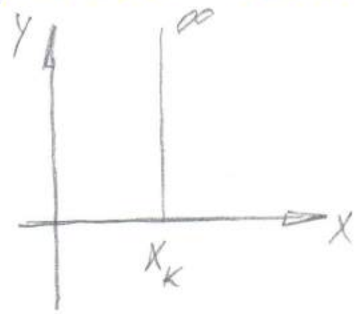
DINAMIČNE ZNAČILNOSTI MERILNIKOV

SO LASTNOSTI MERILNEGA SISTEMA OB DINAMIČNEM SPREMINJANJU MERJENE VELIČINE.

VZBUJEVALNE FUNKCIJE – TE OMOGOČAJO PREPROST, ANALITIČEN POPIS

- DIRACOVA DELTA FCN

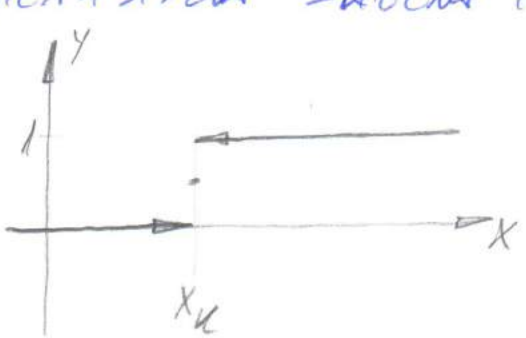


$$\delta(x-x_k) = \begin{cases} 0 & x \neq x_k \\ \infty & x = x_k \end{cases}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x-x_k)\,dx = 1 \qquad \int_{0}^{L} \delta(x-x_k)\,dx = \begin{cases} \frac{1}{2} & x = 0 \\ 1 & x \in (0, L] \end{cases}$$

δ FUNKCIJA PONAZARJA HIPEN DOGODEK, NPR. TRK, UDAR STRELE ... ČEPRAV JE TA POPIS IDEALIZIRAN.

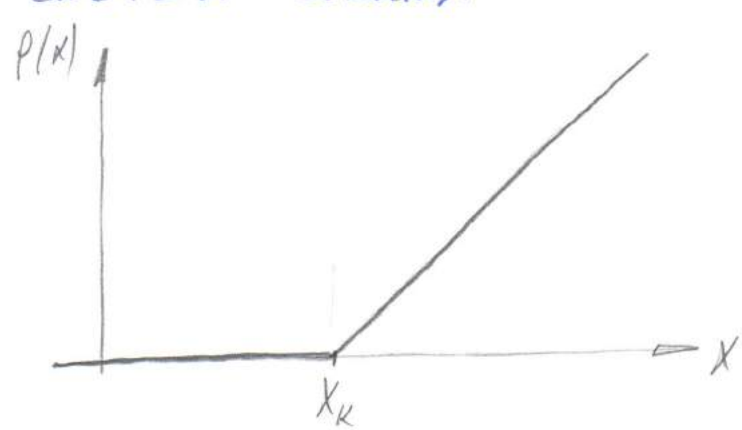
- HEAVISIDOVA SKOČNA FUNKCIJA



- PONAZARJA HIPEN SKOK IZ ENE RAVNI NA DRUGO

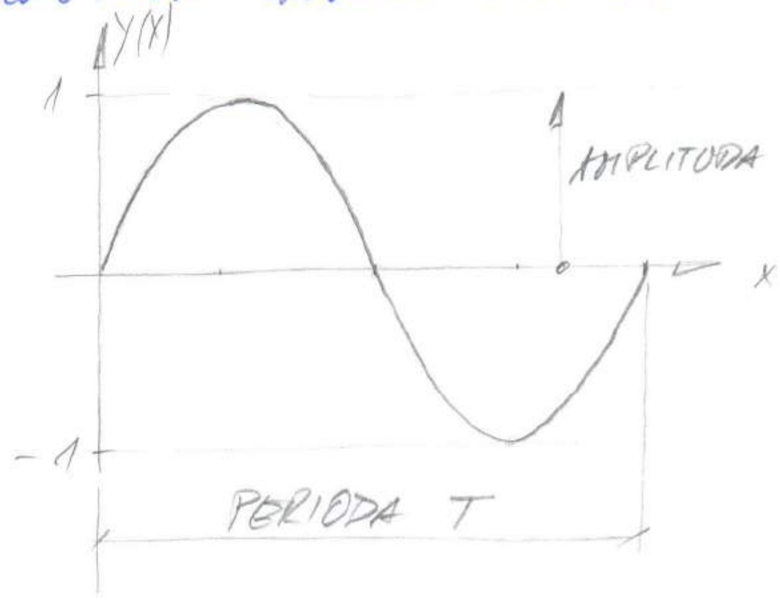
$$H(x-x_k) = \begin{cases} 1 & x > x_k \\ \frac{1}{2} & x = x_k \\ 0 & x < x_k \end{cases}$$

- ENOTSKA STRMINA



$$\rho(x-x_k) = \begin{cases} 0 & x < x_k \\ x-x_k & x \geq x_k \end{cases}$$

- ENOTSKA SINUSNA FUNKCIJA



$f = \frac{1}{T}$ - SEK. FREKVENCA

$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$ - KROŽNA FREKV.

$y(x) = A \cdot \sin(\omega t - \varphi)$

AMPLITUDA

KROŽNA FREKVENCA

FAZNI ZAMIK

- NAMESTO FAZNEGA ZAMIKA LAHKO UPORABLJAMO TUDI VSOTO SIN IN COS:

$y(x) = A \cdot \sin(\omega x) + B\cos(\omega x)$

DINAMIČNI MERILNI POGREŠEK

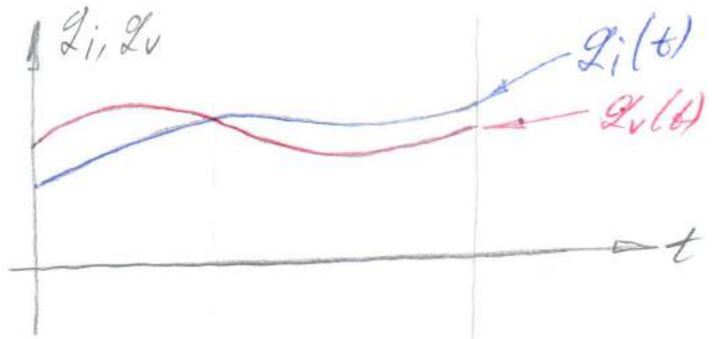
- DEFINIRAN ENAKO KOT STATIČNI MERILNI POGREŠEK.

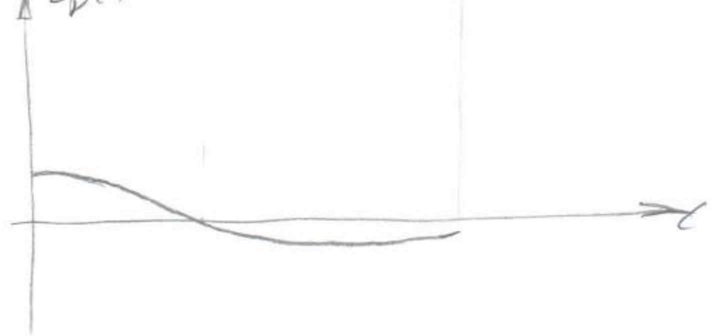
q_v - VHODNI SIGNAL

q_i - IZHODNI SIGNAL

$E_A(t) = q_i(t) - q_v(t)$

ABSOLUTNI DINAMIČNI MERILNI POGREŠEK





PRENOSNA FUNKCIJA

NAJ BO NAŠ SISTEM MODELIRAN S SLEDEČO ~~ENO~~ D.E. S KONST. KOEFICIENTI

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \ldots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_n \frac{d^n x}{dt^n} + b_{n-1} \frac{d^{n-1} x}{dt} \ldots$$

$$\ldots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x$$

VHODNIMOR ZA VSAK ČLEN IZVEDEMO LAPLACOVO TRANSFORMACIJO:

$$a_n\left(s^n Y(s) - y(0)\cdot s^{n-1} - y'(0)\, s^{n-2} + \ldots\right) + \ldots + a_0 \cdot Y(s)$$

$$= b_n\left(s^n X(s) - x(0)\, s^{n-1} - x'(0)\, s^{n-2} - \ldots\right) + \ldots + b_0 \cdot X(s)$$

VSE ZAČETNE POGOJE ZANEMARIMO IN DOBIMO ENAČBO:

$$Y(s)\cdot\left(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \ldots + a_1 s + a_0\right) = X(s)\left(b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \ldots\right.$$

$$\left.\ldots + b_1 s + b_0\right)$$

ČE ZAPIŠEMO OUTPUT Y V ODVISNOSTI OD INPUTA X, POTEM:

$$Y(s) = \boxed{\frac{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \ldots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \ldots + a_1 s + a_0}} \cdot X(s)$$

PRENOSNA FUNKCIJA
$H(s)$

RELATIVNI DINAMIČNI MERILNI POGREŠEK

$$E_R(t) = \frac{x_i(t) - x_v(t)}{x_v(t)}$$

NORMIRANA OBLIKA VZBUJEVALNEGA SIGNALA

$$\Theta_v = \frac{x_v(t) - x_{v,ZAČ}}{x_{v,KON} - x_{v,ZAČ}}$$

VENDAR NI VEDNO ENAKA $H(x)$!

PRENOSNA FUNKCIJA

- PONAZARJA ČASOVNI POTEK ODZIVA GLEDE NA VZBUJANJE
- OMEJIMO SE NA NAVADNE DIFERENCIALNE ENAČBE S KONSTANTNIMI KOEFICIENTI

OBLIKA JE:

$$\sum_{i=0}^{n} a_i \frac{d^i x_{izh}(t)}{dt^i} = \sum_{j=0}^{m} b_j \frac{d^j x_{vh}(t)}{dt^j}$$

- ZA PRIMER SKOČNEGA (HEAVISIDOVEGA) VZBUJANJA PREIDE JE V OBLIKO:

$$\sum_{i=0}^{n} a_i \frac{d^i x_{izh}(t)}{dt^i} = b_0 \cdot x_v(t)$$

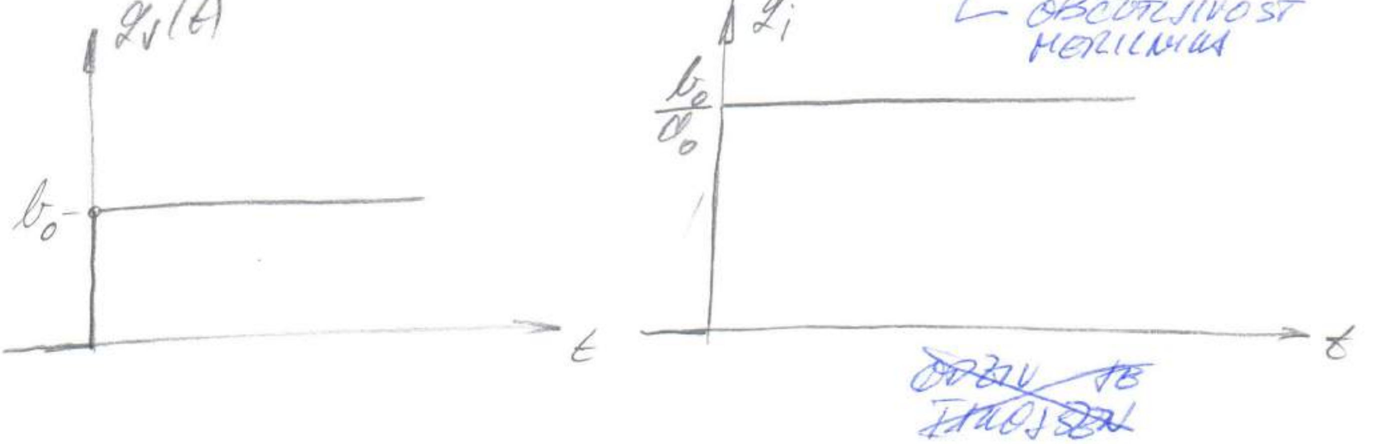
NAVADNE DIFERENCIALNE ENAČBE S KONSTANTNIMI KOEFICIENTI LAHKO REŠUJEMO Z LAPLACEOVO TRANSFORMACIJO, KI JIH PRETVORI V ALGEBRAJSKO ENAČBO. Z LAPLACEOVO TRANSFORMACIJO LAHKO DOBIMO PRENOSNO FUNKCIJO, KI JE NAMESTO V ČASOVNI V FREKVENČNI DOMENI. OBIČAJNO JE FREKVENČNA DOMENA OZNAČENA S ČRKO s IN JE $\mathbb{C}$ $(s \in \mathbb{C})$ TAKO DA: $\boxed{s = \sigma + i\omega}$

MERILNIKI 0. REDA

$$a_0 \cdot q_i = b_0 q_v \quad =$$

NISO ODVISNI OD ČASA, TOREJ: $q_i = \frac{b_0}{a_0} \cdot q_v$

OBČUTLJIVOST MERILNIKA



- ODZIV JE TAKOJŠEN
- V STRUKTURI NIMA ELEMENTA KI BI LAHKO SHRANJEVAL ENERGIJO.

