

## Eksperimentalne metode – merjenje sil

---

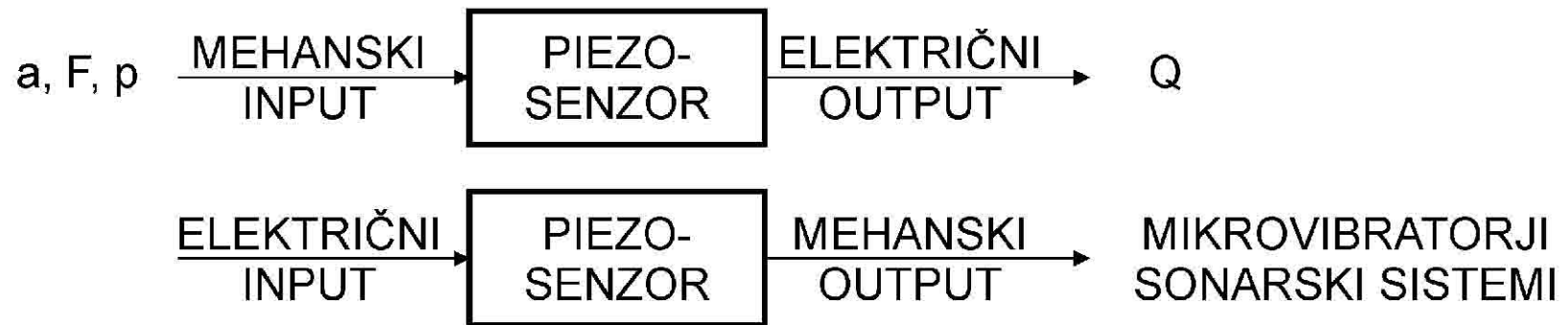
Asistent: Ivan Vengust  
Soba: DV-6  
Tel: 477 1744 int 744  
E-mail: [ivan.vengust@fs.uni-lj.si](mailto:ivan.vengust@fs.uni-lj.si)

EM vaja 5:



## Piezelektrični senzorji

- Pri spremembi mehanskega napetostnega stanja v določenih materialih se spremenijo njihove električne lastnosti. Generira se količina elektrenine in obratno, pri priklopu električne napetosti se material deformira.



## Piezo senzorji

### MATERIALI

#### Naravni:

Kremenčev kristal  $E = 8.6 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$

Rochellova sol

#### Sintetični:

Litijev sulfat

Amonijev dihidrogen fosfat

Polarizirana feroelektrična keramika

Barijev titanat

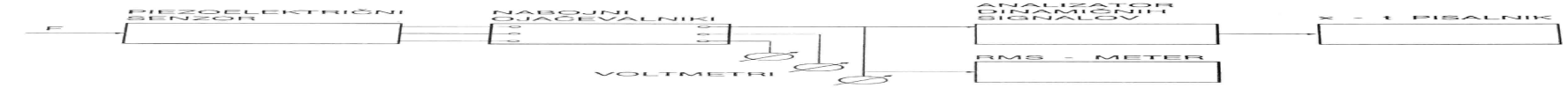


## Piezoelektrični senzorji - lastnosti

---

- Kristal generira električni naboj proporcionalen s silo, ki deluje nanj
- Kristal združuje lastnosti vzmeti in električnega pretvornika
- Merjena sila generira signal neposredno
- Izhodni signal piezo kristala je linearen in brez histereze
- Piezo senzorji so kompaktni, robustni in visoko občutljivi
- Piezo senzorji so zelo togi, zato so deformacije v rangu mikrometrov
- Ponujajo široko merilno območje
- Piezo kristali imajo visoke lastne frekvence so zato primerni za meritve procesov pri visokih frekvencah
- Generirajo električni naboj, ki ga je težje procesirati

# Piezoelektrični merilni sistem



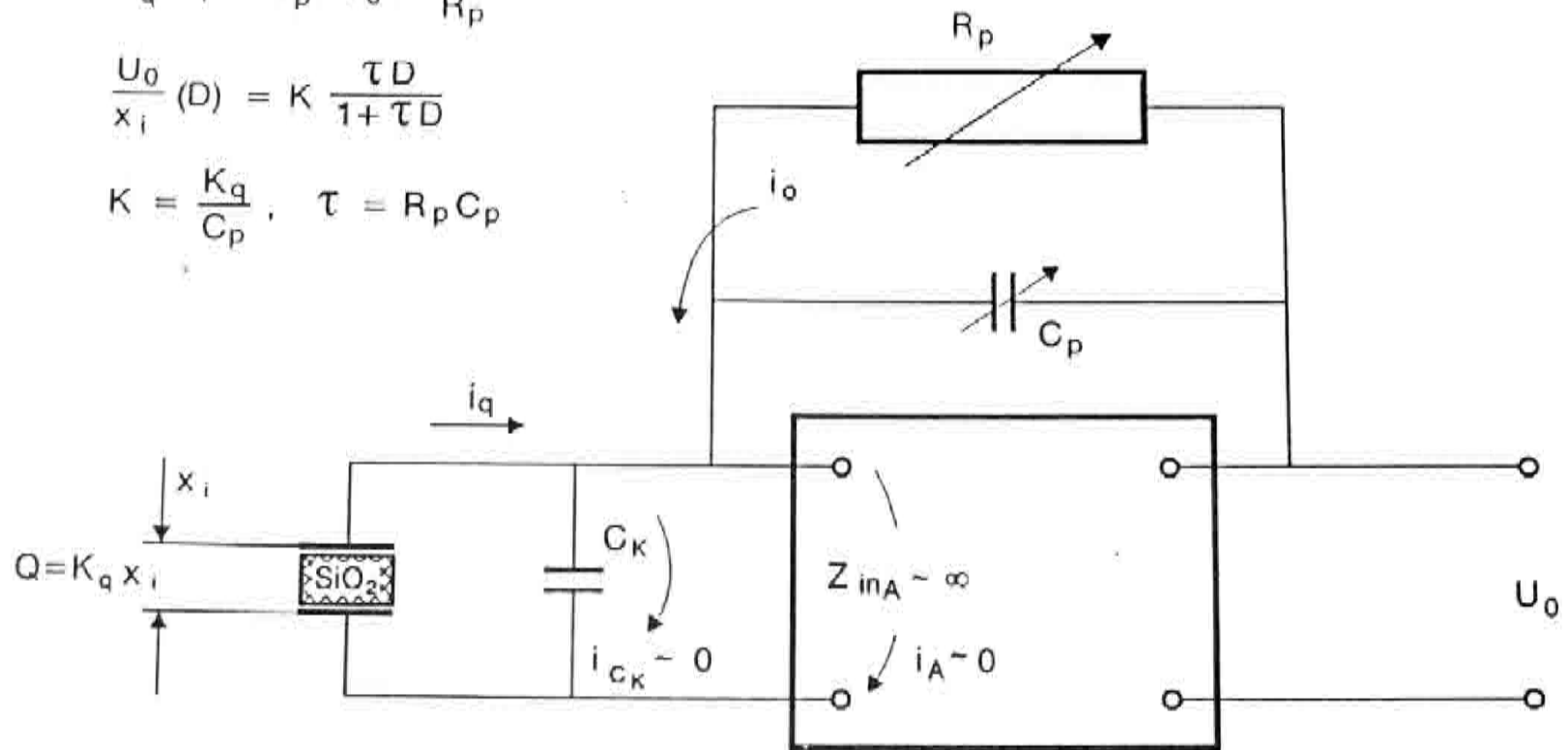
## Piezelektrični merilni sistem

$$i_q = i_o$$

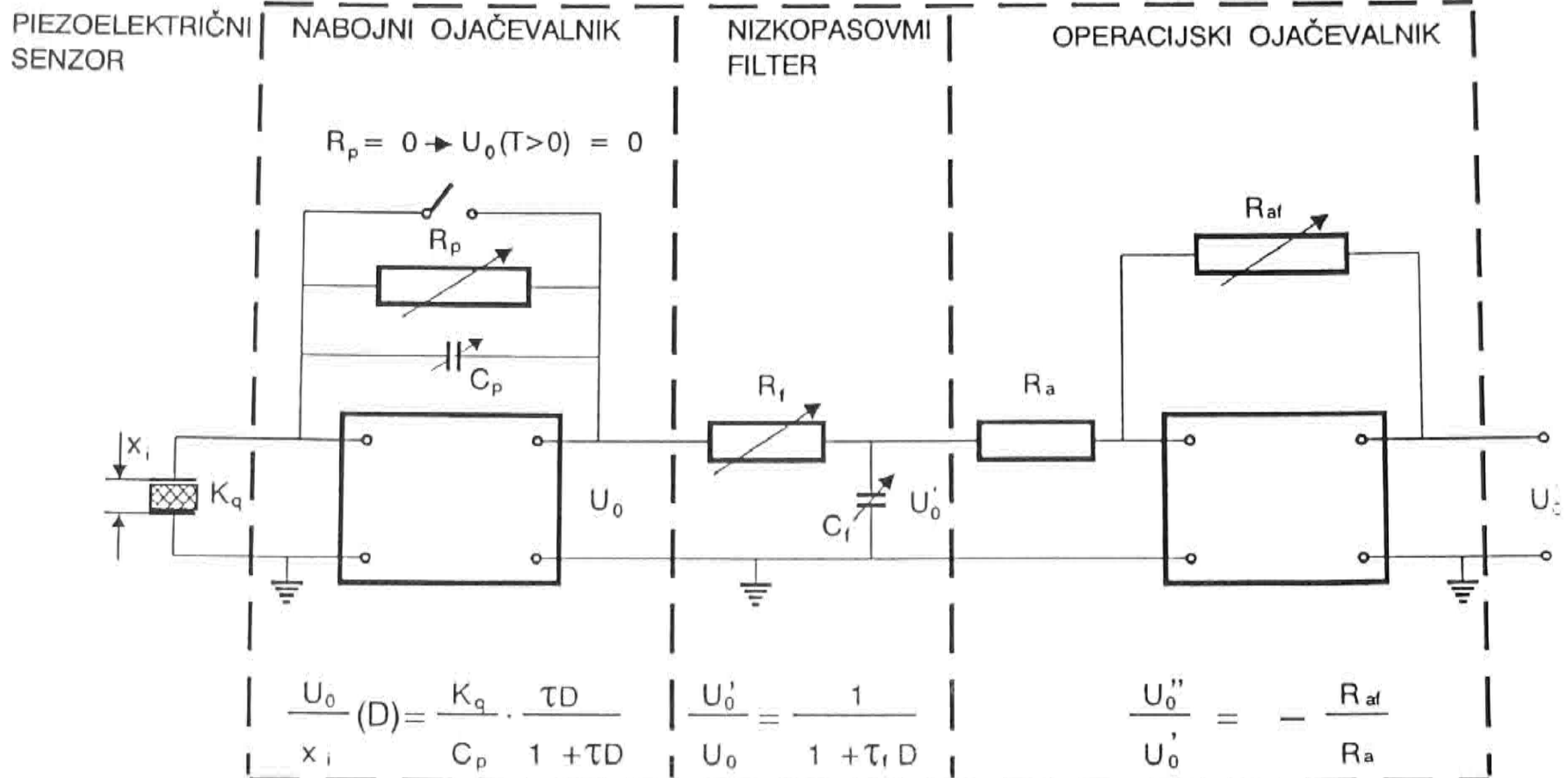
$$K_q D x_i = C_p D U_0 + \frac{U_0}{R_p}$$

