

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ОДРЕЂИВАЊЕ СИЛА/ОТПОРА РЕЗАЊА

Литература: М. Калајџић, „Технологија машиноградње”

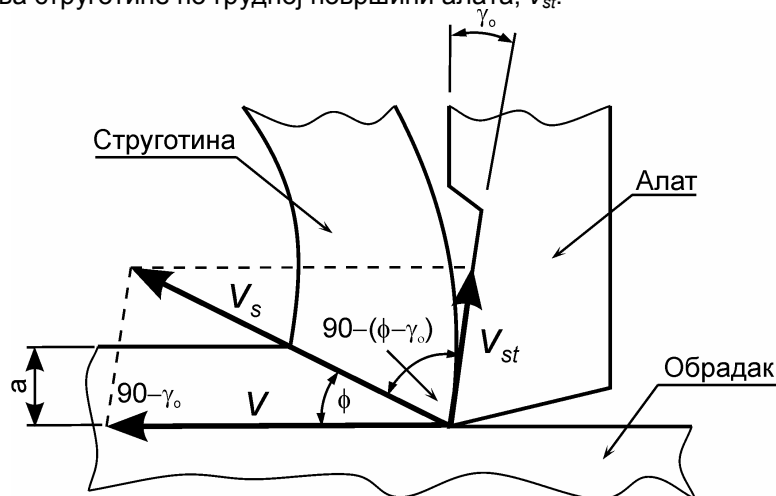
### Главни фактори обраде

Сви фактори који утичу на ток процеса резања, односно на процес стварања струготине, резултирају преко два главна фактора обраде, и то:

- брзине резања, и
- силе резања.

На слици 1 приказан је векторски план брзина у нормалном пресеку при косом резању. Овај векторски план чине три брзине:

- брзина резања,  $v$ ,
- брзина смицања струготине,  $v_s$ , и
- брзина кретања струготине по грудној површини алата,  $v_{st}$ .



Слика 1: Векторски план брзина у нормалном пресеку при косом резању.

Сила резања је механичка величина којом резни клин алата делује на обрадак у процесу скидања струготине. Интензитет и правац силе резања зависе од:

- обрадљивости материјала обратка,
- механичких својстава и хемијског састава материјала и обратка,
- елемената режима обраде,
- геометрије алата,
- примене средстава за хлађење и подмазивање,
- статичких и динамичких карактеристика машине алатке,
- осталих технолошких услова обраде (нпр. стање припремка итд).

### Динамометри

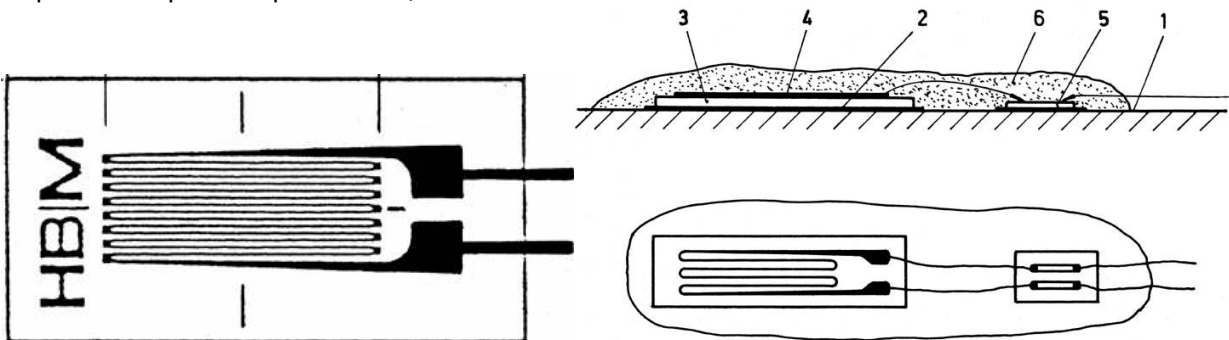
Динамометри се користе за мерење сила/отпора и момената резања. Представљају комплетне претвараче улазних величина  $F_i = F_i(t)$  у излазне сигнале  $S_i = S_i(t)$ ,  $i = 1...n$ , где је  $n$  – укупан број компоненти сила и момената резања које се мере.