PRENOSNA FUNKCIJA MERILNIKA 0. REDA:

$$a_0 \cdot Q_i(s) = b_0\, Q_v(s)$$

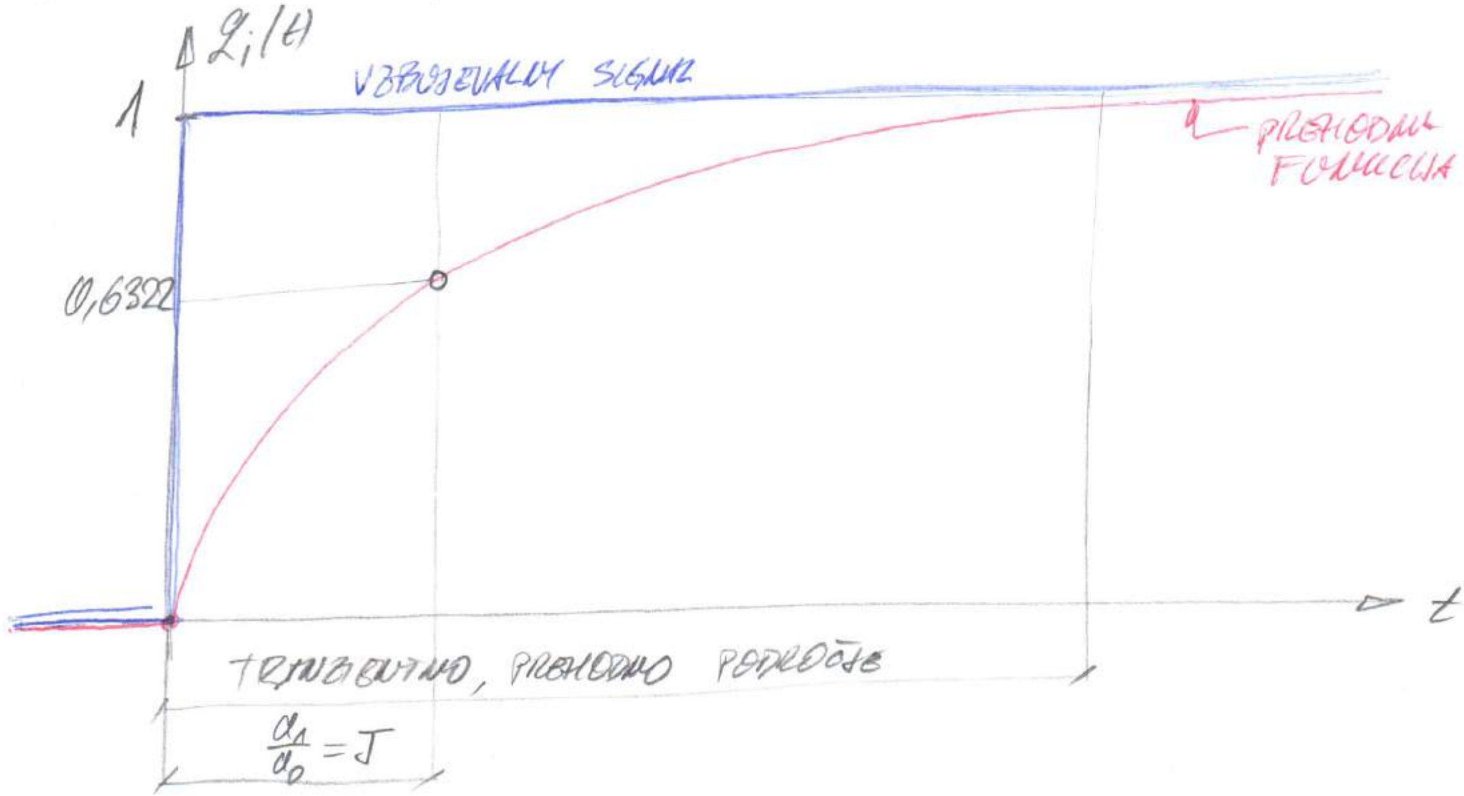
$$Q_i(s) = \boxed{\frac{b_0}{a_0}} \cdot Q_v(s)$$

PRENOSNA FUNKCIJA = OBČUTLJIVOSTI

MERILNIKI 1. REDA

- SO ZMOŽNI SHRANJEVATI ENERGIJO (IN ODDAJATI)

PREDPOSTAVLJAMO, DA IMAMO HEAVISIDOVO VZBUJANJE



DIFERENCIALNA ENAČBA, KI POPISUJE TAK MERILNIK:

$$\boxed{a_1 \frac{dq_i}{dt} + a_0 q_i = b_0 q_v}$$

V "BREZDIMENZIJSKI" OBLIKI:

$$\frac{a_1}{a_0} \cdot \frac{dq_i}{dt} + q_i = \frac{b_0}{a_0} q_v$$

OSNOVNA OBLIKA DIFERENCIALNE ENAČBE ZA MERILNIK 1. REDA

- KOEFICIENTU $\frac{a_1}{a_0}$ REČEMO TUDI ČASOVNA KONSTANTA τ

  ČASOVNA KONSTANTA POVE ČAS V KATEREM JE SISTEM DOSEGEL ≈63,2 % CELOTNE SPREMEMBE ODZIVA, MERJENO OD ZAČETNEGA STANJA $\left(1 - \frac{1}{e}\right)$

- KOEFICIENT $\frac{b_0}{a_0}$ OPISUJE STATIČNO OJAČANJE SISTEMA ~~GLEDE NA VHOD~~ JE IDENTIČNO OBČUTLJIVOSTI ČE MERILNIK OBRAVNAVAMO KOT STATIČEN.

PRENOSNA FUNKCIJA MERILNEGA SISTEMA 1. REDA:

$$a_1 \cdot \frac{d q_i}{dt} + a_0 q_i = b_0 q_v \quad / \mathcal{L}$$

$$a_1 \left[s \cdot Q_i(s) - \underbrace{q_i(0)}_{=0} \right] + a_0 \cdot Q_i(s) = b_0 \cdot Q_v(s)$$

$$Q_i(s) \left[a_1 \cdot s + a_0 \right] = b_0 \cdot Q_v(s)$$

$$\Rightarrow H(s) = \frac{Q_i(s)}{Q_v(s)} = \frac{b_0}{a_1 \cdot s + a_0} = \frac{b_0}{a_0\left(\frac{a_1}{a_0} \cdot s + 1\right)}$$

$$H(s) = \frac{\frac{b_0}{a_0}}{\frac{a_1}{a_0} s + 1} = \frac{K}{J \cdot s + 1}$$

PRENOSNA KARAKTERISTIKA MERILNEGA SISTEMA 1. REDA
JE EKVIVALENT PRENOSNI FUNKCIJI LE DA JE PISAN
V ČASOVNEM NAMESTO V FREKVENČNEM PODROČJU.

$$D = \frac{d}{dt}$$

$$a_1 \cdot \dot{q}_i(t) + a_0 \cdot q_i(t) = b_0 \cdot q_v(t)$$

$$\cancel{\frac{a_1}{a_0} \cdot \dot{q}_i(t) + q_i(t) = b_0 \cdot q_v(t)}$$

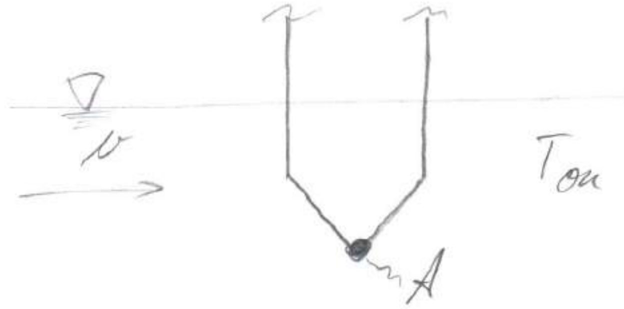
$$\cancel{q_i(t) = \frac{b_0}{\frac{a_1}{a_0} \cdot \dot{q}_i(t) + 1}}$$

$$\boxed{P(D) = \frac{K}{J \cdot D + 1}} = \frac{Q_i(D)}{Q_v(D)}$$

ŠTA SVE MAJKA RODI.

PRAKTIČNI PRIMER:

- OBRAVNAVAMO TERMOPAR, KI JE POTOPLJEN V FLUID



~~REAKCIJSKI ČAS~~

TERMOPARI IMA SVOJO LASTNO TEMPERATURO, FLUID SVOJO, ZNANA JE PRESTOPNOSTNI KOEFICIENT TOPLOTNEGA TOKA IZ FLUIDA NA TERMOPAR (IN OBRATNO)

$$\Sigma E = 0$$

$$\boxed{\dot{Q}_{ST} = \dot{Q}_{IN}} + \underbrace{\cancel{\dot{Q}_{OUT}}}_{=0} + \underbrace{\cancel{\dot{Q}_{GEN}}}_{=0}$$

$$\dot{Q}_{ST} = \dot{U} = m \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} \qquad kg \, \frac{kg\, m^2}{s^2 \cdot kg\, K} \cdot \frac{K}{s} = \frac{kg\, m^2}{s^3} = W$$

$$\dot{Q}_{IN} = \alpha \cdot A \cdot (T - T_{ok})$$

$$mc \frac{dT}{dt} = \alpha \cdot A \cdot T - \alpha A T_{ok}$$

$$mc \frac{dT}{dt} - \alpha A T = -\alpha A T_{ok} \qquad / : -\alpha \cdot A$$

$$\boxed{-\underbrace{\frac{mc}{\alpha A}}_{|\tau|} \frac{dT}{dt} + T = T_{ok}}$$

$$\tau = \frac{mc}{\alpha A} = \frac{\rho_T c_T \cdot V_T}{\alpha \cdot A_T}$$

T - TERMOPAR

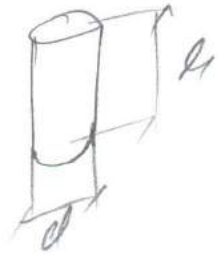
=

ZA PRIMER ČE JE TERMOPAR KROGLICA

$$\tau = \frac{\rho_T \cdot c_T \cdot \pi d^3}{6 \cdot \alpha \cdot \pi \cdot d^2} = \frac{\rho_T c_T d}{6 \alpha}$$

ZA HITER ODZIV POTREBUJEM:
- MAJHNO KAPACITIVNOST,
- MAJHEN PREMER
- VISOKO PRESTOPNOST (HITER TOK, VISOKA GOSTOTA FLUIDA)

- ZA PRIMER KO JE ZAZNAVALO VALJČEK



$$\tau = \frac{m_T c_T}{\alpha \cdot A_T} = \frac{\rho_T c_T \cdot V_T}{\alpha \cdot A}$$

- V PRIMERU DA ZANEMARIMO POVEZAVO MED ŽICAMI:

$$V = \frac{\pi d^2 h}{4}$$

$$A = \pi d h + \frac{\pi d^2}{2} = \pi d \left(h + \frac{d}{2}\right)$$

$$\tau = \frac{\rho_T c_T \cancel{\pi} d^{\cancel{2}} h}{4 \alpha \cancel{\pi} \cancel{d} \left(h + \frac{d}{2}\right)} \Rightarrow$$