$$\frac{U_0}{x_i} (D) = K \frac{\tau D}{1 + \tau D}$$

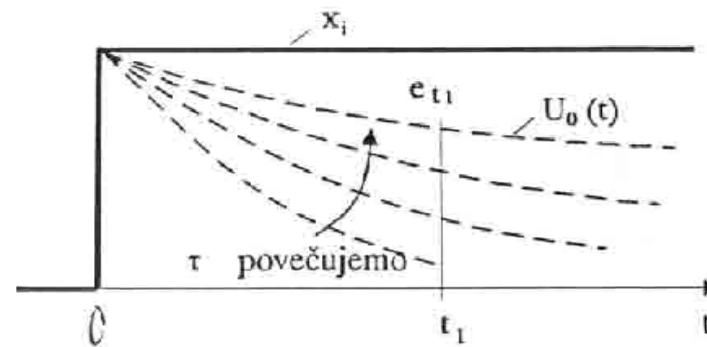
$$K = \frac{K_q}{C_p}, \quad \tau = R_p C_p$$



# Ojačevalnik naboja



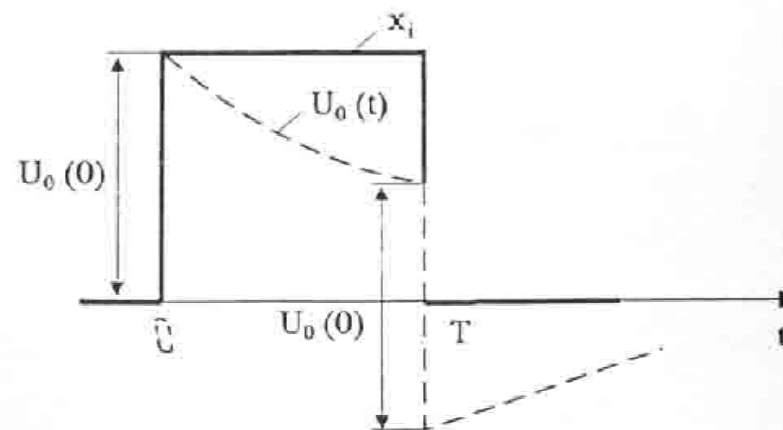
## Koračni odgovor piezoelektričnega merilnega sistema



Slika 5: Koračni odgovor

$$U_0(t) = U_0 (e^{-T/\tau} - 1) \cdot e^{-1/\tau}$$

$$T < t < \infty$$





## Osnove analize naključnih pojavov

$$m_x = E[x(t)] = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad \overset{\circ}{x}(t) = x(t) - E[x(t)]$$

$$\text{var}(x) = E\left[\overset{\circ}{x}^2(t)\right] = \frac{1}{T} \int_0^T (x(t) - m_x)^2 dt$$

KORELACIJSKA FUNKCIJA:

$$K_x(\tau) = E\left[\overset{\circ}{x}(t) \overset{\circ}{x}(t + \tau)\right] = \frac{1}{T - \tau} \int_0^{T-\tau} \overset{\circ}{x}(t) \overset{\circ}{x}(t + \tau) dt$$

$$\text{op. : } R_x(\tau) = E[x(t) \cdot x(t + \tau)] = K_x(\tau) + m_x^2$$

$$K_x(\tau = 0) = \text{var}(x)$$

$$K_x(\tau = \infty) = 0 \quad \text{ali} \quad \text{tudi} \quad R_x(\tau = \infty) = m_x^2$$

$$K_x(0) \geq K_x(\tau) \quad \text{ta} \quad K_x(-\tau) = K_x(+\tau)$$

$$k_x(\tau) = \frac{K_x(\tau)}{\text{var}(x)}$$

## Osnove analize naključnih pojavov

SPEKTER MOČI:

$$S_x(f) = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} R_x(\tau) \cos 2\pi f\tau. d\tau$$

$$R_x(\tau) = \int_0^{\infty} S_x(f) \cos 2\pi f\tau. df$$

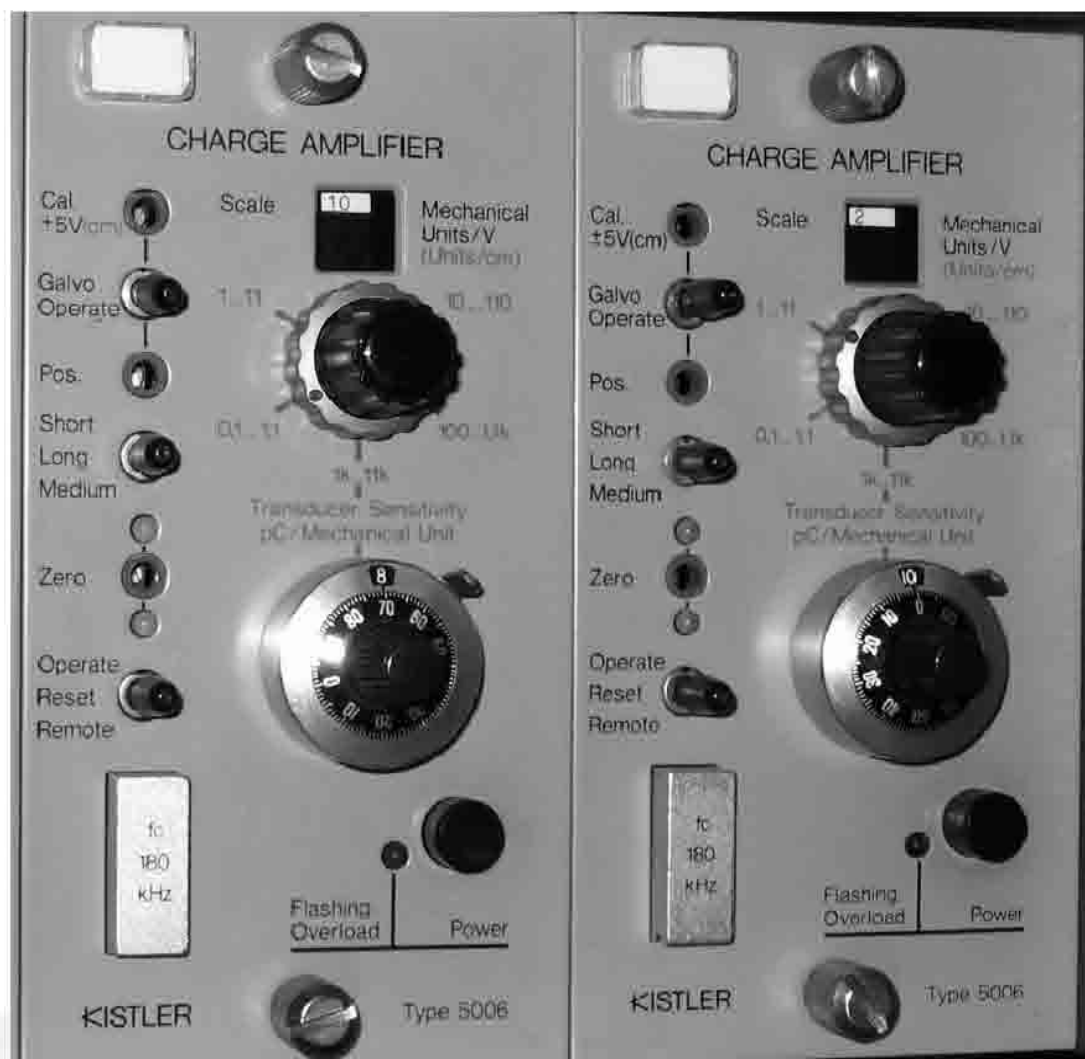
$$R_x(\tau) \stackrel{\text{Fourier}}{\leftrightarrow} S_x(f)$$

$$R_x(0) = \int_0^{\infty} S_x(f). df = \underbrace{\int_{-0}^{+0} S_x(f). df}_{m_x^2} + \underbrace{\int_{+0}^{\infty} S_x(f). df}_{\text{var}(x)}$$