#### Подела динамометара:

- **према типу конструкције:**
  - механички;
  - електрични,
    - са електроотпорним мерним тракама
    - са индуктивним претварачима,
    - са пиезоелектричним претварачима,
  - пнеуматски,
  - хидраулични;
- **према броју компонената које се мере:**
  - једнокомпонентни,
  - двокомпонентни,
  - вишекомпонентни;
- **према намени:**
  - стандардни,
  - лабораторијски,
  - динамички.

### Електроотпорне мерне траке

Електроотпорна мерна трака се састоји од отпорничке жице која је спирално савијена и налепљена на папирнату или пластичну траку. Спирале имају улогу да мултиплицирају промену дужине. Мерна трака се лепи на површину неког објекта, тако да се његова површинска деформација преноси на фолију/жицу траке, чиме се мења дужина жице  $L$ , а тиме и њена отпорност  $R$ , према формули:  $R = \rho L/S$ , где је  $\rho$  специфична отпорност материјала жице, а  $S$  површина попречног пресека жице.



Слика 2: Мерна трака.

Уравнотежење мерних трака се се изводи помоћу посебног инструмента, Витстоновог мерног моста, у коме мерна трака игра улогу отпора са променљивом отпорношћу. Промена отпорности у жици мења напон на дијагонали Витстоновог моста на којој се налази мерна трака; тиме се мења и напон на другој дијагонали мерног моста, који се појачава појачавачем и шаље на аналогни показивач и/или писач, или, преко А/Д конвертора, на дигитални показивач или интерфејс за аквизицију.

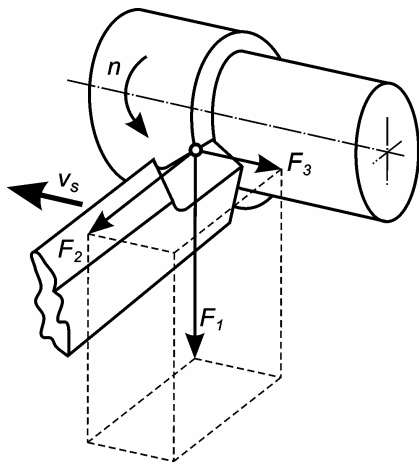
### Експериментално одређивање отпора резања при уздужном стругању

#### Компоненте отпора резања при уздужном стругању

Резултујући отпор резања може се разложити у три компоненте у три међусобно нормална правца:

- $F_1$ , главни отпор резања који се поклапа са правцем брзине резања,
- $F_2$ , отпор продирања који је нормалан на обрађену површину и
- $F_3$ , отпор помоћног кретања који се поклапа са правцем брзине помоћног кретања.

Сликом 3 приказане су компоненте отпора резања за случај уздужног стругања.



Слика 3: Компоненте отпора резања при уздужном стругању.

#### Значај одређивања појединих компоненти код уздужног стругања

- $F_1$ , заједно са брзином резања  $v$ , користи се за проверу снаге мотора машине алата;
- $F_1$ , заједно са  $F_3$ , користи се за проверу отпорности дршке ножа;
- $F_2$  је од значаја за тачност облика и мера и квалитет обрађене површине;
- $F_3$  је од значаја за проверу погона и преносника за помоћно кретање.

#### Карактер промене силе резања код уздужног стругања

Процес резања код уздужног стругања цилиндричних припремака није прекидан – алат је током захвата непрекидно у контакту са материјалом.