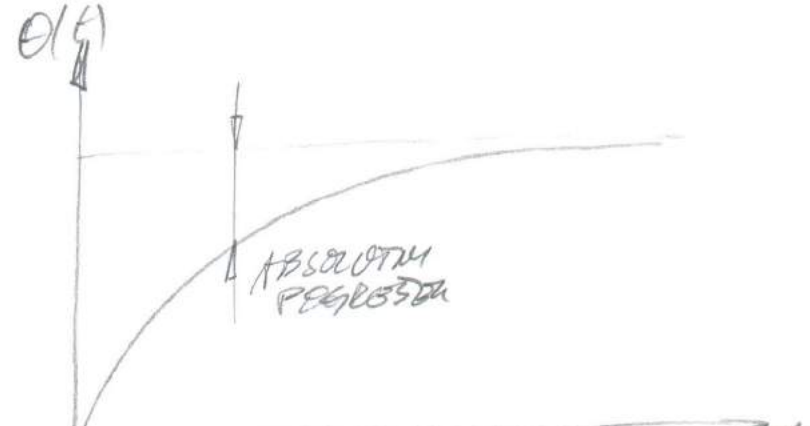
$$\tau = \frac{\rho_T c_T d h}{4 \alpha \left(h + \frac{d}{2}\right)} = \frac{\rho_T c_T d}{4 \alpha \left(1 + \frac{d}{2h}\right)}$$

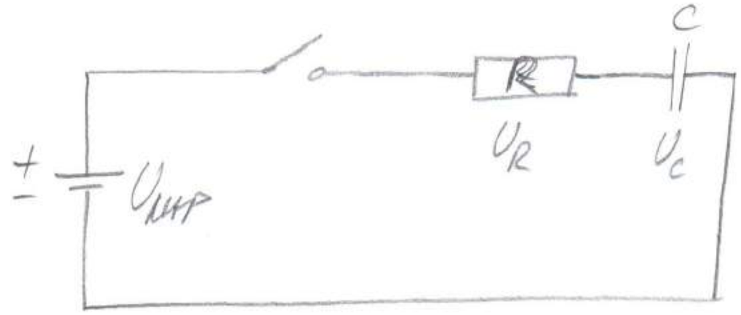
NORMIRANA PREHODNA FUNKCIJA ZA MERILNIK 1. REDA

$$\Theta(t) = \frac{\vartheta_i(t) - \vartheta_{V,ZAČ}}{\vartheta_{V,KON} - \vartheta_{V,ZAČ}} = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}}$$

ASIMPTOTA

TOREJ, KO JE $t = \tau$ ZASEDE $\Theta(\tau) = 1 - e^{-1}$





– KAKO SE NA KONDENZATORJU SPREMINJA NAPETOST

II. KIRCHOFFOV ZAKON:

$$U_{NAP} - U_R - U_C = 0$$

KONDENZATOR:

NABOJ:

$$q = C \cdot U_C$$

TOK:

$$I = \frac{dq}{dt} = C \cdot \frac{dU_C}{dt}$$

UPOR:

$$U_R = R \cdot I$$

VSE SKUPAJ; PRI ODZIVU IŠČEM FUNKCIJO KAKO SE NA C SPREMINJA NAPETOST

$$U_R + U_C = U_{NAP}$$

$$R \cdot I + U_C = U_{NAP} \quad \cdot H(t)$$

← KDAJ SE VKLOPI STIKALO

$$\boxed{R \cdot C \cdot \frac{dU_C}{dt} + U_C = U_{NAP}} \Rightarrow \boxed{\tau = R \cdot C}$$

$$R \cdot C \cdot (s \cdot U_C(s) - \cancel{U_C(0)}) + U_C(s) = U_{NAP} \cdot H(s)$$

$$U_C(s)\left[RCs + 1\right] = U_{NAP} \cdot H(s)$$

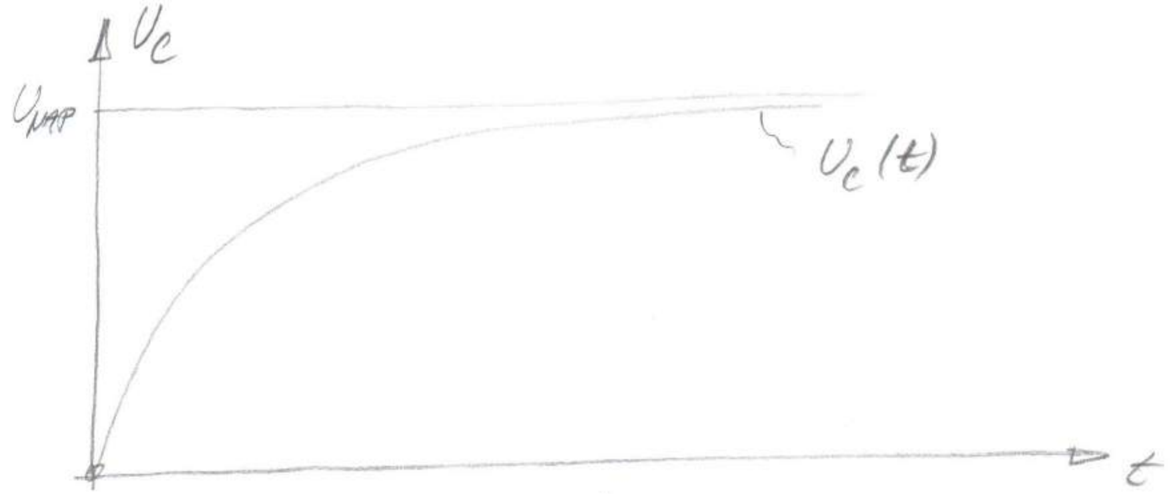
$$\frac{U_C(s)}{H(s)} = \frac{U_{NAP}}{\underbrace{RC}_{\tau}s + 1} = \text{PRENOSNA FUNKCIJA}$$

OB ZAPISEMO NORMIRANO PREHODNO FCN

$$\Theta(t) = \boxed{\frac{g_i - g_{v,z}}{g_{v,k} - g_{v,z}} = 1 - e^{-\frac{t}{J}}}$$

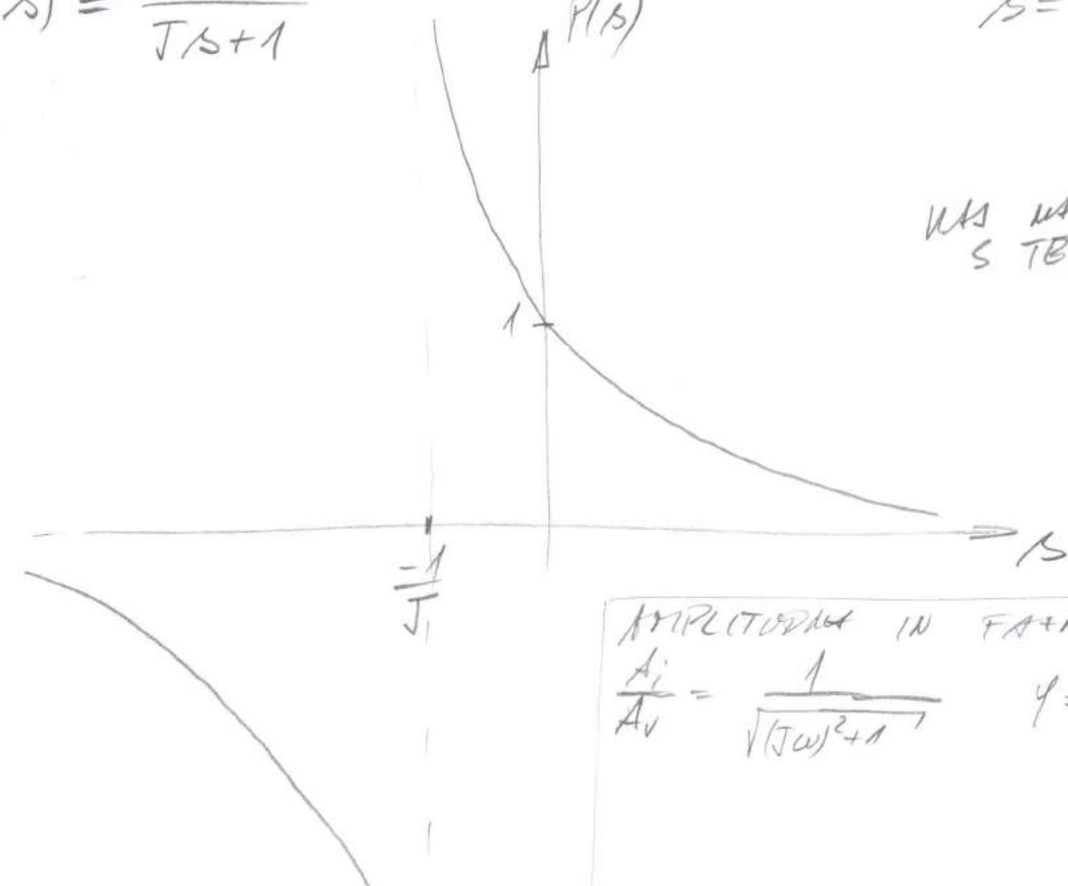
$$g_i = \underbrace{g_{v,z}}_{=0} + \left(1 - e^{-\frac{t}{J}}\right)\left(\overset{U_{NAP}}{g_{v,k}} - \underbrace{\cancel{g_{v,z}}}_{=0}\right)$$

$$g_{izh} = U_C = \left(1 - e^{-\frac{t}{J}}\right) \cdot U_{NAP}$$



$$P(s) = \frac{1}{Js+1} \quad \text{(NORMIRAN)}$$

$$Js + 1 = 0$$
$$s = \frac{-1}{J}$$



KAJ NAS S TEM?

AMPLITUDNA IN FAZNA ZNAČILNICA

$$\frac{A_i}{A_v} = \frac{1}{\sqrt{(J\omega)^2 + 1}} \qquad \varphi = -\operatorname{arctg}(\omega T)$$

DODATNE OPOMBE GLEDE ČASOVNE KONSTANTE SISTEMA

- ČASOVNA KONSTANTA JE PARAMETER KI POVE V KOLIKŠNEM ČASU BO SISTEM DOSEGEL $\approx 63,2\,\%$ VRŠNE VREDNOSTI HEAVISIDOVEGA VZBUJANJA.
- ODVISNA JE OD MNOGIH PARAMETROV, OBIČAJNO SO TO GEOMETRIJSKI, SNOVNI IN TOKOVNI PARAMETRI, ODVISNO OD TIPA SISTEMA KI GA OBRAVNAVAMO.

MERILNIKI DRUGEGA REDA

- MERILNIKI DRUGEGA REDA IMAJO ŠE DODATNE ELEMENTE KI LAHKO SHRANJUJEJO ENERGIJO V OBLIKI VZTRAJNOSTNIH MAS ALI ELEKTRIČNE INDUKTIVNOSTI ITD.
- OBIČAJNO SE MERILNIKI OZNAČIJO KOT MERILNIKI DRUGEGA REDA TAKRAT KO IMAJO DODATNO LASTNOST

SPLOŠNA ENAČBA

$$\boxed{a_2 \frac{d^2 q_i}{dt^2} + a_1 \frac{d q_i}{dt} + a_0 \cdot q_i = \underbrace{b_0 \cdot q_v}}$$

POMENI SKOČNO, HEAVISIDOVO VZBUJANJE

$$\frac{a_2}{a_0} \frac{d^2 q_i}{dt^2} + \frac{a_1}{a_0} \frac{d q_i}{dt} + q_i = \frac{b_0}{a_0} q_v$$

OB ŽELIMO IZVEDETI PRENOSNO FCN:

$$\frac{a_2}{a_0}\left(s^2 Q_i(s) - s\cdot \underbrace{\cancel{q_i(0)}}_{=0} - \underbrace{\cancel{q_i'(0)}}_{=0}\right) + \frac{a_1}{a_0}\, s\cdot Q_i(s) - \underbrace{\cancel{q_i(0)}}_{=0} + Q_i(s) = \frac{b_0}{a_0}\cdot Q_v(s)$$

$$Q_i(s)\cdot\left[\frac{a_2}{a_0}s^2 + \frac{a_1}{a_0}\cdot s + 1\right] = \frac{b_0}{a_0}\cdot Q_v(s)$$

$$\frac{Q_i(s)}{Q_v(s)} = \boxed{\frac{\frac{b_0}{a_0}}{\frac{a_2}{a_0}s^2 + \frac{a_1}{a_0}\cdot s + 1} = H(s)}$$