## Piezoelektrični senzor sil Kistler

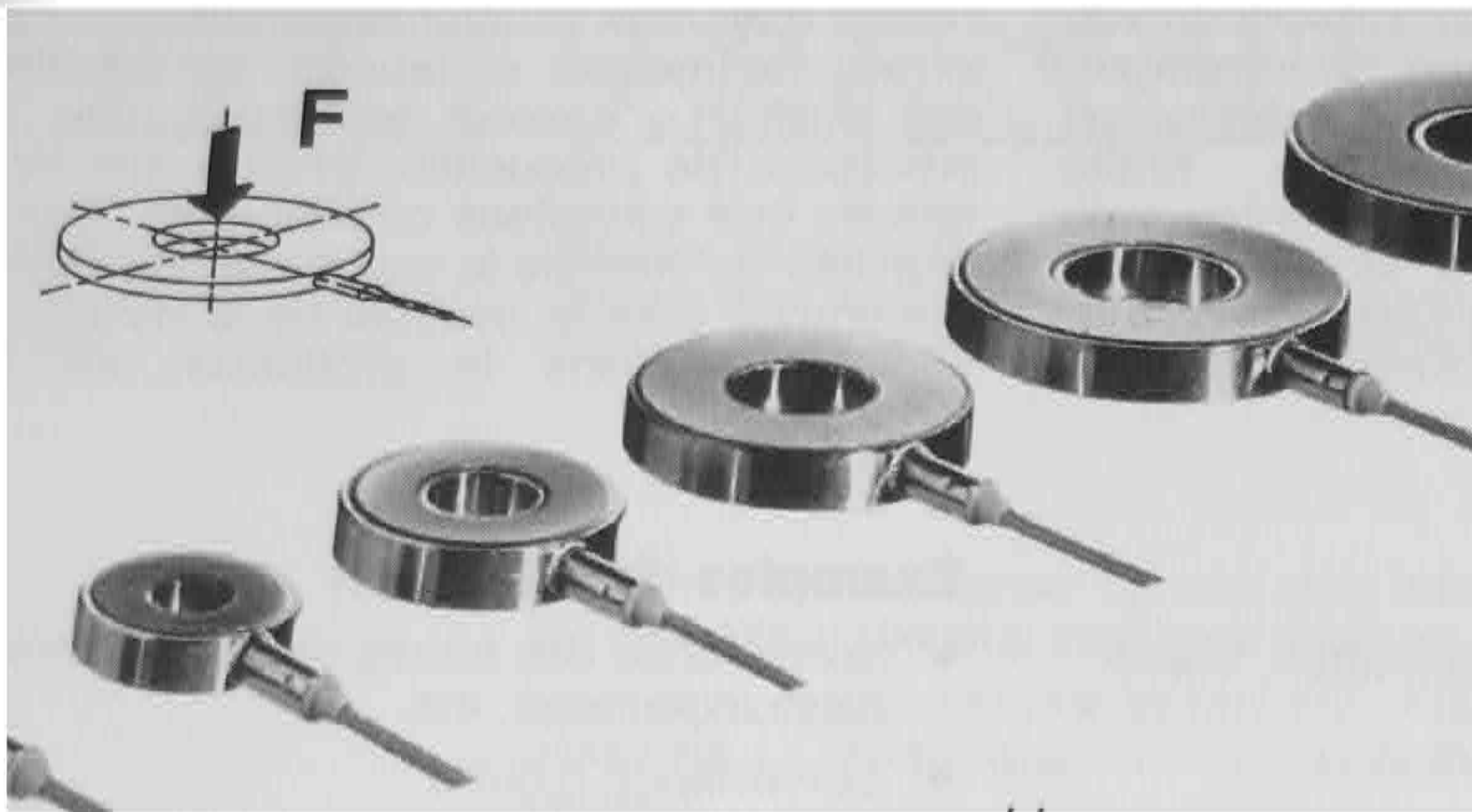


## Ojačevalnik naboja Kistler

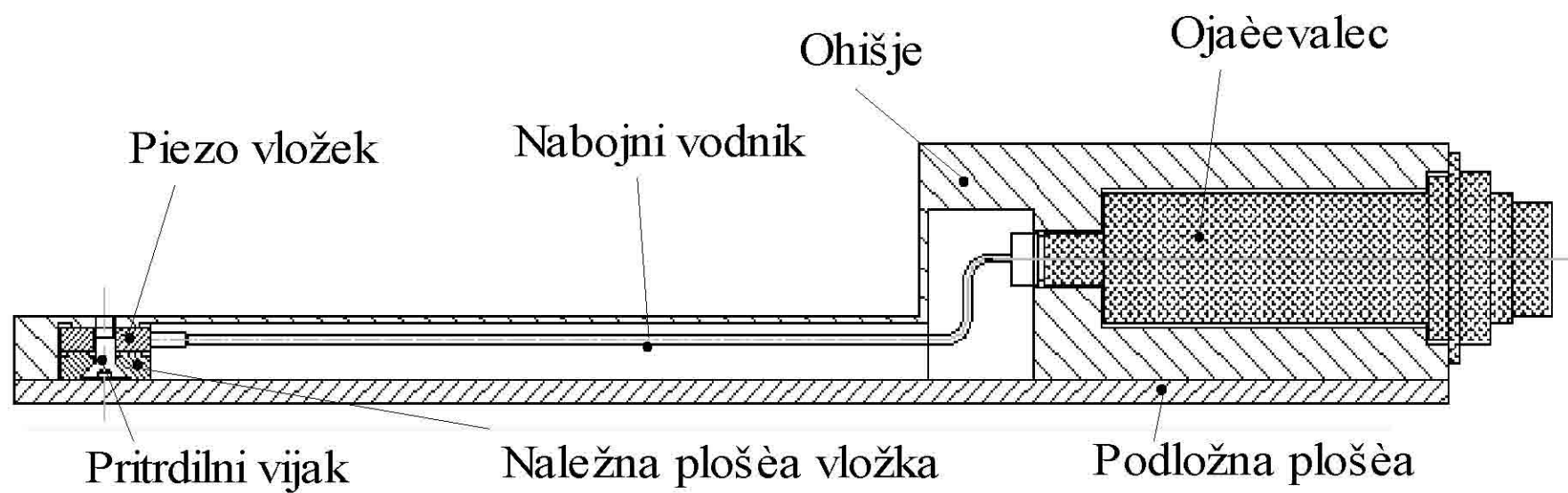




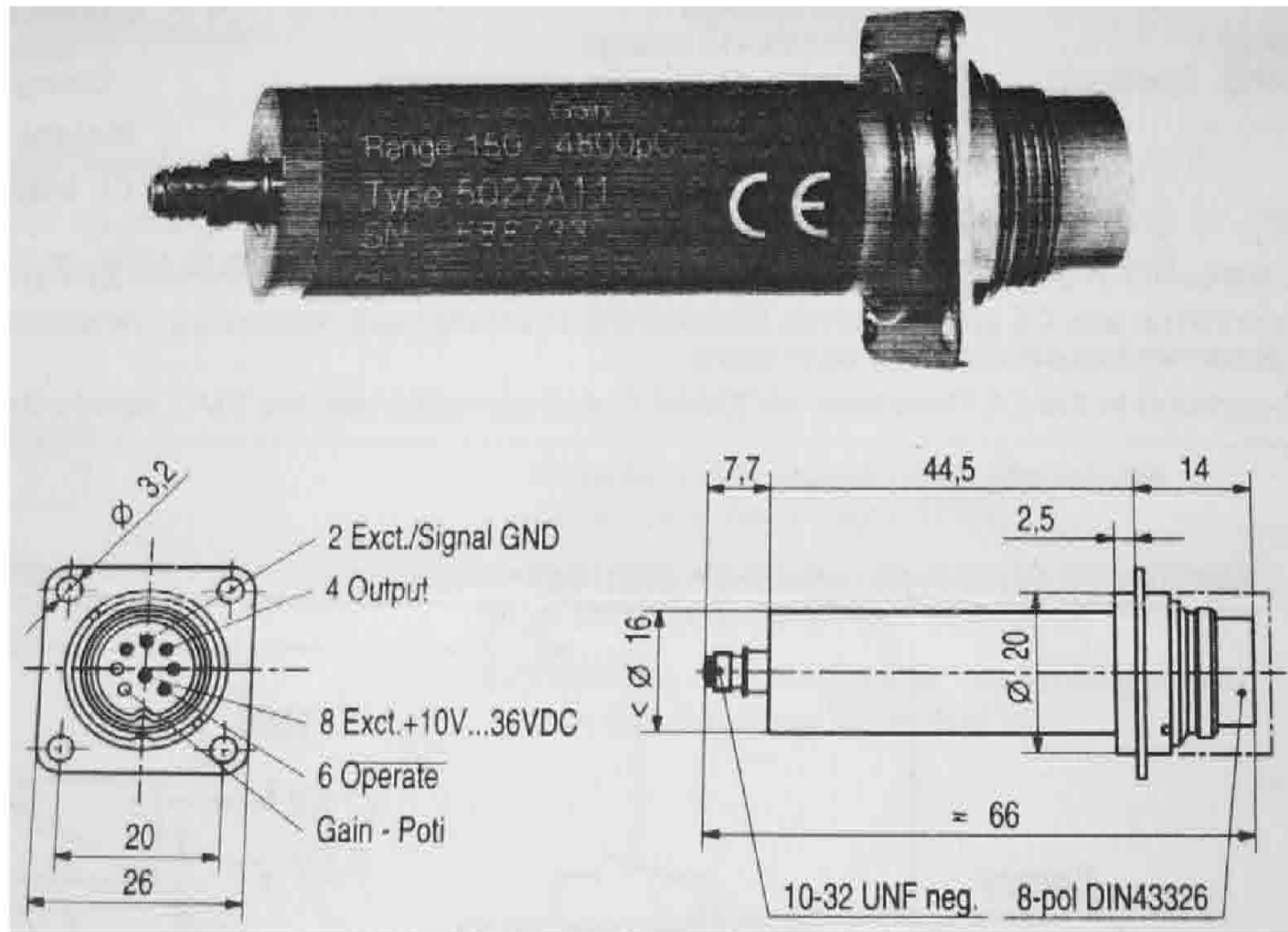