Компоненте отпора резања, као технолошке величине, дају се преко функција обрадљивости, обрасцима:

$$F_i = C_{ki} a^{x_i} s^{y_i} k_{Fi} \text{ [N]}, (i = 1,2,3), k_{Fi} = \prod_v k_{Fvi}$$

где су:

- $C_{ki}$  – константа,
- $a$  [mm] – дубина резања,
- $s$  [mm/o] – корак,
- $x_i, y_i$  – параметри обрадљивости и
- $k_{Fi}$  – поправни коефицијент који је производ парцијалних поправних коефицијената и узима у обзир јачину материјала обратка, геометрију алата и др.

Неки примери прекидног процеса резања код уздужног стругања:

- обрада нецилиндричног (шестоугаоног, осмоугаоног, ...) припремка;
- обрада вруће ваљаног материјала – тако добијени припремци немају савршено цилиндричан, већ елипсаст облик, па при резању имамо 2 минимума и 2 максимума силе при једном обрту обратка. Код оваквих припремака се мора извршити претходна обрада за поправку кружности.

### Конструкција примењеног мерног система у експерименту

Динамометар је постављен на алат, што значи да меримо отпоре резања. Направљен је од челика за опруге, са добро осмишљеним ослабљењима, на које се лепи 38 мерних трака, у три међусобно управна правца. Динамометар је, дакле, трокомпонентни, па може мерити истовремено све три компоненте отпора резања.

**Напомена:** остали подаци и процедура извођења експеримента дати су у додатку – садржају извештаја са ове лабораторијске вежбе

### Експериментално одређивање сила резања при обимном глодању

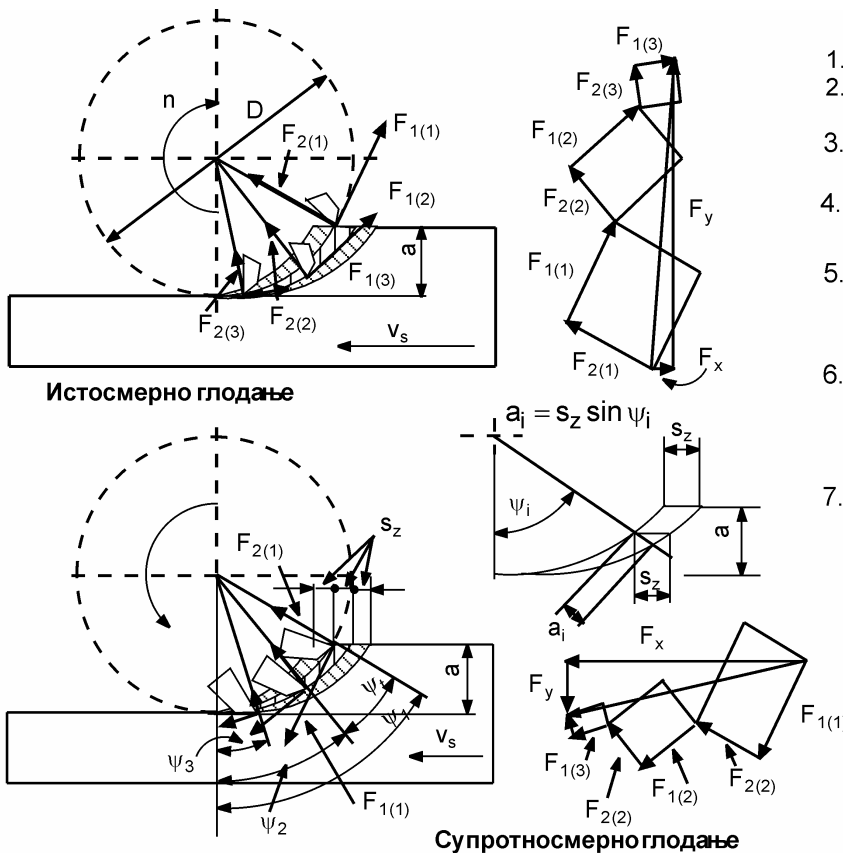
#### Карактер промене силе резања при глодању