PRENOSNA FUNKCIJA MERILNIKA 2. REDA

V BREZDIMENZIJSKI OBLIKI LAHKO ZAPIŠEMO

$$H(s) = \frac{K}{\frac{1}{\omega_0^2}s^2 + \frac{2\delta}{\omega_0}s + 1}$$

δ - RAZMERNIK DUŠENJA

ω_0 - LASTNA FREKVENCA, NEDUŠENA

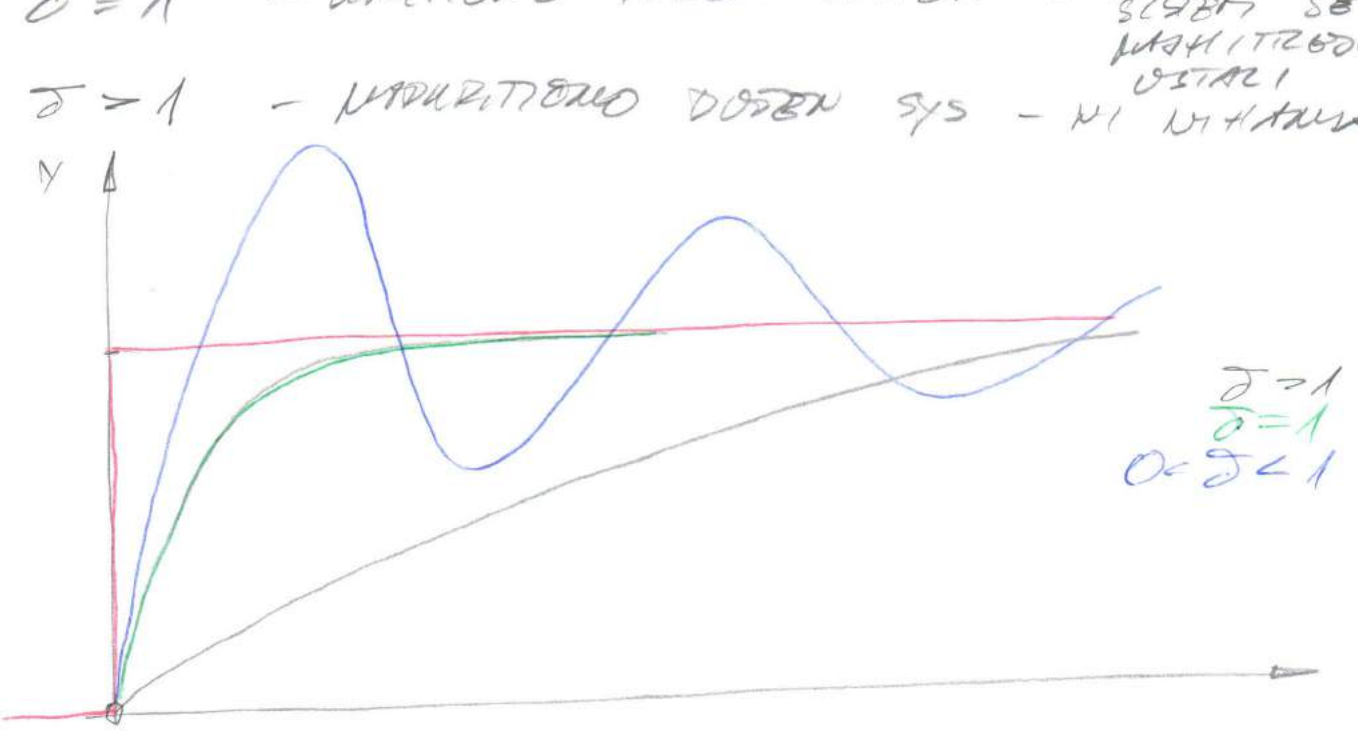
K - OBČUTLJIVOST

FAKTOR DUŠENJA IMA 3 INTERVALE:

$\delta \in [0, 1)$ - PODKRITIČNO DUŠEN SISTEM $\Rightarrow \exists$ NIHANJE

$\delta = 1$ - KRITIČNO DUŠEN SISTEM $\rightarrow$ NIHANJA NI, SISTEM SE NAJHITREJE USTALI

$\delta > 1$ - NADKRITIČNO DUŠEN SYS - NI NIHANJA



12

SPLOŠNA REŠITEV, NORMIRANA 1B

$$\theta(t) = 1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_1}} - \frac{T_2}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t}{T_2}}$$

$$\theta_i = e^{-\delta \omega_0 t} \left(A \sin(\omega_{0D} t) + B \cos(\omega_{0D} t) \right)$$

$$\omega_{0D} = \omega_0 \sqrt{1 - \delta^2}$$

12,5

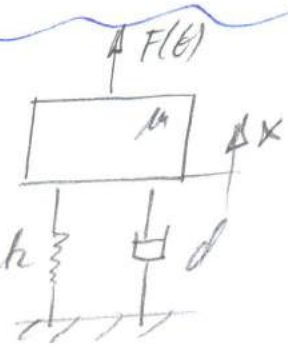
SPLOŠNA REŠITEV ENAČBE LAHKO IŠČEMO Z NASTAVKOM

$$y(t) = C\cdot e^{\lambda_i t}$$

PRENOSNO FUNKCIJO LAHKO PODAMO KOT:

$$H(s) = \frac{K}{\frac{1}{\omega_0^2}s^2 + \frac{2\zeta}{\omega_0}s + 1} = \frac{K}{(1+T_1 s)(1+T_2 \cdot s)}$$

PRIMERI



$$m\ddot{x} + d\dot{x} + kx = F(t) \quad /:k$$

$$\boxed{\underbrace{\frac{m}{k}}_{\frac{1}{\omega_0^2}}\ddot{x} + \underbrace{\frac{d}{k}}_{\frac{2\zeta}{\omega_0}}\dot{x} + x = \frac{F(t)}{k}}$$

$$\frac{1}{\omega_0^2}\left(s^2 X(s) - s\,x(0) - \dot{x}(0)\right) + \frac{d}{k}\cdot sX(s) - x(0) + X(s) = \frac{1}{k}\cdot F(s)$$

$$= 0$$

$$X(s)\left[\frac{1}{\omega_0}s^2 + \frac{2\zeta}{\omega_0}s + 1\right] = \frac{1}{k}\cdot F(s)$$

$$\frac{X(s)}{F(s)} = H(s) = \frac{\frac{1}{k}}{\frac{1}{\omega_0^2}s^2 + \frac{2\zeta}{\omega_0}s + 1}$$

PRENOSNA FUNKCIJA ZA MODEL MEHANSKEGA NIHALA 2. REDA.

OPOMBA: ČE DELAM TAKO KOT DELA BOLTEŽAR, POTEM JE

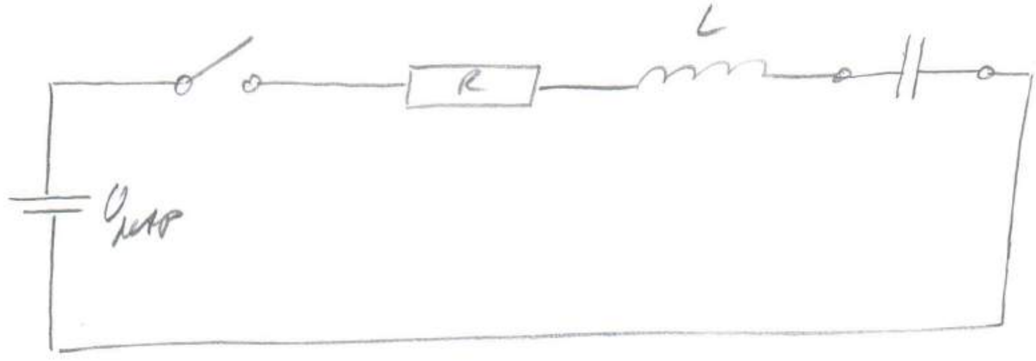
$$\boxed{\ddot{x} + 2\zeta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2 x = \frac{1}{m}\cdot F(t)} \Rightarrow$$ DAM V LAPLACA, ZANEMARIM ZAČETNE POGOJE

$$X(s)\left[s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2\right] = \frac{1}{m}\cdot F(s)$$

PRENOSNA FUNKCIJA:

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{\frac{1}{m}}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2}$$

PRENOSNA FUNKCIJA MI POVE TUDI FREKVENCO PRI KATERI IMA SISTEM NAJVEČJI ODZIV



- ZANIMA ME NAPETOST NA KONDENZATORJU
- KIRCHOFFOV ZAKON :

$$U_R + U_L + U_C = U_{NAP} \cdot H(t)$$ HEAVISIDE

$$U_L = L \cdot \frac{dI}{dt} \longleftarrow I = C \frac{dU_C}{dt} \longrightarrow U_R = R \cdot I$$

$$U_L = L \cdot \left(C \cdot \frac{d^2 U_C}{dt^2}\right) \qquad U_R = R \cdot C \cdot \frac{dU_C}{dt}$$

$$RC \frac{dU_C}{dt} + LC \frac{d^2 U_C}{dt^2} + U_C = U_{NAP} \cdot H(t)$$

$$\frac{d^2 U_C}{dt^2} + \underbrace{\frac{R\cancel{C}}{L\cancel{C}}}_{2\delta\omega_0} \cdot \frac{dU_C}{dt} + \underbrace{\boxed{\frac{1}{RC}}}_{\omega_0^2} U_C = \frac{U_{NAP} \cdot H(t)}{RC}$$

$$\omega_{OD} = \omega_0 \sqrt{1 - \delta^2}$$

$$U_C = e^{-\delta \omega_0 t} \left(A \cos(\omega_{OD} t) + B \sin(\omega_{OD} t)\right)$$

PRENOSNA FUNKCIJA :

$$\boxed{H(s) = \frac{\frac{1}{RC}}{s^2 + \frac{R}{L} s + \frac{1}{RC}}}$$

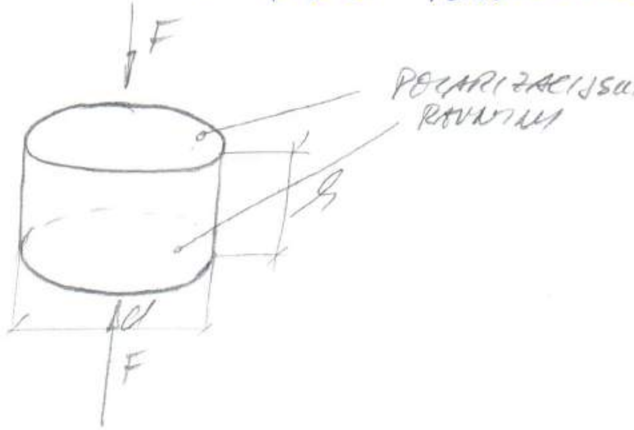
PIEZOELEKTRIČNA MERILNA ZAZNAVALA

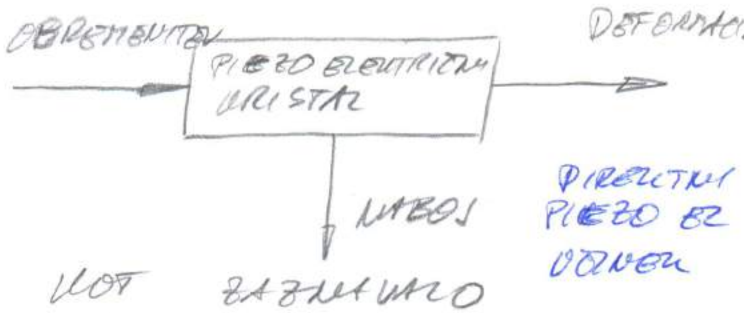
PRITISKALI

PIEZOELEKTRIČNOST JE LINEARNO ELEKTROMEHANSKO IZMENIČNO DELOVANJE MED MEHANSKIM IN ELEKTRIČNIM STANJEM V KRISTALIH BREZ OSNE SIMETRIJE.