## Rezalne sile pri struženju



## Senzor rezalnih sil

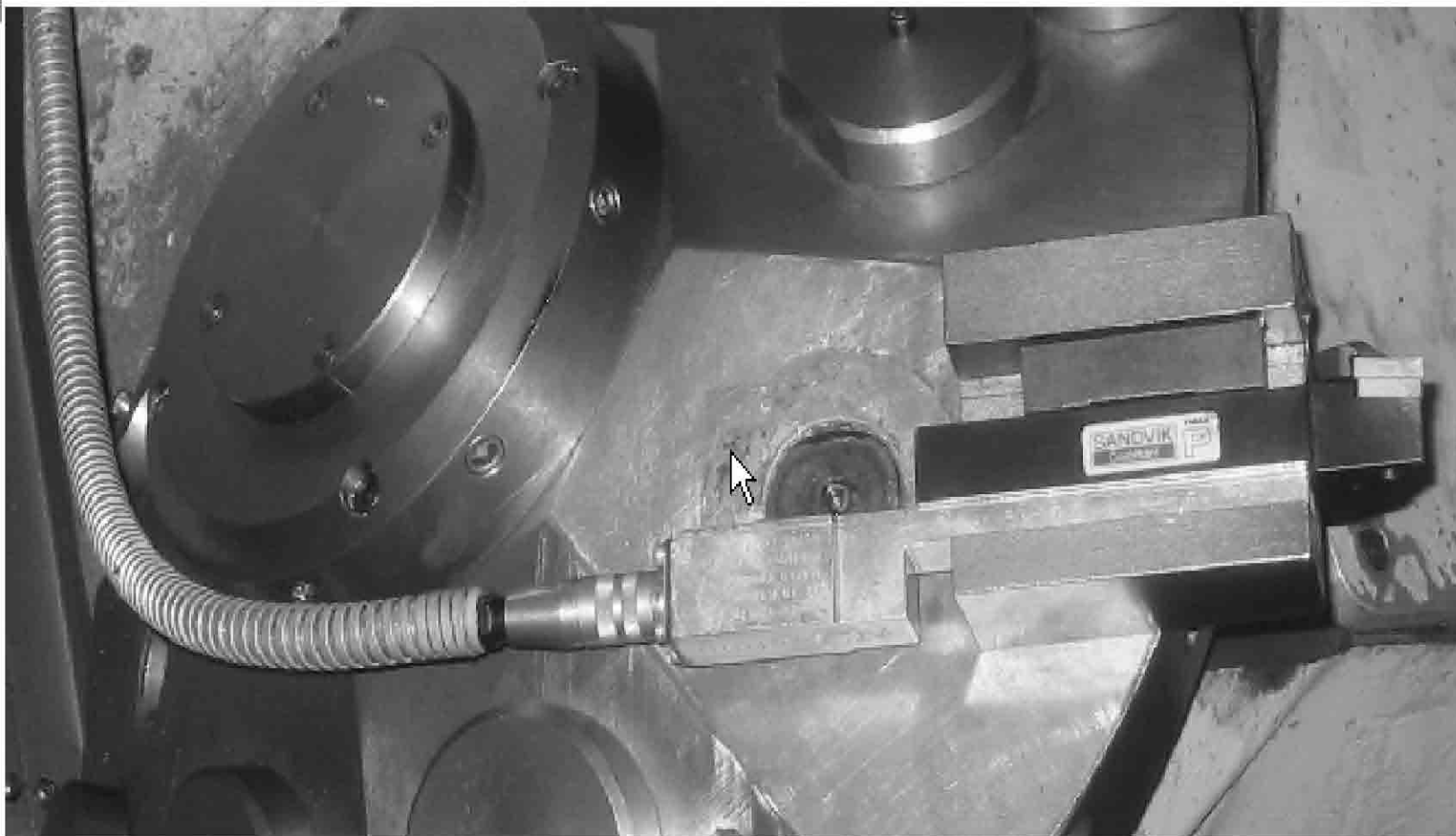


## Senzor rezalnih sil

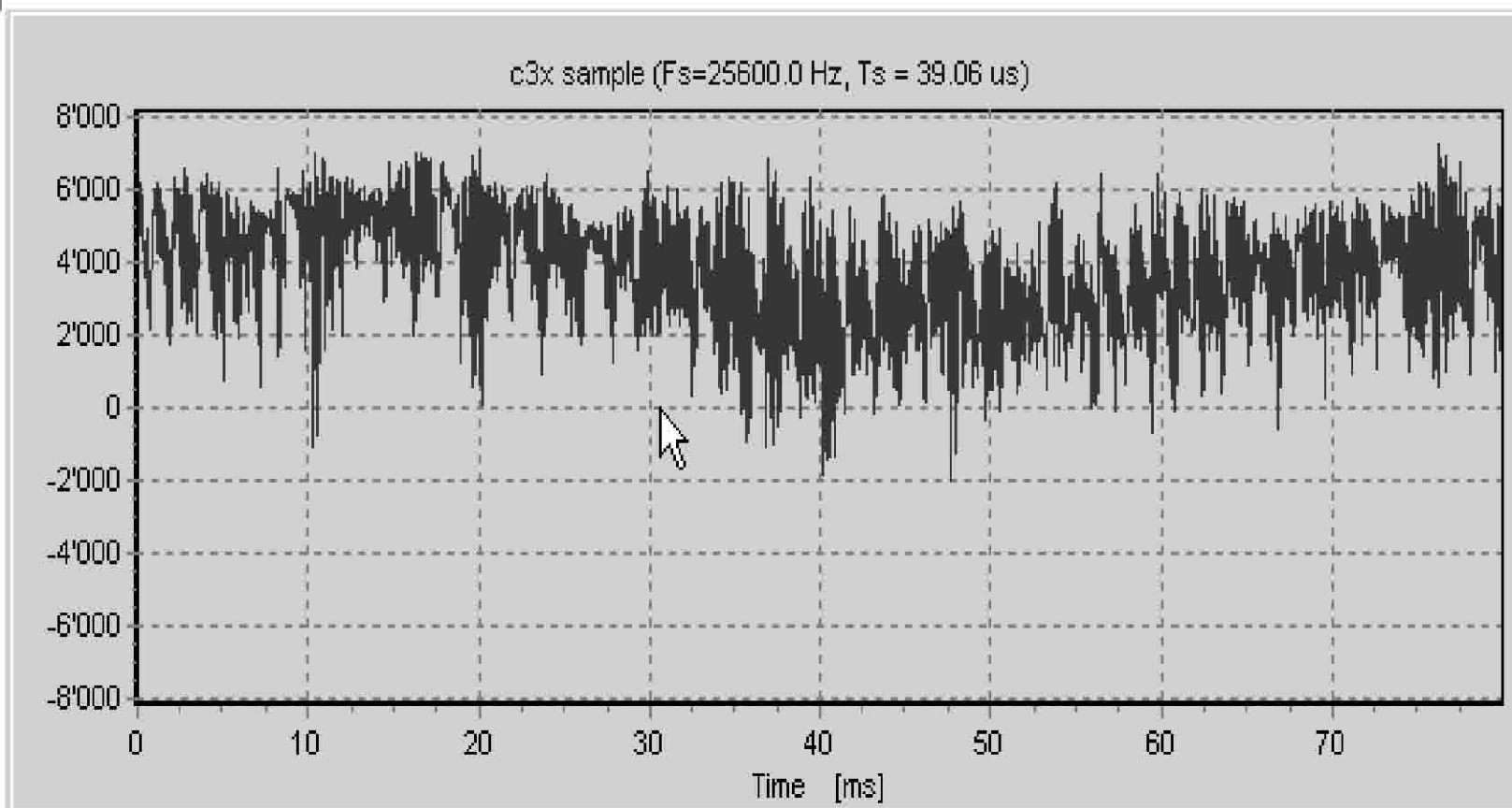




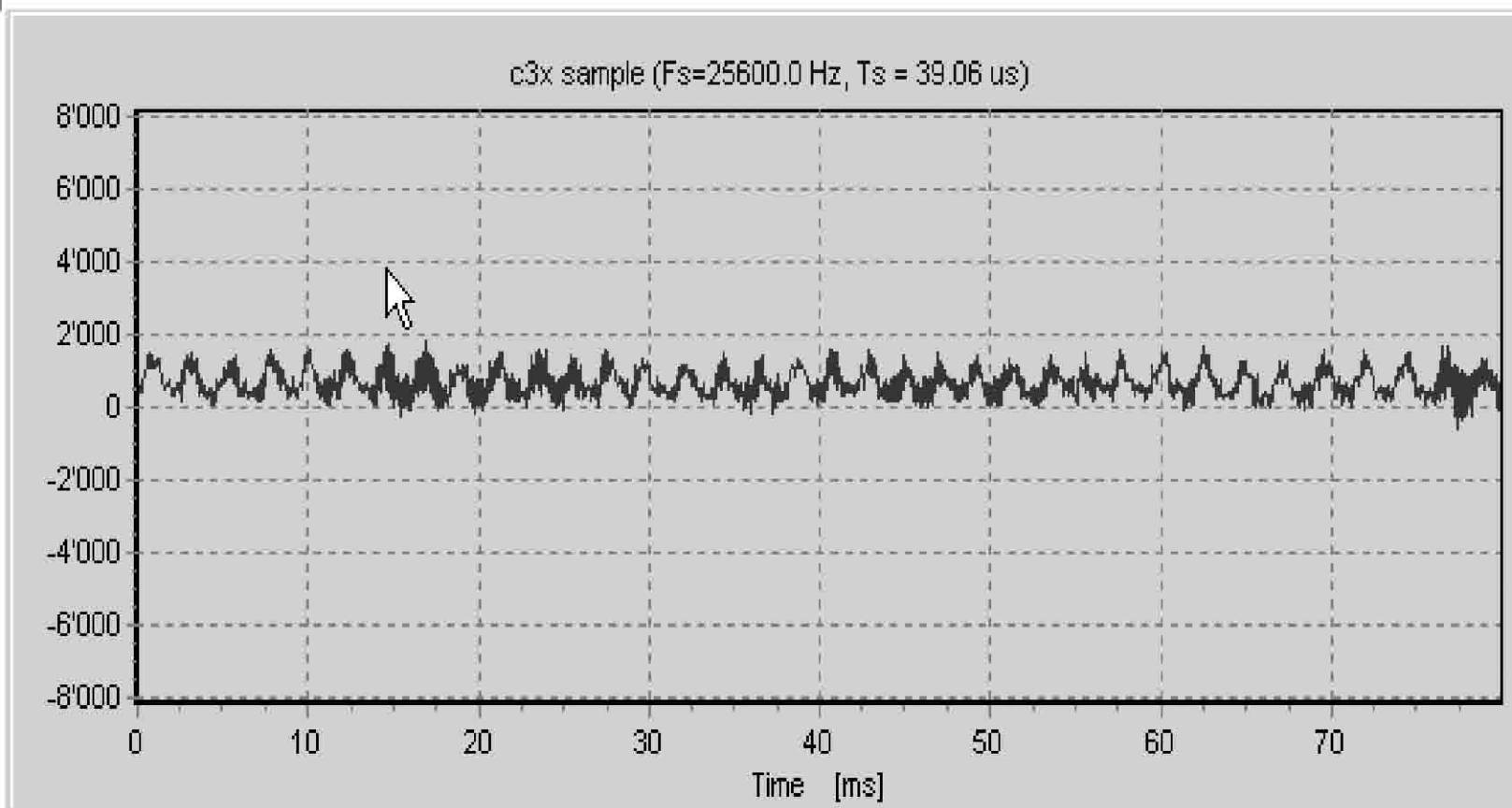