Код обимног глодања користи се алат обимно глодало, са  $n$  зуба. Обрада је прекидна; број зуба у захвату, као и дебљина струготине мењају се у времену. Промена силе резања код глодања има динамички карактер, са периодичном променом, који зависи од:

- броја зуба глодала који се тренутно налази у процесу резања – резултујућа сила резања се добија слагањем сила по зубу глодала;
- тренутног положаја зуба у захвату – силе по зубу глодала су различите по правцу и интензитету, зависно од положаја зуба у захвату и тренутне дебљине струготине;
- типа глодања – супротносмерно или истосмерно.

#### Компоненте отпора резања при обимном глодању

На слици 4 приказана је шема сила при обимном, истосмерном и супротносмерном глодању са ваљкастим цилиндричним глодалима са правим зубима. На овој слици су дати и основни геометријски односи, који се тичу облика струготине, броја и положаја зуба у захвату.



1.  $D$  [mm] - пречник глодала
2.  $z$  - број зуба глодала
3.  $\psi_t = \frac{360^\circ}{z}$  - угаони корак зуба
4.  $\psi = \arcsin \left[ 2\sqrt{\frac{a}{D} - \frac{a^2}{D^2}} \right]$  - угао захвата
5.  $i_z = \frac{\psi}{\psi_t}$  - број зуба у захвату (заокружен на први већи број)
6.  $\psi_1 = \psi$ ;  $\psi_2 = \psi - \psi_t$   
 $\psi_i = \psi - (i-1)\psi_t$
7.  $\varepsilon = \frac{F_{2(i)}}{F_{1(i)}} \approx 0,3 \div 0,35$

Слика 4: Шеме сила при глодању.

С обзиром да се у овом случају ради о ортогоналном резању, то се резултујући отпор по  $i$ -том зубу глодала у захвату разлаже на две компоненте и то:

- $F_{1(i)}$ , главни отпор резања  $i$ -тог зуба који је колинеаран са брзином резања и
- $F_{2(i)}$ , отпор продирања  $i$ -тог зуба који има радијалан правац у односу на глодало.

У случају да се користи косозубо глодање, јавља се и трећа компонента силе резања, управна на раван коју дефинишу правци сила  $F_1$  и  $F_2$ .

Проширени израз за главни отпор резања по зубу, може се дати као:

$$F_{1(i)} = C_F b a_i^{1-x_1} \text{ [N]}$$

где су:

- $C_F$  – константа,
- $b$  [mm] – ширина глодања,
- $a_i = s_z \sin \psi_i$  [mm] – дебљина струготине  $i$ -тог зуба у захвату и
- $x_1$  – параметар обрадљивости.

Отпор продирања се при обимном глодању може добити из односа:

$$\varepsilon = F_{2(i)} / F_{1(i)}$$

где је приближно  $\varepsilon = (0.3 - 0.35)$ .

Укупна резултујућа сила глодања може се разложити у две компоненте, хоризонталну  $F_x$  и вертикалну  $F_y$ . Користећи план сила са слике 4, за три зуба у захвату, добија се израз за хоризонталну компоненту отпора резања, за општи случај:

$$F_x = \sum_{i=1}^{i_z} F_{1(i)} \cos \psi_i \pm \sum_{i=1}^{i_z} F_{2(i)} \sin \psi_i,$$

где се знак „+” односи на супротносмерно, а знак „-” на истосмерно глодање.

На исти начин, добија се за вертикалну компоненту отпора резања:

$$F_y = \sum_{i=1}^{i_z} F_{1(i)} \sin \psi_i \mp \sum_{i=1}^{i_z} F_{2(i)} \cos \psi_i,$$

где се овде знак „-” односи на супротносмерно, а знак „+” на истосмерно глодање.