PRIMER: SiO_2, BARIJEV TITANAT ($BaTiO_3$)

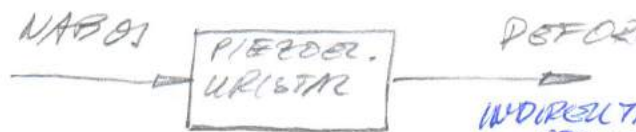
- SO AKTIVNA, NE POTREBUJE NAPAJANJA



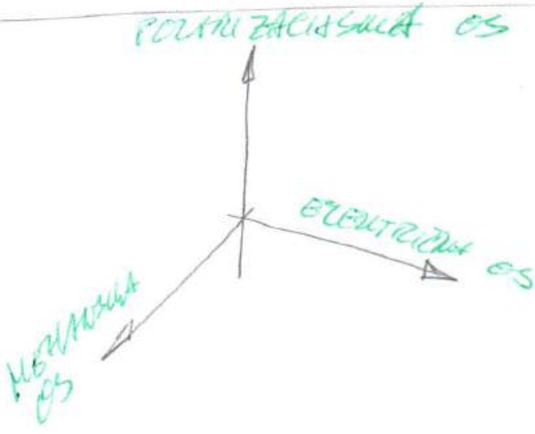


KOT ZAZNAVALO

KOT GENERATOR MEHANSKE DEFORMACIJE



- ZA ULTRAZVOK NPR



OBČUTLJIVOST KRISTALA:

$$d_{ij}^{ij} = \frac{Q^i}{F^j} \qquad \Big| \; d^{ij} = \frac{\partial Q^i}{\partial F^j}$$

POLAR. MEHANSKA

PIEZO KRISTAL DELUJE KOT PLOŠČNI KONDENZATOR

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_R \frac{A}{d}$$

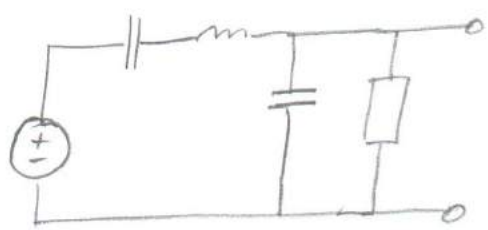
CURIEJEVA TEMPERATURA → KO ZAČNE DIELEKTRIČNA KONSTANTA ε_R NAGLO UPADATI (FEROELEKTRIČNOST → PARAELEKTR.)

- RAZLIČNE SMERI OBREMENITVE POVZROČIJO DRUGAČNO POLARIZACIJO NABOJA NA POLARIZACIJSKIH RAVNINAH

MERILNO-TEHNIČNE ZNAČILNOSTI

- SAMO NAPAJALNA
- OPTIMALNI ZA DINAMIČNE POJAVE IN NENADNE MEHANSKE SPREMEMBE (POSPEŠEK, TLAK, NIHANJA ...)
- $\omega_0 > 3000$ rad/s
- TOČNOST $\approx$ 0,3% MR
- KRATKI ODZIVNI ČASI $\approx \tau \approx 20$ ms
- DOPUSTNO PREOBREMENITVE
- OMEJENI S TEMPERATURO
- ZAHTEVAJO NABOJNE OJAČEVALNIKE

MODEL PIEZOEL. KRISTALA



$$Q = d \cdot F \cdot n$$

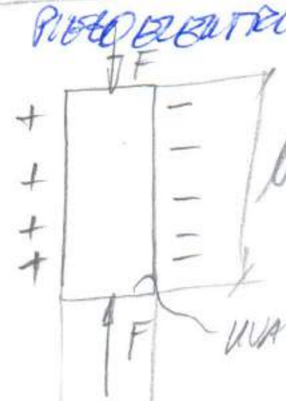
NABOJ, OBČUTLJ., SILA, ŠTEVILO ELEMENTOV

$$OB = \frac{dI}{dV} = \frac{dQ}{dF} = d \cdot n$$

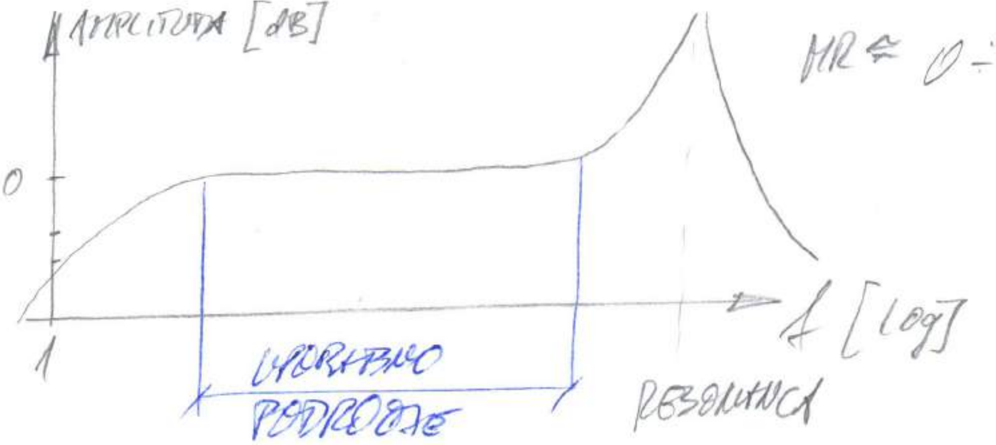
IZHOD, VHOD

PREČNI PIEZOELEKTRIČNI UČINEK - KRISTAL JE ROTIRAN ZA 90°

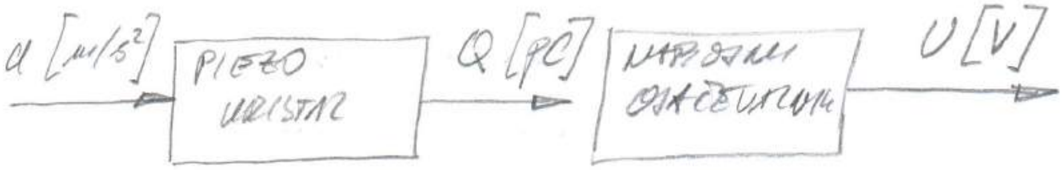
$$Q = d \cdot F \cdot \frac{b}{a}$$



VIRI NEGOTOVOSTI:
- SLABA PRITRDITEV
- PRITRDITEV NA DELE KI SO BLIZU RESONANCE
- ŠUM OKOLJA (ZVOK, VLAŽNOST, $\vec{B}$, RADIOAKTIVNOST ...)
- KABLI (PRITRDITEV)
- ZVIJANJE PODLAGE

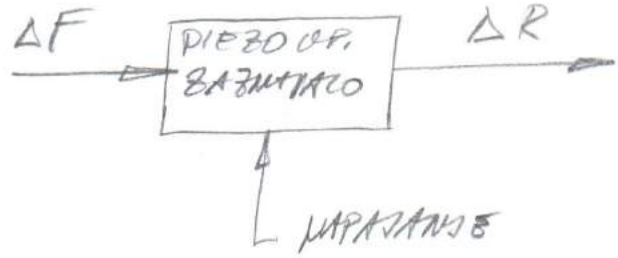


MR ≑ 0 ÷ 80 % ω_0



PIEZO UPOROVNA MERILNA ZAZNAVALA

- SO PASIVNA ZAZNAVALA (POTREBNO NAPAJANJE)
- ZA STACIONARNE IN DINAMIČNE POJAVE



PIEZO UPOROVNI UČINEK DAJA ODVISNOST MED ELEKTRIČNO (SPECIFIČNO ELEKTRIČNO) UPORNOSTJO IN MEHANSKO NAPETOSTJO. $\rho = f(\sigma)$

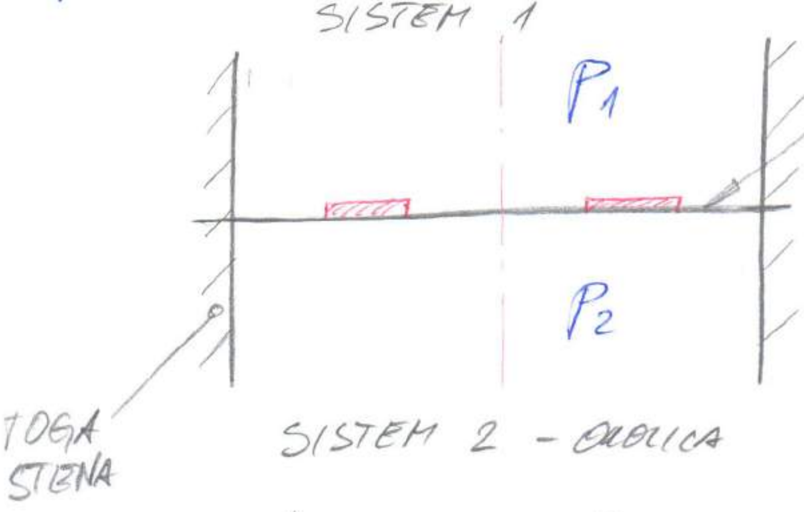
SPECIFIČNA EL. UPORNOST JE ODVISNA OD TEMPERATURE $\rho = \rho_0(1+\alpha(T-T_0))$

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A}$$

$$\sigma = \frac{F}{A} = \underbrace{E \cdot \varepsilon}_{\text{HOOKOV ZAKON}}$$

PRIMER IZVEDBE ZA MERJENJE TLAKA:

- MERILNIK Z REFERENCO NA TLAK OKOLICE ALI DIFERENCIALNI MERILNIK TLAKA



$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \Rightarrow dR = \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho + \frac{\partial R}{\partial L} dL + \frac{\partial R}{\partial A} dA$$

$$\frac{L}{A} \cdot d\rho + \frac{\rho}{A} \cdot dL - \frac{\rho L}{A^2} dA \quad / : R$$

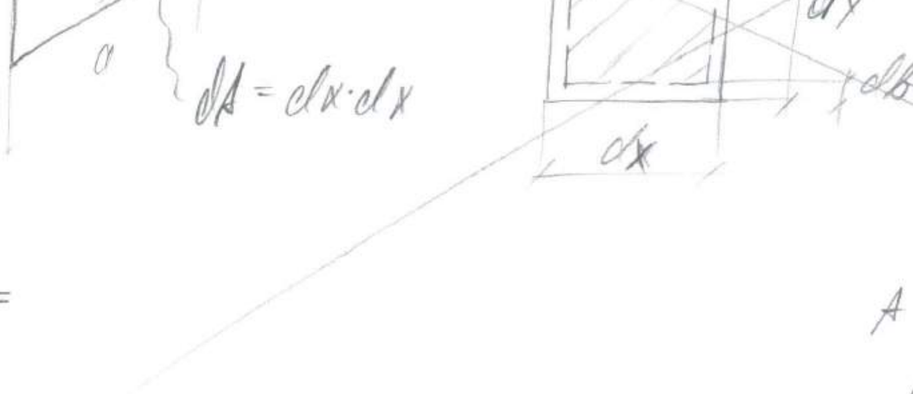
$$\frac{dR}{R} = \underbrace{\frac{L}{R \cdot A}}_{\frac{1}{\rho}} d\rho + \underbrace{\frac{\rho}{RA}}_{\frac{1}{L}} dL - \underbrace{\frac{\rho L}{RA^2}}_{R} dA$$

PRIMERNA OBLIKA

$$\boxed{\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A}}$$

?

$$\nu = \frac{\varepsilon_q}{\varepsilon} \Rightarrow \varepsilon_q = \nu \varepsilon$$



$$\varepsilon_{qx} = \frac{\Delta x}{x} = \frac{da}{dx}$$

$$\varepsilon_{qy} = \frac{\Delta y}{y} = \frac{db}{dy}$$

$$\frac{da}{dx} = \varepsilon \nu = \frac{db}{dy}$$

$$\boxed{\frac{da}{dx} = \frac{db}{dy}}$$

$A =$

$$A = \int_A dA = \int_x \int_y dy\, dx$$

$$A = \int_x \int_y \frac{db}{\varepsilon \nu} \cdot \frac{da}{\varepsilon \nu}$$

IZ PREDAVANJ SLEDI:

$$-\frac{dA}{A} = 2\nu \frac{dl}{l}$$

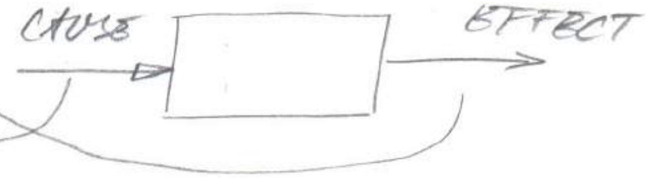
TOREJ BO

$$\boxed{\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l}(1+2\nu) + \frac{d\rho}{\rho}}$$

MODEL ZA SPREMINJANJE UPORNOSTI Z OBREMENITVIJO.