## Senzor rezalnih sil



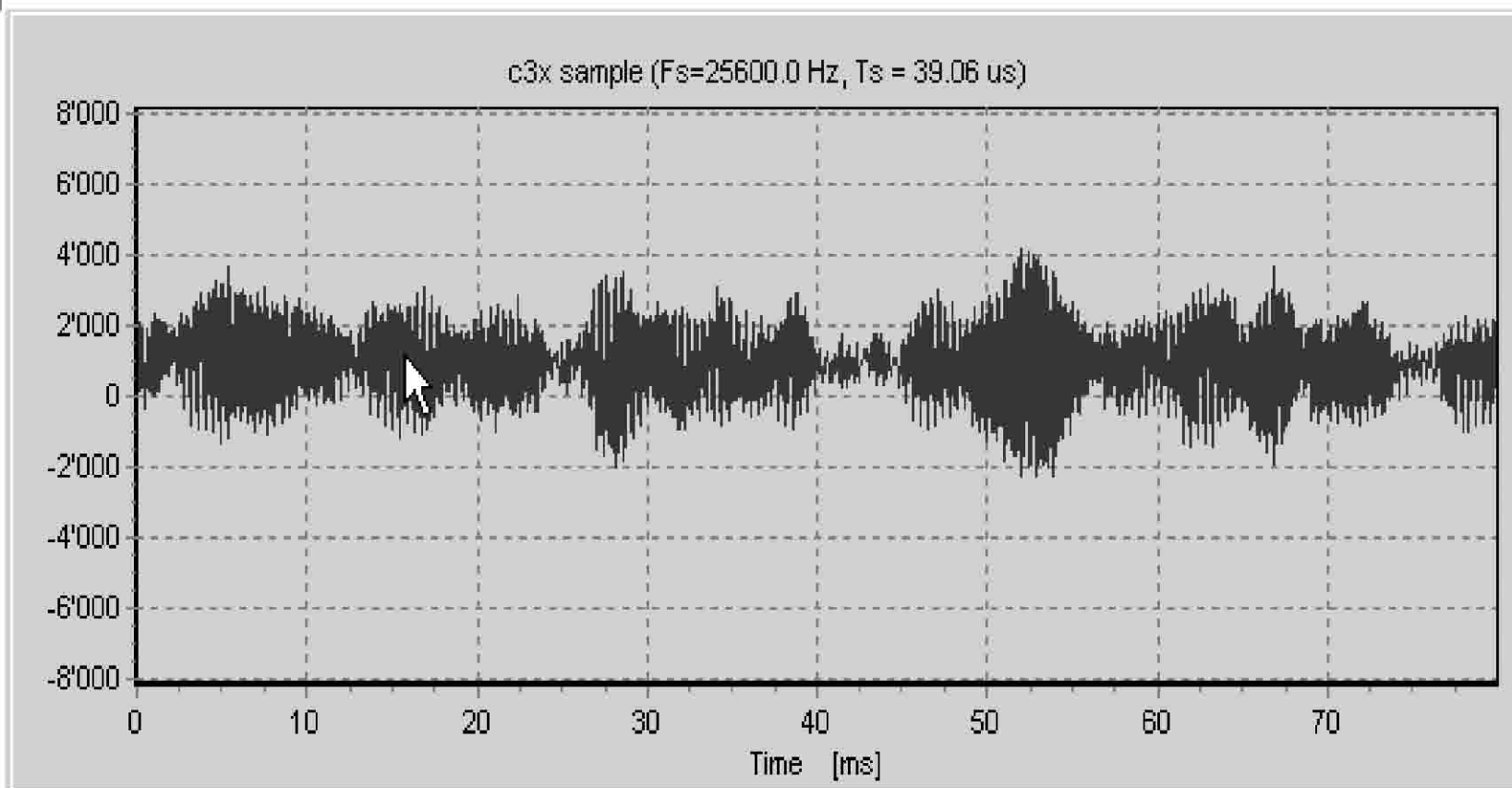
## Časovni potek rezalne sile $F_z$ 'F1-int.txt'



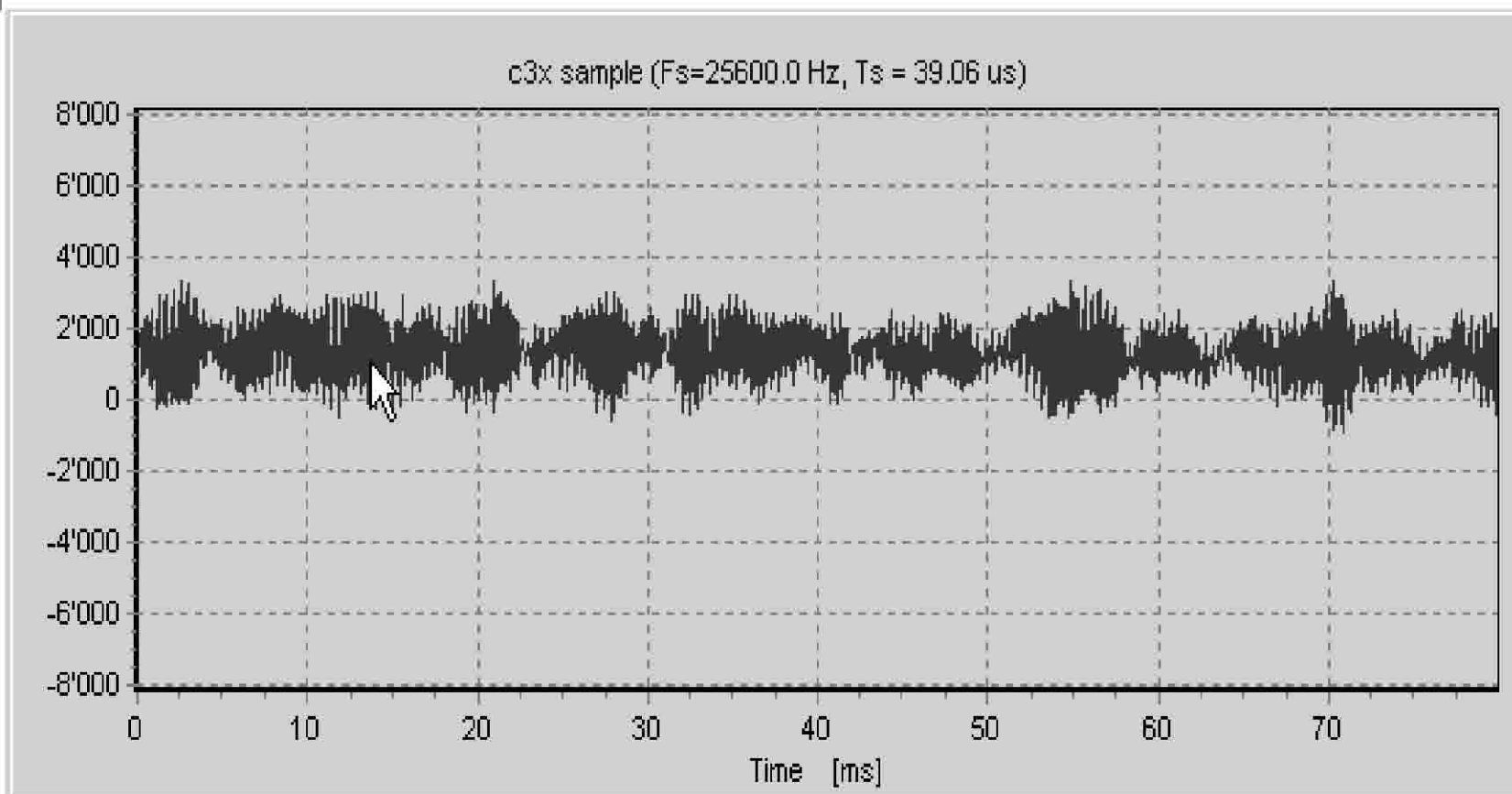
## Časovni potek rezalne sile $F_z$ 'F2-int.txt'