Претходни изрази се могу представити и у облику:

$$F_x = C_F b s_z^{1-x_1} (q_1 \pm \varepsilon q_2) \text{ и } F_y = C_F b s_z^{1-x_1} (q_2 \mp \varepsilon q_1) \text{ [N]},$$

где су:

$$q_1 = \sum_{i=1}^{i_z} \sin^{1-x_1} \psi_i \cos \psi_i \text{ и } q_2 = \sum_{i=1}^{i_z} \sin^{2-x_1} \psi_i,$$

Резултујући отпор резања који оптерећује вратило глодала, добија се из:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = C_F b s_z^{1-x_1} \sqrt{(q_1^2 + q_2^2) \cdot (1 + \varepsilon^2)} \text{ [N]}.$$

#### Поређење карактеристика истосмерног и супротносмерног глодања

Код супротносмерног глодања обимна брзина алата и правац помоћног кретања обратка имају супротан смер, док је код истосмерног обратно. Код супротносмерног глодања пресек струготине расте током кретања зуба кроз материјал, а код истосмерног опада.

Предности истосмерног глодања:

- бољи квалитет обрађене површине,
- већа постојаност алата.

Мана истосмерног глодања: већи удари при уласку зуба алата у захват.

## Мерење отпора резања $F_2$ и $F_3$ код стругања

1. Теоретски увод са скицама (књига ТМ слика 5.13а, стр 180-182).
2. Скица експерименталне инсталације и услови извођења експеримента (мерења отпора резања  $F_2$  и  $F_3$ )
3. Израчунати аналитичке (рачунске) вредности сила резања  $F_2$  и  $F_3$ , на основу односа  $F_1:F_2:F_3 = 5:2:1$ , ако се  $F_1$  одређује на основу проширеног израза:

$$F_1 = C_{k_1} a^{x_1} s^{y_1} k_{F_1}, \text{ где је: } k_F = k_{FM} \cdot k_{Fk} \cdot k_{Fy}$$

Потребне коефицијенте бирати из приручника ТЕХНОЛОГИЈА ОБРАДЕ РЕЗАЊЕМ из таблица Т9.12 стр 446. Експерименталне вредности се израчунавају на основу очитане величине са графичког записа, добијеног на самој лабораторијској вежби. Добијене резултате упоредити са експерименталним и дати вредности грешака.

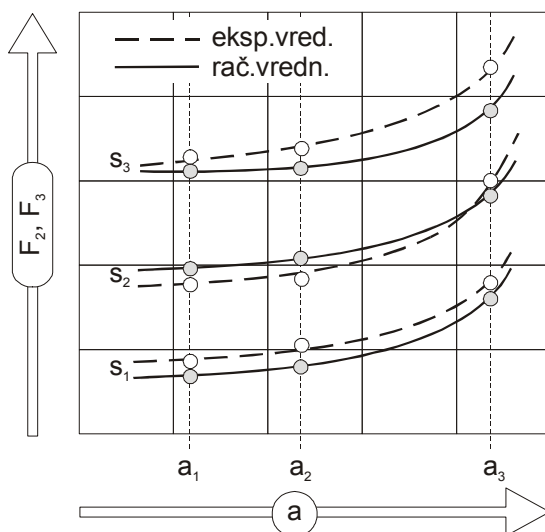
План експеримента:

РБ	Променљиви фактори		ОТПОРИ РЕЗАЊА КОД СТРУГАЊА				Апсолутне грешке [daN]		Релативне грешке [%]	
	a (mm)	s (mm/o)	ЕКСПЕРИМ. ВРЕДНОСТИ		РАЧУНСКЕ ВРЕДНОСТИ		$ F_{2e} - F_{2r} $	$ F_{3e} - F_{3r} $	$\frac{ F_{2e} - F_{2r} }{F_{2e}}$	$\frac{ F_{3e} - F_{3r} }{F_{3e}}$
			$F_{2e}$ (daN)	$F_{3e}$ (daN)	$F_{2r}$ (daN)	$F_{3r}$ (daN)				
1	0.15	0.15								
2	0.30									
3	0.50									
4	0.15	0.195								
5	0.30									
6	0.50									
7	0.15	0.26								
8	0.30									
9	0.50									