GAUGE FACTOR – OBČUTLJIVOST MERILNIKA

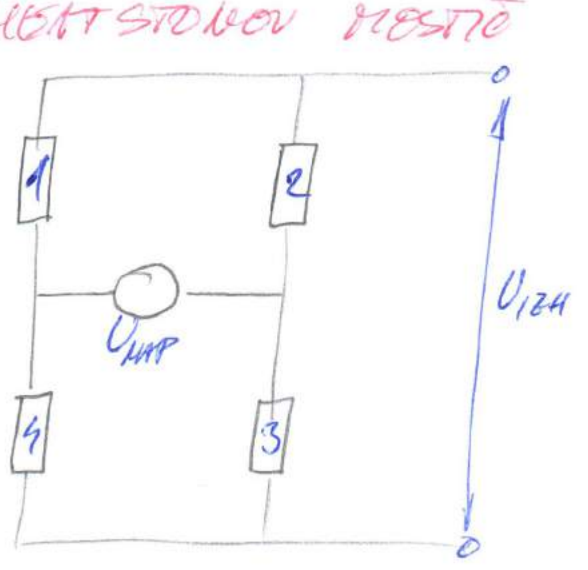
$$GF = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}}$$



$$\frac{\Delta R}{R} = GF \cdot \frac{\Delta L}{L} = GF \cdot \varepsilon$$

GF JE V GROBEM PRENOSNA FUNKCIJA PIEZOUPOROVNEGA ZAZNAVALA.

WHEATSTONOV MOSTIČ



$$\frac{U_{IZH}}{U_{NAP}} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1+R_2)(R_3+R_4)}$$

ČE JE ENAKA UPORNOST IN GAUGE FACTOR

$$\frac{U_{IZH}}{U_{NAP}} = \frac{1}{4R}\left(\Delta R_1 - \Delta R_2 + \Delta R_3 - \Delta R_4\right)$$

$$\frac{U_{IZH}}{U_{NAP}} = \frac{GF}{4R}\left(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4\right)$$

WHEATSTONOV MOSTIČEK JE NAPRAVA KI LAHKO SPREMEMBO UPORNOSTI PRETVORI V SPREMEMBO NAPETOSTI.

CELOTEN MERILNI SISTEM JE TAKO:

ČE UPOŠTEVAMO ŠE SPREMEMBO

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \varepsilon \cdot GF \cdot (1-\alpha \Delta T)(1+\alpha \Delta T)$$

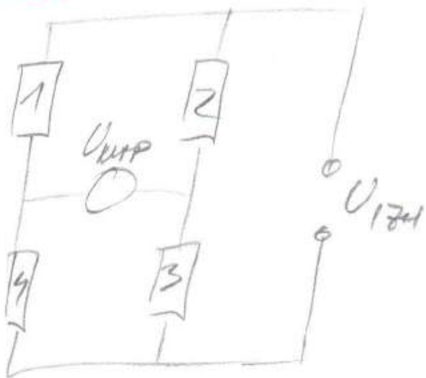
ČE NAPAJAMO STABILNO Z $I = konst$

$U = R \cdot I$

$R = \frac{U}{I}$

$$\frac{U_{IZH}}{U_{NAP}} = \varepsilon\, GF\, (1-\alpha \Delta T)(1+\alpha \Delta T)$$

ENAČBE ZA PRERAČUN WHEATSTONOVEGA MOSTIČA:



$1/4$: $\frac{U_{IZH}}{U_{NAP}} = \frac{1}{4R} \Delta R_1$ (3x PASIVNI)

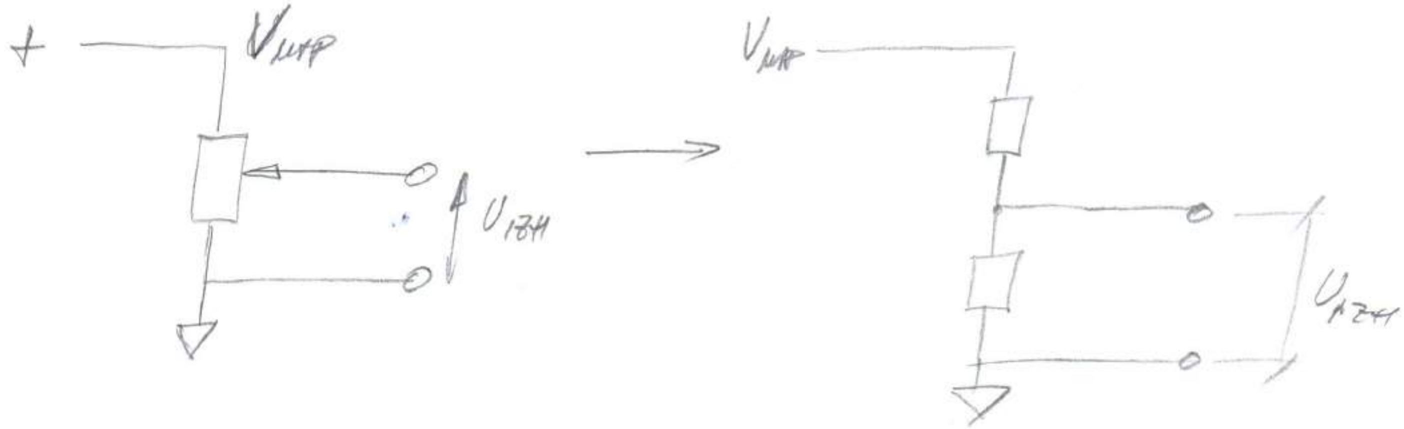
$1/2$: $\frac{U_{IZH}}{U_{NAP}} = \frac{1}{4R} (\Delta R_1 - \Delta R_2)$ (2x PASIVNI)

$1/1$: $\frac{U_{IZH}}{U_{NAP}} = \frac{1}{4R} (\Delta R_1 - \Delta R_2 + \Delta R_3 - \Delta R_4)$

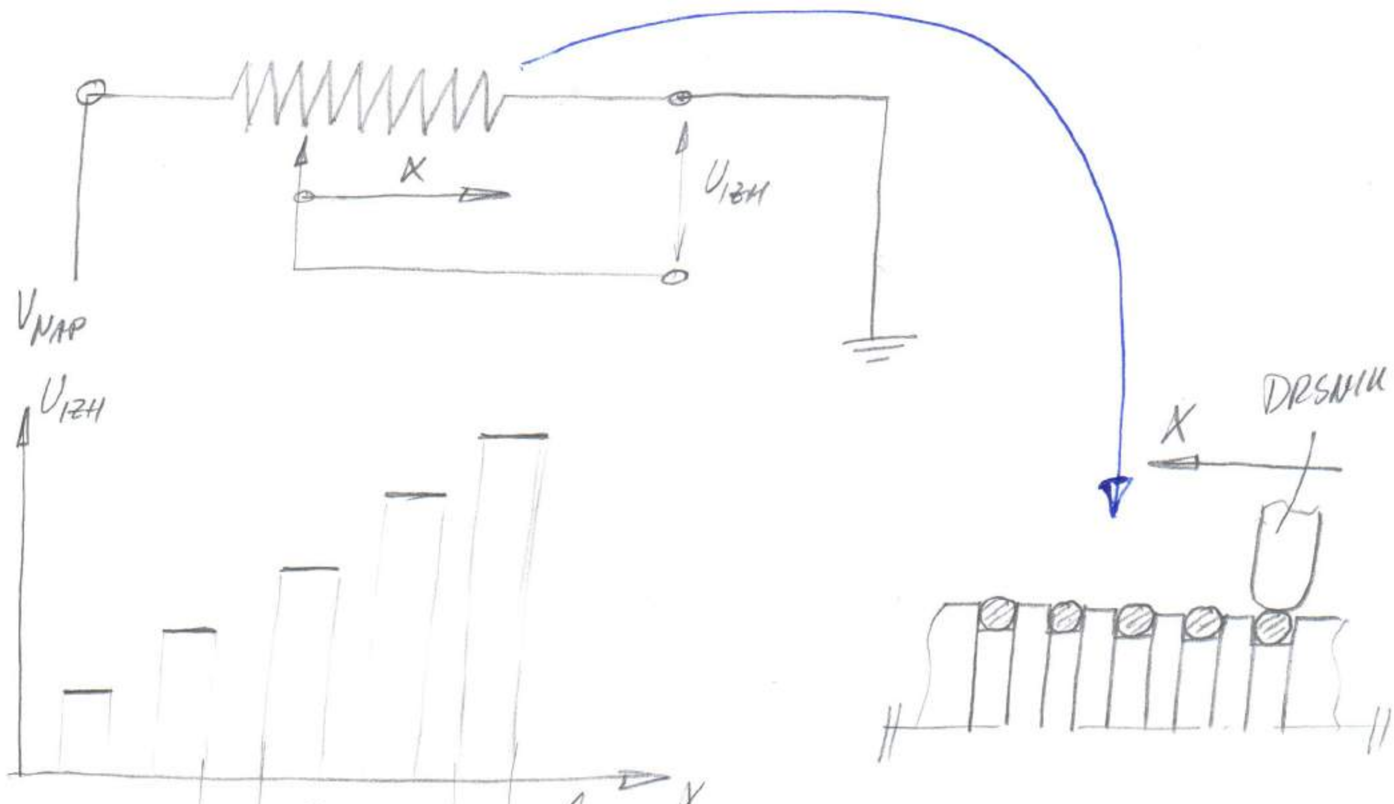
PREDPOSTAVKA: VSI UPORI SO ENAKI, IDEALNEGA ZNAČAJA.

POTENCIOMETRIČNA MERILNA ZAZNAVALA

- JE V OSNOVI IZVEDEN KOT DELILNIK NAPETOSTI



- FIKSNO SO IZVEDENI KOT NAPARJENA IZVEDBA ALI NAVITA ŽICA OKOLI IZOLATORJA



a - DRSNIK JE V KONTAKTU Z IZOLATORJEM

b - DRSNIK JE V KONTAKTU Z PREVODNIKOM (IDEALIZIRANO!)

OČITNO RABIM ZA BOLJŠI SIGNAL DOVOLJ ŠIROK DRSNIK, TAKO DA JE VEDNO V STIKU S PREVODNIKOM. IDEALIZIRANA JE ZATO, KER NE MORE BITI VEDNO V STIKU ZARADI POVRŠINA, OBSTOJA TRENJE, OBRABA IN POSLEDIČNO NEGOTOVOST

REŠITEV NEZVEZNOSTI SO MANJŠI, FILMSKO NAPARJENI POTENCIOMETRI. ~~VEČOBR~~

POTENCIOMETER

ŽIČNI

- ROBUSTNI
- MANJ OBČUTLJIVI NA POGOJE OKOLICE
- NIZEK, ODVISEN OD ČASA
- KVANTIFICIRANA LOČLJIVOST
- VISOKA PORABA MOČI

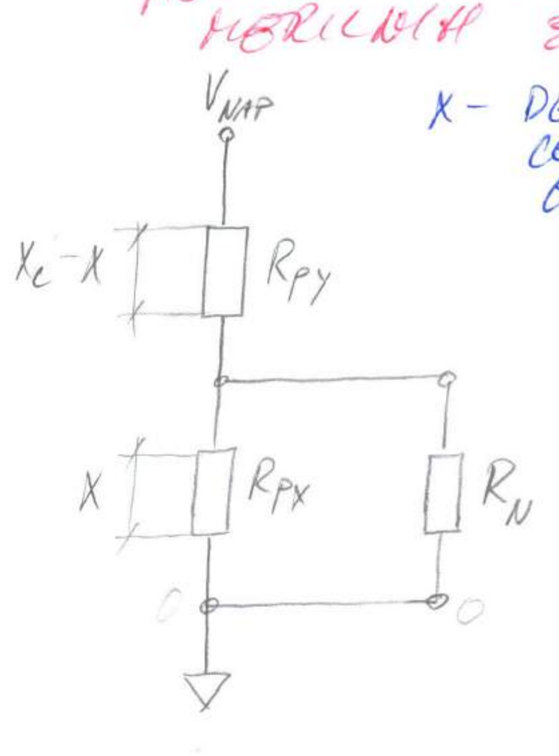
FILMSKO NAPARJENI

- OBČUTLJIVI NA POGOJE OKOLICE (TEMP. STABIL.)
- ZVEZNA LOČLJIVOST
- NIZKA PORABA MOČI
- NIZEK ŠUM

- POTENCIOMETRIČNA ZAZNAVALA SO AKTIVNA ZAZNAVALA, ZA DELOVANJE POTREBUJEJO ENOSMERNO NAPETOST
- ZARADI MOŽNEGA PREKOMERNEGA SEGREVANJA MORA BITI (OMEJENA NAPETOST)

$$P = \frac{U^2}{R} \Rightarrow U_{NAP} \leq \sqrt{P \cdot R_{CEL}}$$

MERILNI MODEL POTENCIOMETRIČNIH MERILNIH ZAZNAVAL



X – DELEŽ POLOŽAJA V CELOTNEM MERILNEM OBMOČJU POMIKA

$$R_{PY} = \frac{R_P}{X_C}(X_C - X)$$

$$R_{PX} = \frac{R_P}{X_C}\cdot X$$

- NADOMESTNA UPORNOST SPODNJEGA DELA IN MERILA

$$\frac{1}{R_{N1}} = \frac{1}{R_{PX}} + \frac{1}{R_M} = \frac{R_M + R_{PX}}{R_M \cdot R_{PX}}$$

