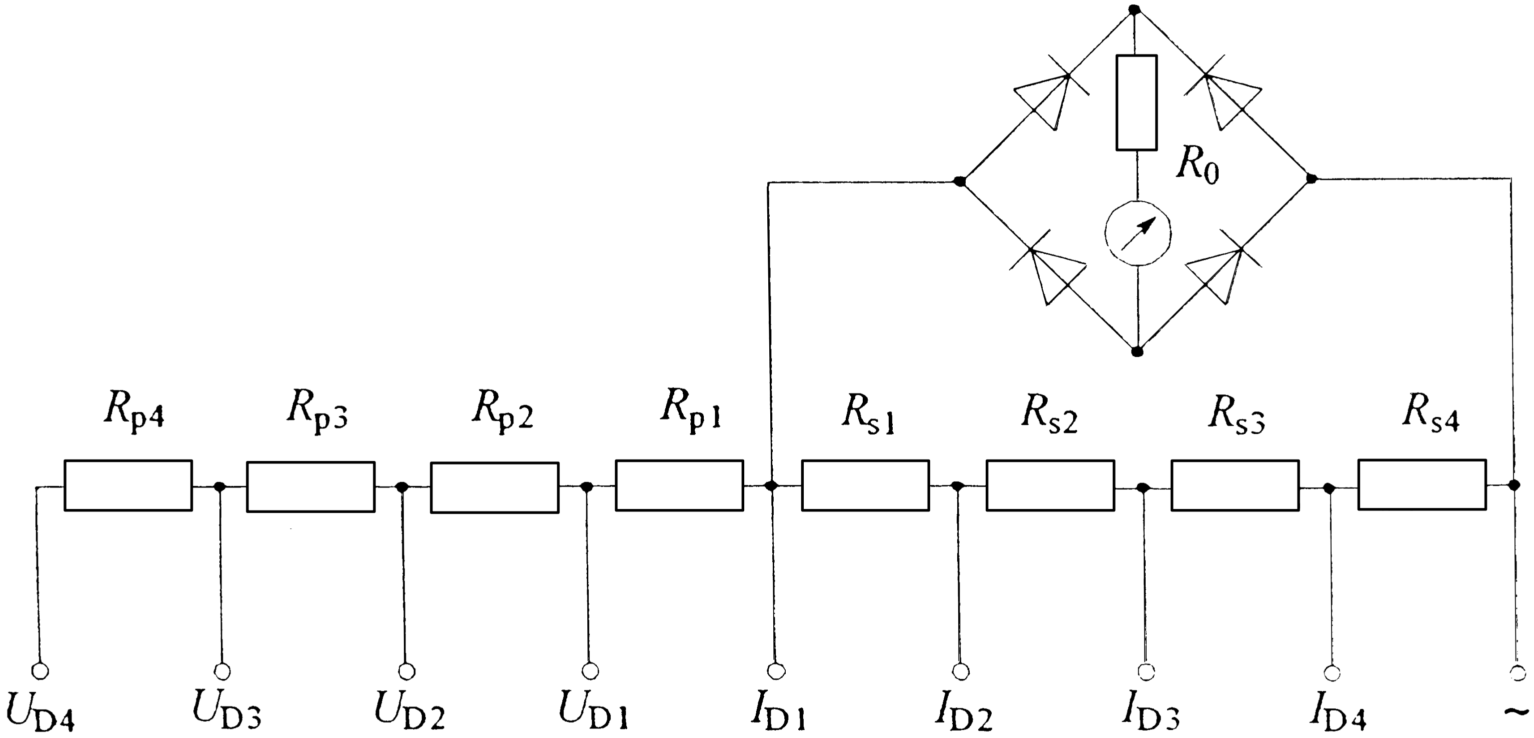
$$U_3 = \frac{U_V}{R_V}\left(R_{p1} + R_{p2} + R_{p3} + R_V\right)$$

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

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

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

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



Slika 4.19 Univerzalni instrument z vrtljivo tuljavico in polprevodniškim usmernikom