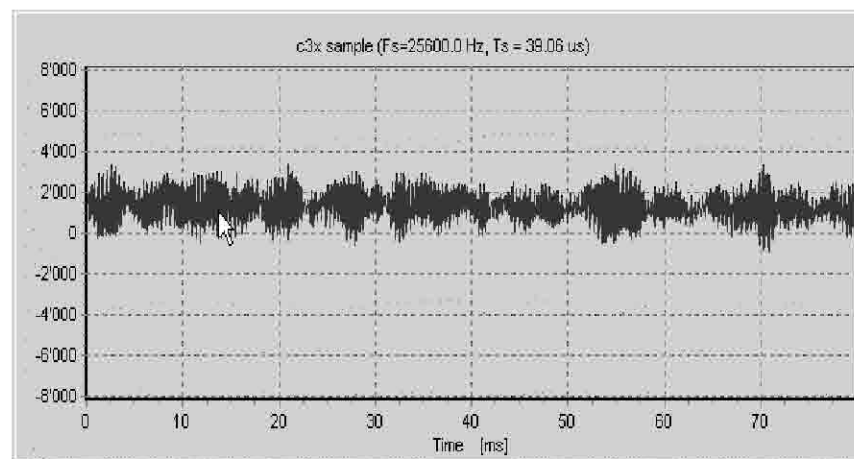
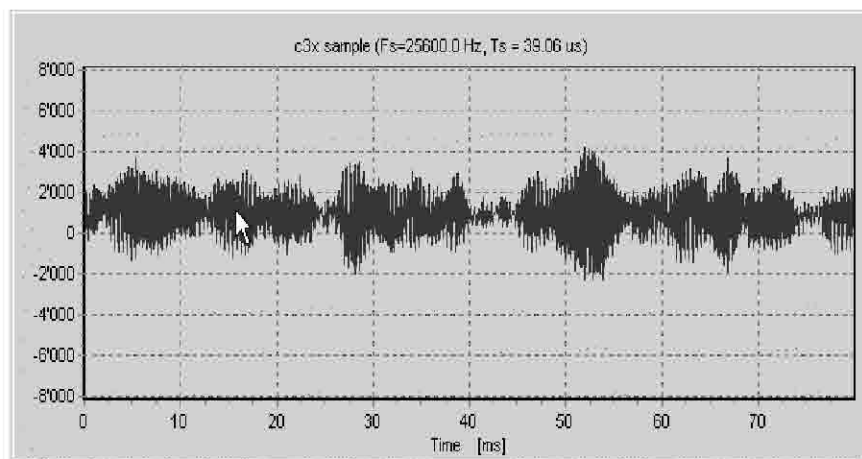
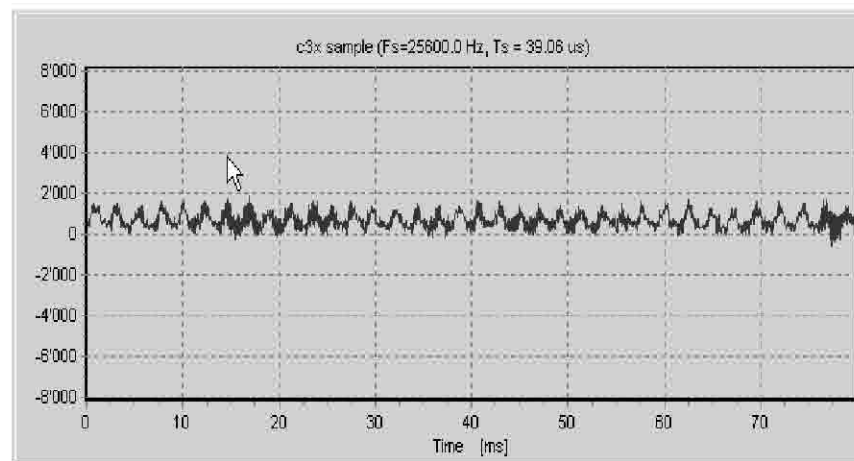
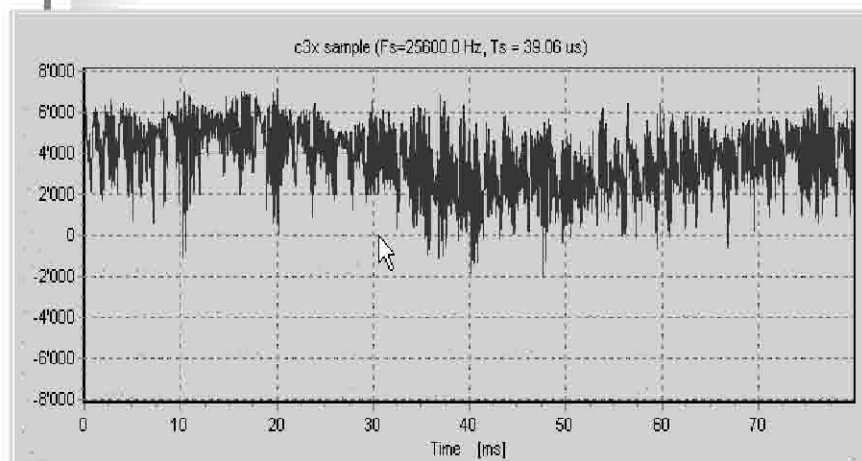
## Časovni potek rezalne sile $F_z$ 'F3-int.txt'



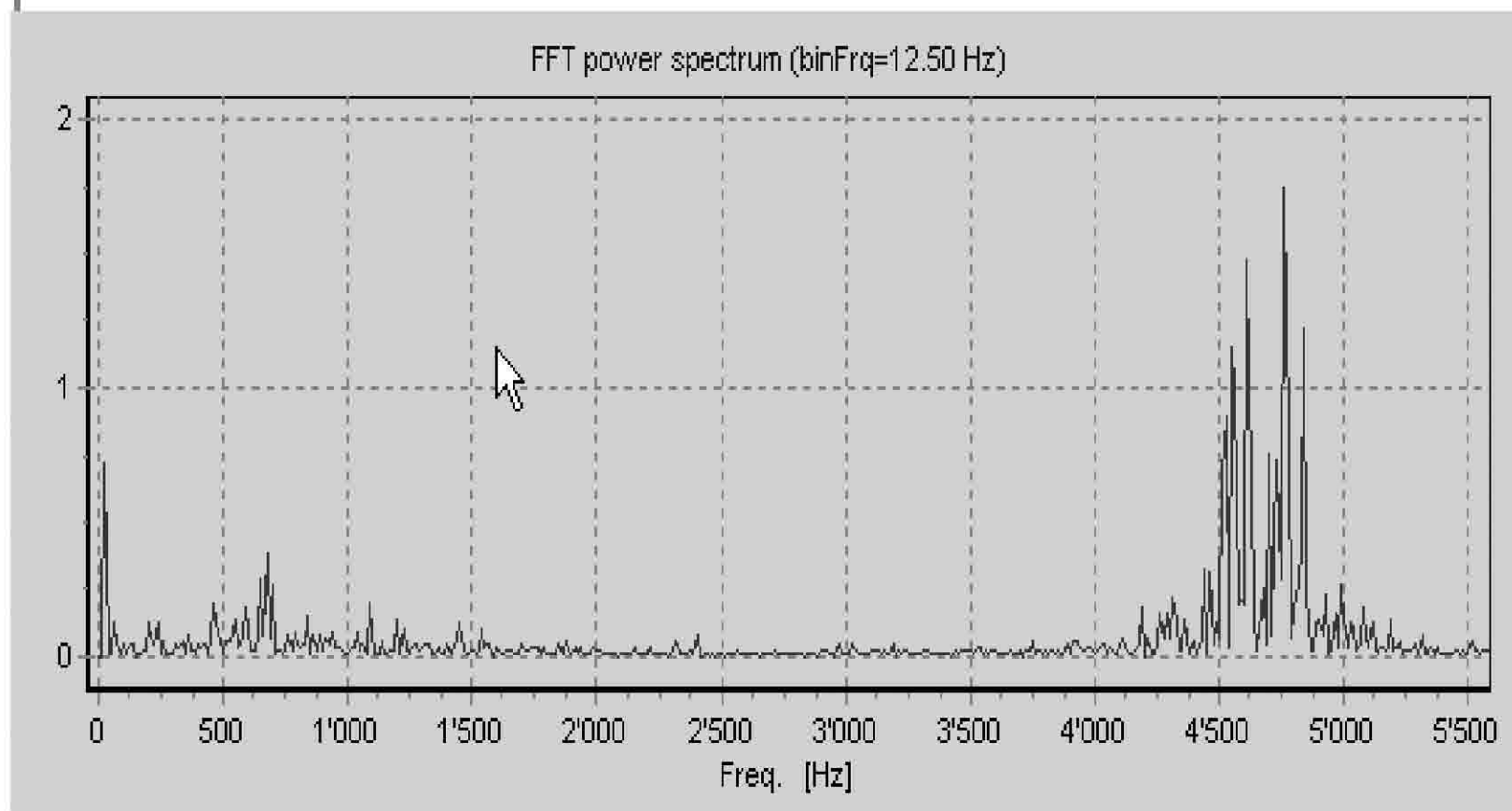
## Časovni potek rezalne sile $F_z$ 'F4-int.txt'