$$R_{N1} = \frac{R_M R_{PX}}{R_M + R_{PX}}$$

- NADOMESTNA UPORNOST CELOTNEGA SYS:

$$R_{N2} = R_{PY} + R_{N1}$$

- CELOTNI TOK:

$$(V_{NAP} - 0) = R_{N2}\cdot I_{CEL}$$

$$I_{CEL} = \frac{V_{NAP}}{R_{N2}}$$

- PADEC POTENCIALA NA R_{PY}

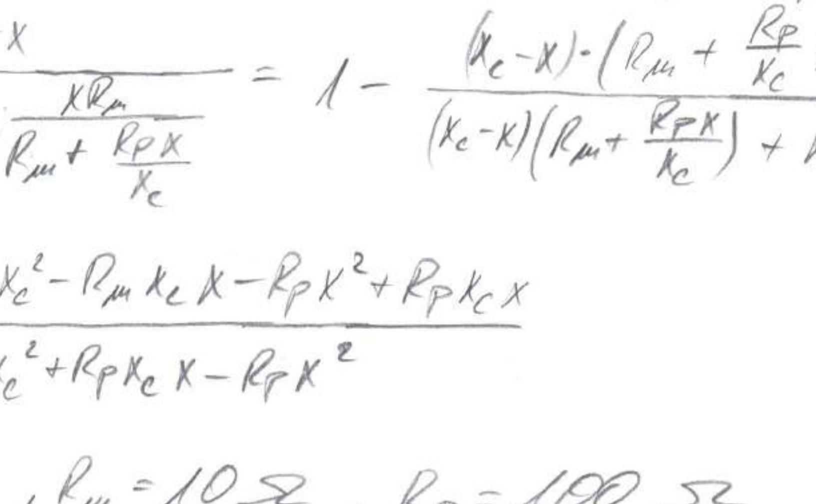
$$V_{NAP} - V_1 = R_{PY}\cdot I_{CEL} \Rightarrow \frac{V_1}{V_{NAP}} = 1 - \frac{R_{PY}}{R_{N2}} = 1 - \frac{\frac{R_P}{X_C}(X_C - X)}{R_{PY} + R_{N1}} =$$

$$= 1 - \frac{\frac{R_P}{X_C}(X_C - X)}{\frac{R_P}{X_C}(X_C - X) + \frac{R_{PX}R_M}{R_M + R_{PX}}} = 1 - \frac{\cancel{\frac{R_P}{X_C}}(X_C - X)}{\cancel{\frac{R_P}{X_C}}(X_C - X) + \cancel{\frac{R_P}{X_C}}X\left(\frac{R_M}{R_M + R_{PX}}\right)}$$

$$= 1 - \frac{X_C - X}{X_C - X + \frac{XR_M}{R_M + \frac{R_P X}{X_C}}} = 1 - \frac{(X_C - X)\cdot\left(R_M + \frac{R_P}{X_C}X\right)}{(X_C - X)\left(R_M + \frac{R_P X}{X_C}\right) + XR_M}$$

$$= 1 - \frac{R_M X_C^2 - R_M X_C X - R_P X^2 + R_P X_C X}{R_M X_C^2 + R_P X_C X - R_P X^2}$$

ZA $X_C = 1$, $R_M = 10\,\Omega$, $R_P = 100\,\Omega$



ZA PRIBLIŽNO LINEARNOST NAJ BO

$$\frac{R_M}{R_P} > 100$$

~~[illegible]~~ INDUKTIVNA MERILNA / ZAZNAVALA

- TEMELJI NA PRAVU INDUKCIJE KAR POMENI DA JE V MAGNETNEM POLJU GIBAJOČ VODNIK SPOSOBEN GENERIRATI NAPETOST NA KONCIH VODNIKA.
- NAMESTO KONSTANTNEGA MAGNETNEGA POLJA LAHKO UPORABIMO IZMENIČNO TER TAKO ELIMINIRAMO POGOJ GIBANJA.
- MNOGE FIZIKALNE KOLIČINE (SILE, NAPETOST, TEMPERATURO) LAHKO PREVEDEMO NA MERJENJE DEFORMACIJ OZ PREMIKOV NEKEGA VNESENEGA, POZNANEGA SISTEMA.
- SO ZELO ZANESLJIVA, MERJENJE JE BREZDOTIČNO
- TEŽAVA JE V MAGNETNI HISTEREZNI ZANKI
- IMAJO DOLGO DOBO TRAJANJA
- NE TERJAJO VZDRŽEVANJA
- NISO OBČUTLJIVA NA PREOBREMENITVE
- ZAHTEVANO JE STABILNO IZMENIČNO NAPAJANJE TER DEMODULACIJA SIGNALA. $3-15V$ @ $60 \div 2\cdot 10^4$ Hz RMS
- LOČLJIVOST JE ODVISNA OD DRUGIH KOMPONENT V SISTEMU → DO 1 nm

---

DELI SISTEMA:

- IZVOR
- TULJAVA (SISTEM TULJAV) KI GENERIRA $\vec{B}$

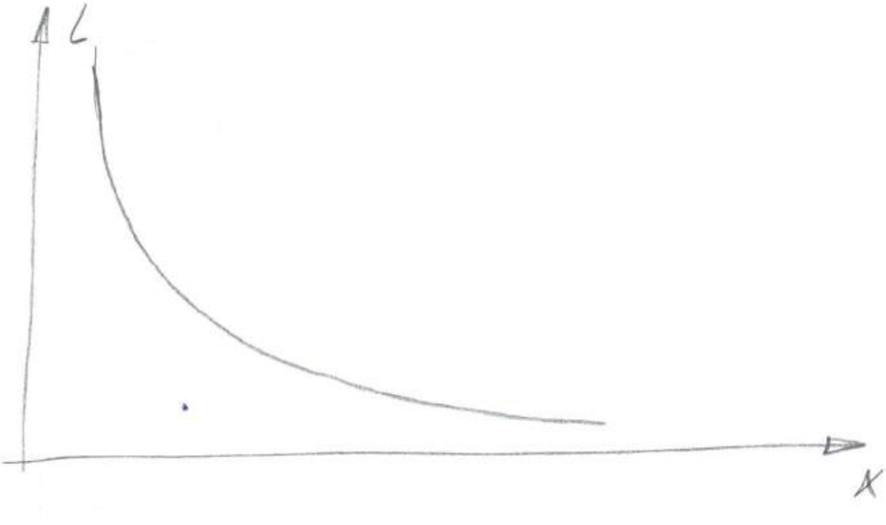
INDUKTIVNOST — $\underbrace{L = \mu_0 \mu_R n^2 \frac{A}{L_{TU}}}_{\text{PRIBLIŽEK}}$

- UPORNOST $R = \frac{F}{\phi} = \frac{n \cdot}{}$

μ_0 - PERMEABILNOST VAKUUMA
μ_R - RELATIVNA PERMEABILNOST (ODVISNA OD TEGA KAJ JE V MAGNETNEM POLJU)
n - OVOJI TULJAVE
L_{TU} - DOLŽINA ŽICE ZA TULJAVO
A - PREČNI PRESEK TULJAVE

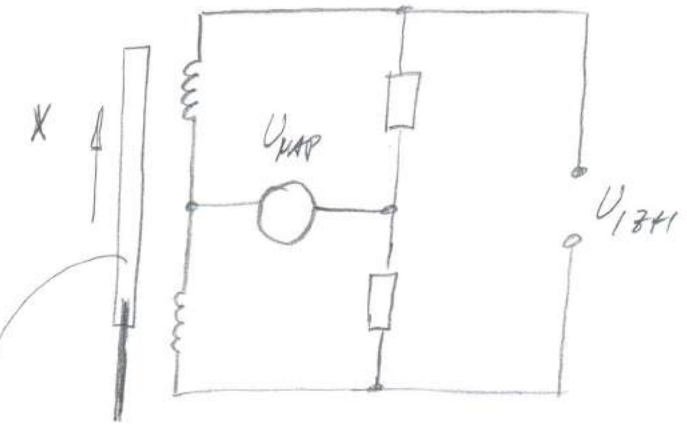
$$L = n^2 \cdot \frac{\mu_{ZR} \cdot A}{\frac{l_{TU}}{\mu_{JE}} \cdot 2x}$$

NEKE ENAČBE SO NA PREDAVANJIH, NE VEM OD KJE.



DIFERENCIALNI INDUKTOR

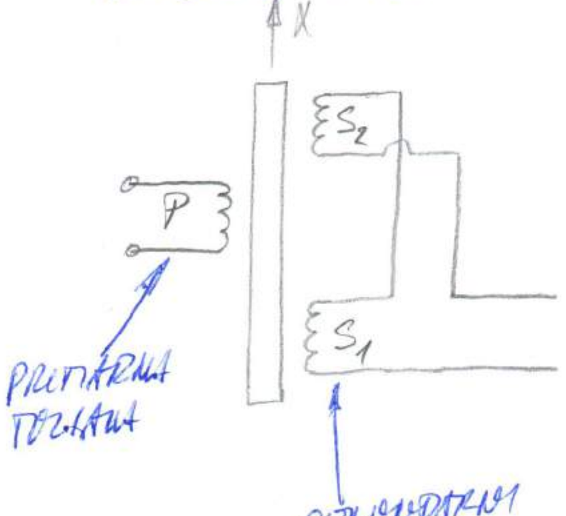
- HIBRIDNI WHEATSTONOV MOSTIČEK
- LOČLJIVOST ODVISNA OD LOČLJIVOSTI MERILNIKA U_{IZH}



FEROMAGNETNO POMIČNO JEDRO

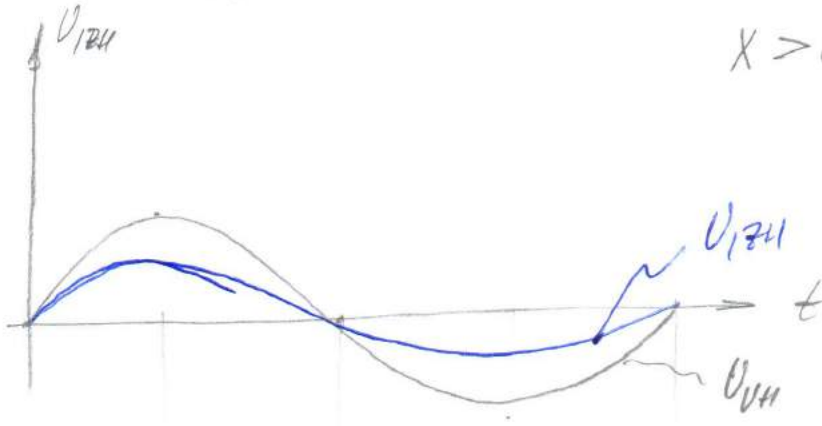
DIFERENCIALNI TRANSFORMATOR – LVDT

- SEKUNDARNI TULJAVI STA VEZANI TAKO DA STA V FAZNEM ZAMIKU 180°
- KO PREMAKNEMO JEDRO SE INDUCIRA V TULJAVAH RAZLIČNA NAPETOST