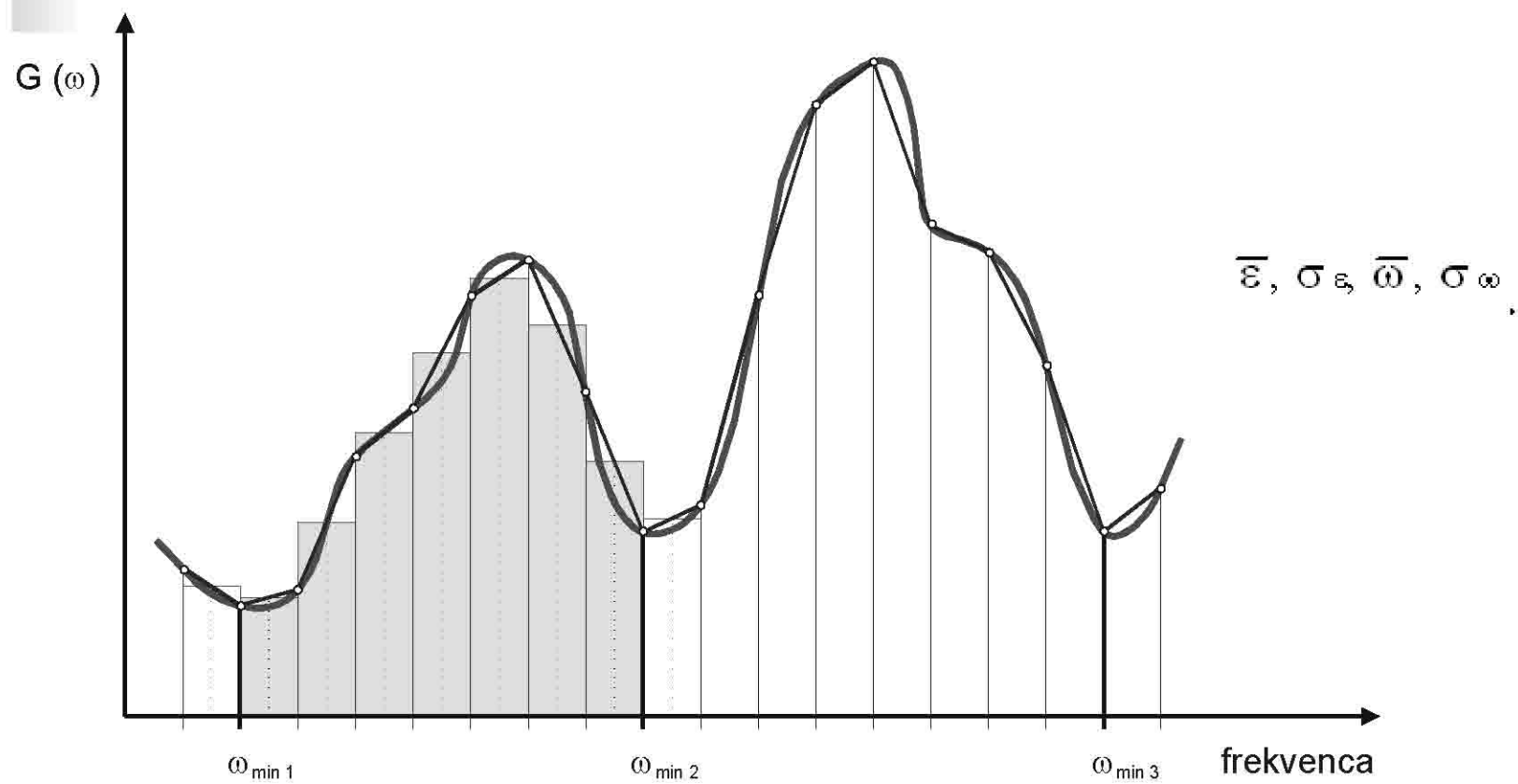
## Časovni poteki rezalnih sil



## Močnostni spekter rezalne sile

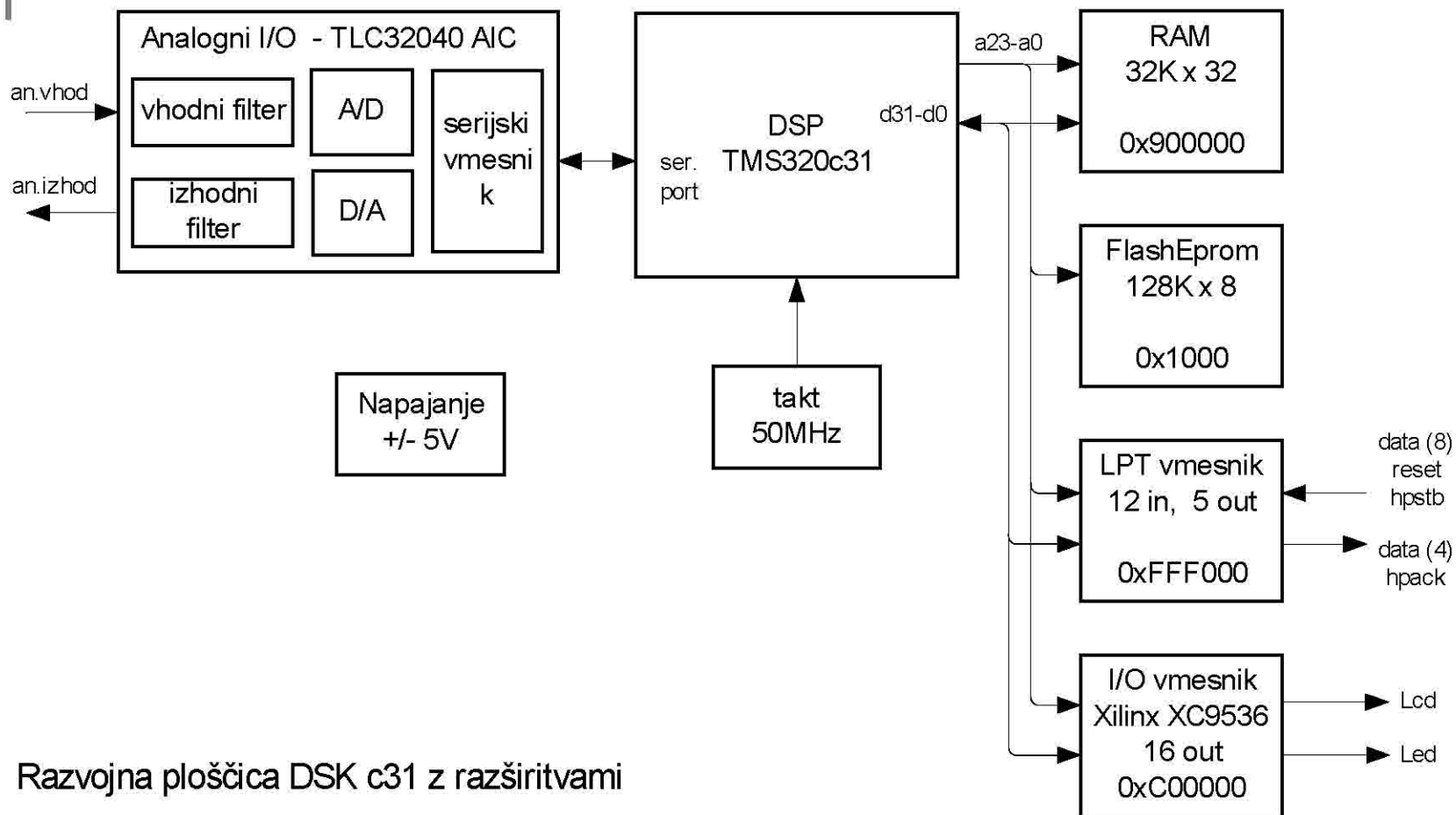


# Analiza močnostnega spektra



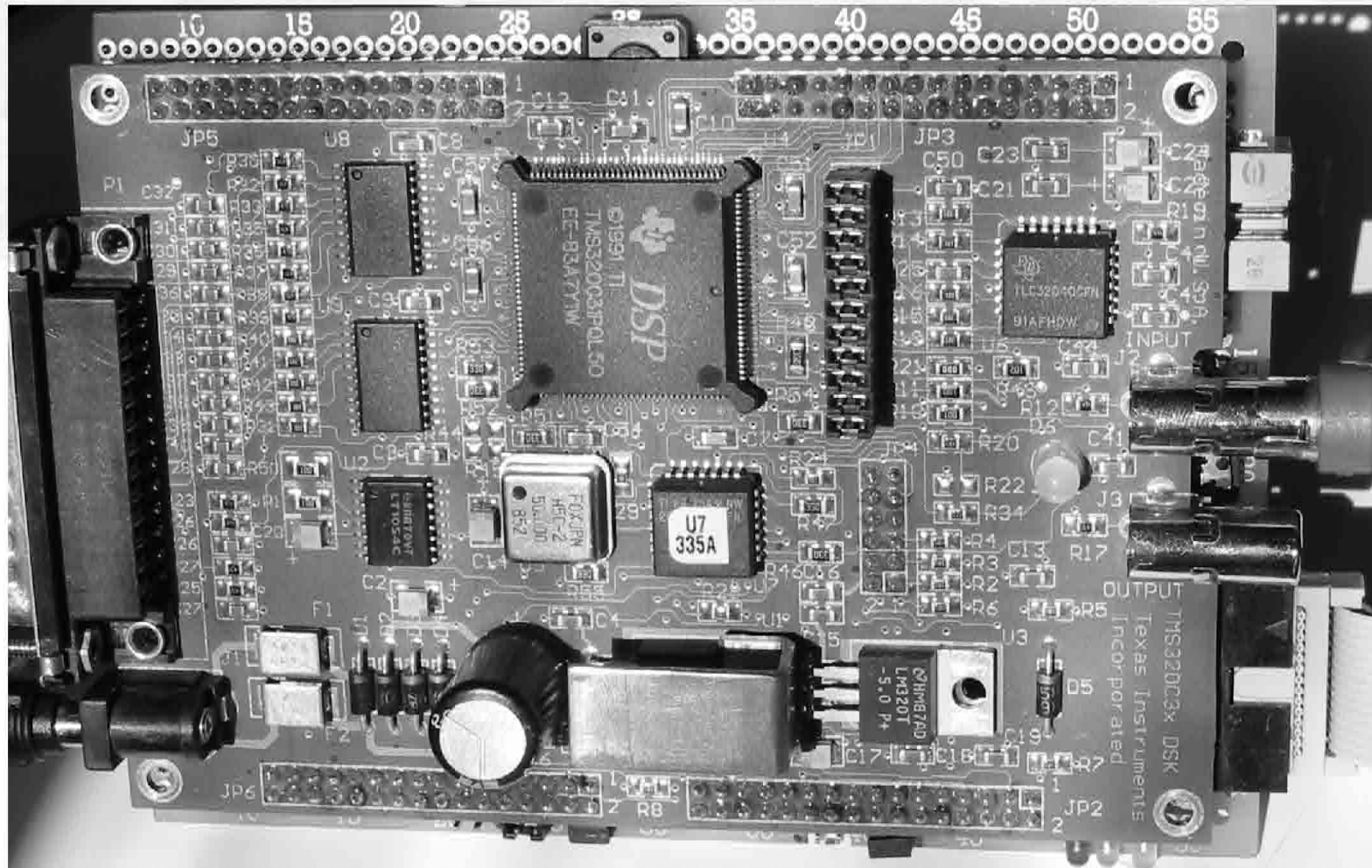


## Sistem za sprotno analizo rezalnih sil



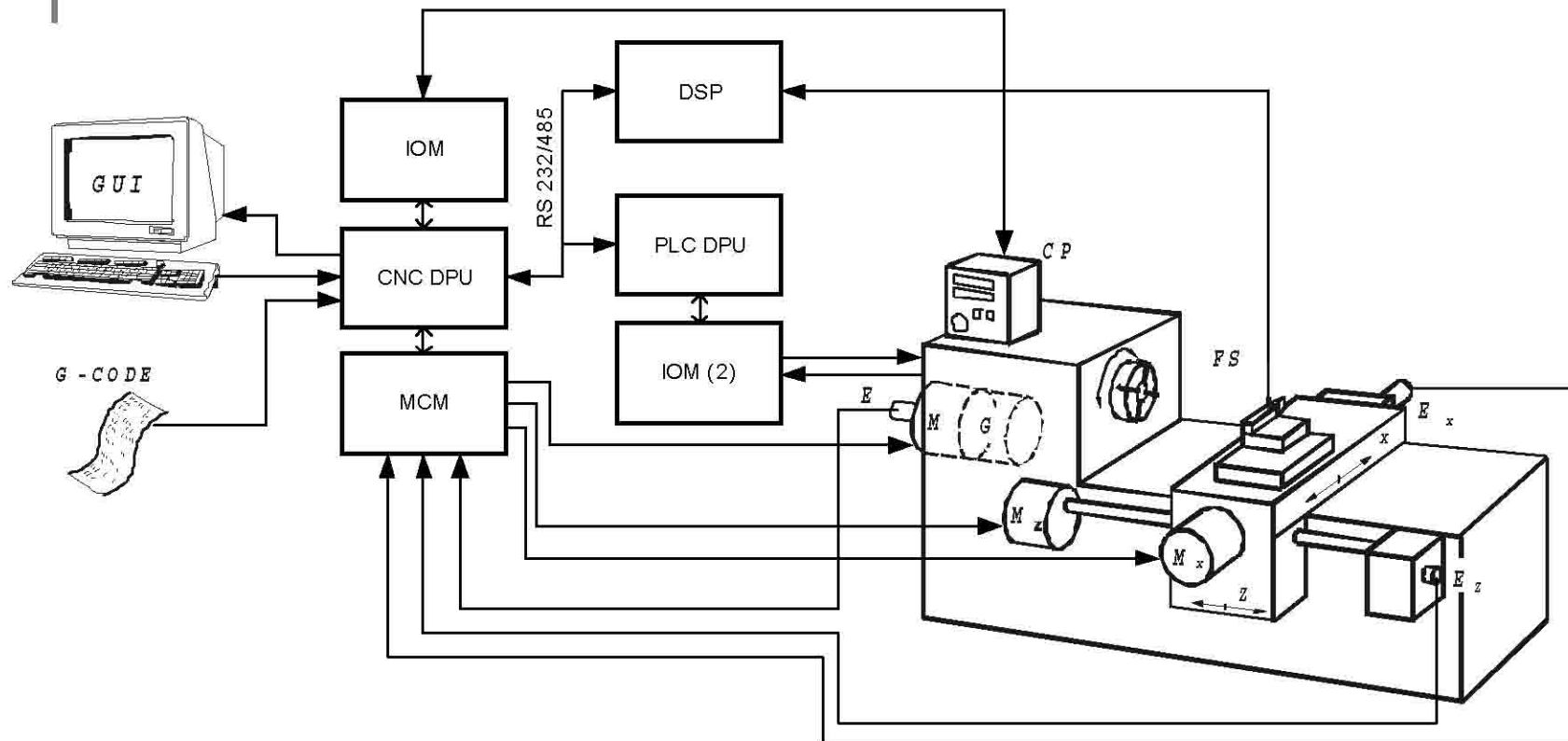
Razvojna ploščica DSK c31 z razširitvami

## DSP processor

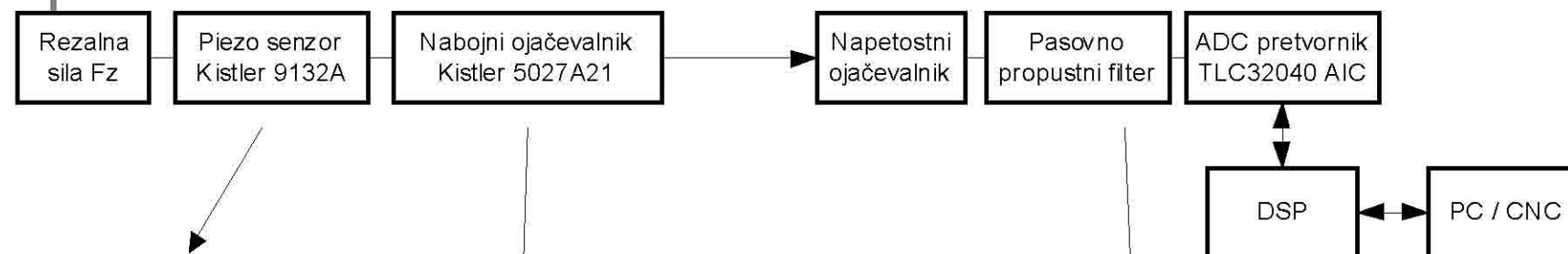




## Krmiljenje stružnice Index GU1000



## Merilni sistem za merjenje rezalnih sil na stružnici



Piezo senzor: Kistler 9132A  
 Območje sil Fz: 10 kN  
 Občutljivost: ~ 3 pC/N  
 Mere (Dz/Dn/V): 12/4.1/3 mm  
 Teža: 2g

Nabojni ojačevalnik Kistler 5027A21  
 Vhodno območje: +/- 4800 ... +/-145000 pC  
 Izhodna napetost: +/- 5 V  
 Izhodni tok: 2 mA  
 Izhodna impedanca: 100 ohm  
 Frekvenčno območje: ~ 0 ... 10000 Hz  
 Časovna konstanta: >50000 s  
 Nastavljeni faktor ojačanja: 1.179 V/kN

ADC pretvornik: TLC32040 AIC  
 Vhodno območje: +/- 6V  
 Vhodno ojačanje: nastavljivo 1, 2, 4 x  
 Mejne frekvence pasovnega filtra;  
 nastavljive: f1: ~300 Hz, f2: ~3400 Hz  
 Princip pretvorb: delta-sigma  
 Resolucija: 14 bit  
 Hitrost vzorčenja: variabilna do 24 kHz



## Potek vaje

---

- Prikaz piezoelektričnega merilnega sistema
- Analiza modela piezoelektričnega sistema
- Umerjanje merilnega sistema
  
- **MERJENJE SIL PRI STRUŽENJU**
- Prikaz krmilnih elementov stružnice
- Prikaz upravljanja s stružnico
- Programiranje
- Avtomatsko izvajanje gibov
- Zajem in prikaz rezalnih sil
- Analiza meritve