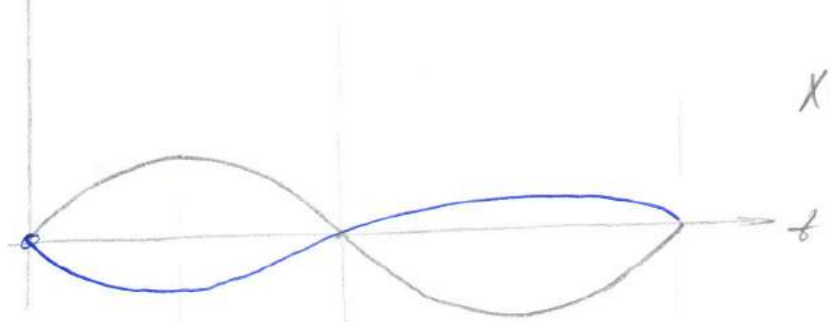


$U_{IZH} = U_{S2} - U_{S1}$

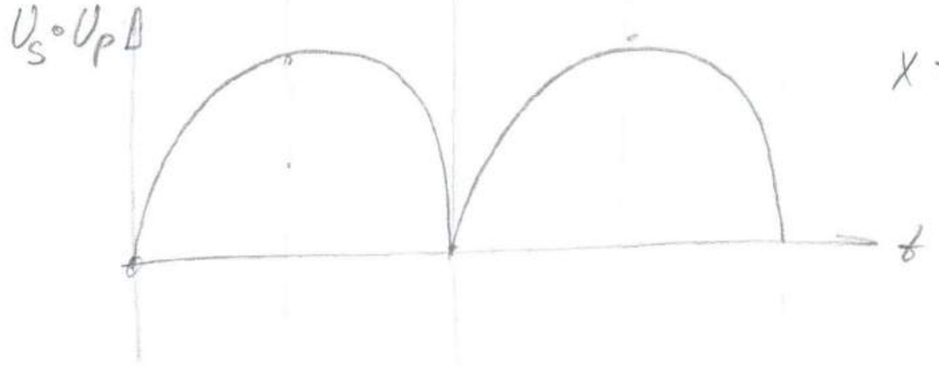
$X > 0 \Rightarrow U_{S2} - U_{S1} > 0$ in
$U_P > 0$



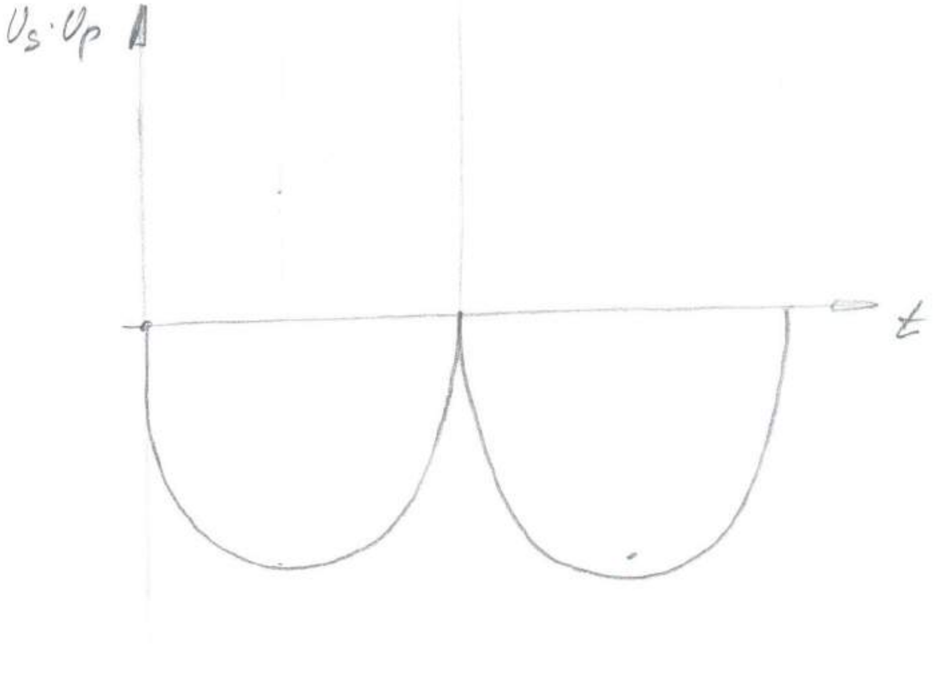
$X < 0 \Rightarrow U_{S2} - U_{S1} < 0$ in
$U_P > 0$



$X > 0$ S FAZNIM DEMODULATORJEM



$X < 0$ S FAZNIM DEMODULATORJEM



MATEMATIČNI MODEL

$$\sum_{i=1}^{n} U_i = \sum_{i=1}^{n} (I \cdot R)_i$$

$$\Phi_p = L_p \cdot I_p + M_2 I_s - M_1 I_s$$

$$\Phi_s = L_s \cdot I_s - M_2 I_p + M_1 I_p$$

PRIMARNI TOKOKROG:

$$U_{IZH} - R_p I_p - \frac{d\Phi_p}{dt} = 0$$

$$(M_2 - M_1)\frac{dI_p}{dt} - (R_s + R_{NV}) I_s - L_s \frac{dI_s}{dt} = 0$$

$$U_{IZH} - R_p I_p - L_p \frac{dI_p}{dt} - M_2 \frac{dI_s}{dt} + M_1 \frac{dI_s}{dt} = 0$$

M_1 - MEDSEBOJNA INDUKTIVNOST MED PRIMARNIM IN 1. SEKUND.

M_2 - MEDSEBOJNA IND. MED PRIMARNIM IN 2. SEKUND.

I_p - PRIMARNA TOK

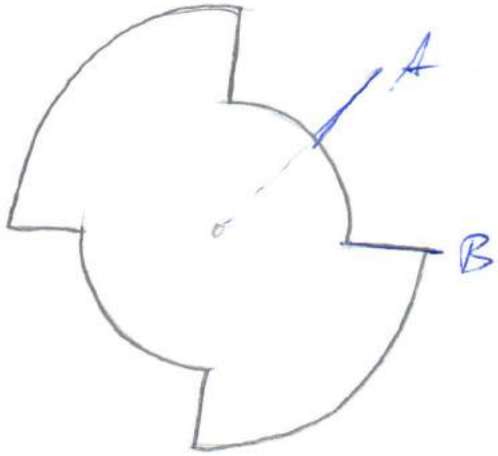
I_s - TOK V SEK. TULJAVI

R_{NV} - NOTRANJA UPORNOST VOLTMETRA

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{(R_s + R_{NV}) R_p}{L_p L_s + (M_2 - M_1)^2}}$$

ENKODERJI

RELATIVNI - GLEDAMO IZSEKE IN ŠTEJEMO



LOČLJIVOST Z DVEMA ZAZNAVALI : 45°

- NE MOREMO LOČITI MED VRTENJEM LEVO IN DESNO

ABSOLUTNI - UNIKATEN IZHODNI SIGNAL ZA VSAK POLOŽAJ

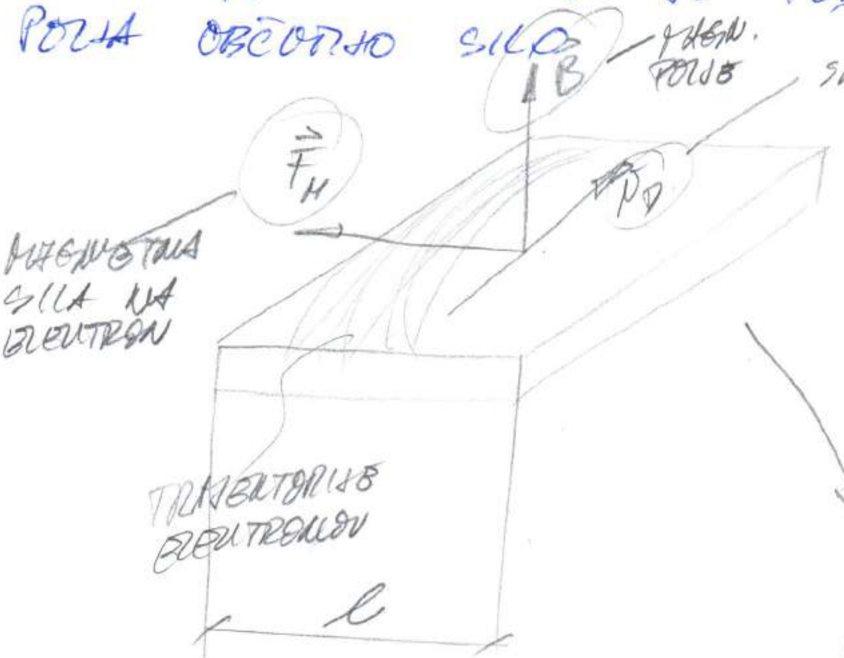
BINARNA KODA ZA 3 BITE	GRAYEVA KODA	
000 ✓	000	1. MESTO 0
001 ✓	001	
010 ✓	011	
011 ✓	010	
100 ✓	110	1. MESTO 1
101	111	
110 ✓	101	
111	100	

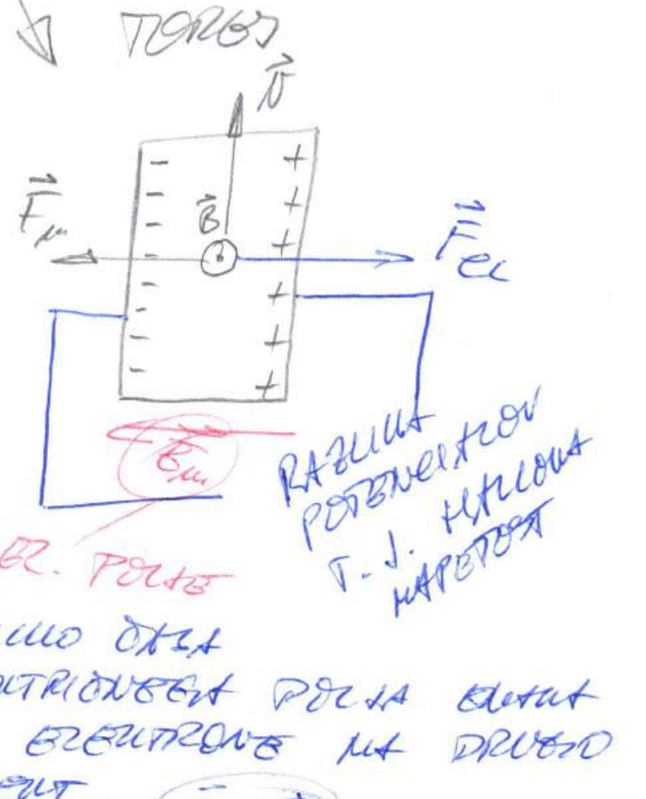
PAZI NA CIKLIČNOST

GRAYEVA KODA ZAGOTOVI DA SE OB POMIKU SPREMENI SAMO 1 ELEMENT, TO ZAGOTAVLJA ENOZNAČEN OPIS, ČE SE NEK STROJ USTAVI NA MEJI MED ELEMENTOMA ???

HALLOVA MERILNA ZAZNAVALA

HALLOV EFEKT POVE, DA ELEKTRONI KI SE GIBLJEJO SKOZI PREVODNIK KI JE POD VPLIVOM MAGNETNEGA POLJA OBČUTIJO SILO





- TA NAPETOST SE "NABIRA" TOLIKO ČASA DOKLER NI SILA ZARADI ELEKTRIČNEGA POLJA ENAKA MAGNETNI SILI KI VLEČE ELEKTRONE NA DRUGO STRAN. TO JE HALLOV EFEKT

$\vec{v}_D \perp \vec{B}$

$$\vec{F}_M = \vec{F}_{EL} \Rightarrow \underbrace{q}_{\text{NABOJ}} \underbrace{\vec{v}_D}_{\text{HITROST (POVPREČNA)}} \underbrace{\vec{B}}_{\text{MAG. POLJE}} = q \underbrace{\vec{E}}_{\text{ELEKTRIČNO POLJE}}$$

$$\Rightarrow \vec{v}_D \vec{B} = \vec{E} \qquad U_H = E \cdot l$$

YOUTUBE AK LECTURES HALL EFFECT

$$\boxed{U_H = v_D B \cdot l}$$

HALLOVA NAPETOST

$\vec{F}_m = q(\vec{v}_D \times \vec{B})$

$\vec{F}_e = q\vec{E}$

$\Sigma F_i = 0$

$\Rightarrow \cancel{q}\vec{E} = q(\vec{v}_D \times \vec{B})$

$U_H = E \cdot l$

$\Rightarrow U_{HALL} = |\vec{v}_D \times \vec{B}| \cdot l$

S HALLOVIMI ZAZNAVALI LAHKO TOREJ DOLOČAMO JAKOST MAGNETNEGA POLJA.

PREKO TEGA PA LAHKO DOLOČAMO POMIKE, ZASUKE, PODOBNO KOT ENKODERJI ALI INDUKTIVNA MERILNA ZAZNAVALA

- NI GIBLJIVIH DELOV
- ~~VISOKA~~ DOLGA DOBA TRAJANJA
- VISOKE FREKVENCE
- VISOKA PONOVLJIVOST
- ŠIROKO TEMPERATURNO OBMOČJE $-50 \div 150\ °C$

PRIMER UPORABE:

- VIŠINA GLADINE V BAZENU (PLOVEC)
- ROTAMETER ZA MERJENJE HITROSTI TOKOV