**Услови експеримента:**

- Материјал обратка:  $\check{C}.0645$   
 $R_m = 720 \text{ N/mm}^2$
- $n = 335 \text{ o/min}$
- пречник обратка  $D = 42 \text{ mm}$
- алат:  
тврди метал,  
 $\kappa = 45^\circ$ ,  $\kappa_1 = 45^\circ$ ,  
 $r = 1 \text{ mm}$ ,  $\gamma = 10^\circ$ ,  
 $\alpha = 5^\circ$ ,  $\lambda = 4^\circ$ .
- обрада се изводи без хлађења.

4. Нацртати дијаграме зависности (*на милиметарском папиру*). Дијаграми треба да изгледају као на слици 1. Вредности добијене аналитички дати на истим дијаграмима, другом бојом или другим типом линије.



Потребно је нацртати укупно 4 дијаграма:

- 1)  $F_2 = f(a)$ ,  $s_i = \text{const. } i = 1,2,3$
- 2)  $F_3 = f(a)$ ,  $s_i = \text{const. } i = 1,2,3$
- 3)  $F_2 = f(s)$ ,  $a_i = \text{const. } i = 1,2,3$
- 4)  $F_3 = f(s)$ ,  $a_i = \text{const. } i = 1,2,3$

Сваки дијаграм треба да садржи:

- назив дијаграма,
- легенду,
- уписане конкретне вредности корака и дубина резања,
- вредности силе на ординати.

Слика 1. Дијаграмски приказ сила  $F_2$  и  $F_3$  у функцији дубине и корака

5. Дати интелигентан и оригиналан коментар о добијеним резултатима. Уколико постоји значајна разлика у резултатима, размислити о најутицајним факторима који су до ње могли довести и навести их у коментару.

## Мерење вертикалне компоненте силе резања при обимном глодању

1. Увод са скицама (књига ТМ1 стр. 185-189) и објашњењима карактеристичних величина (мах једна страна).
2. Скица експерименталне инсталације и услови извођења експеримента.
3. Елементи режима обраде и упоредни приказ резултата добијених експериментално и аналитички.

<b>Обрадак:</b> Ї.1731 затезна чврстоћа: $R_m = 770 \text{ N/mm}^2$ ширина глодања: $b = 10 \text{ mm}$	<b>Алат:</b> вретенасто глодало ВЇ $z = 6, D = 35 \text{ mm}, \gamma = 10^\circ$ . број обрта алата: $n = 144 \text{ min}^{-1}$	<b>Машина:</b> универзална глодалица са вертикалном главом $P_{EM}(ГК) = 7 \text{ kW}$ дужина вратила: $l = 550 \text{ mm}$
<b>ЗАХВАТ:</b> Обимно супротносмерно глодање равне површине, обрада без хлађења		

РВ	Променљиви фактори					СИЛА $F_y$ КОД ГЛОДАЊА		Апсолутне грешке [daN]	Релативне грешке [%]
	a [mm]	$v_s$ [mm/min]	$s_z(j)$ [mm/z]	$\psi$ [°]	$i_z = \psi/\psi_t$	ЕКСПЕРИМ. ВРЕДНОСТИ $F_{Ye}$ [daN]	РАЧУНСКЕ ВРЕДНОСТИ $F_{Yr}$ [daN]		
1	0.5	17						$ F_{Ye} - F_{Yr} $	$\frac{ F_{Ye} - F_{Yr} }{F_{Ye}}$
2		33							
3		49							
4	1.0	17							
5		33							
6		49							
7	1.5	17							
8		33							
9		49							

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО

редни број експеримента (j)

За свако мерење усвојити локалну максималну вредност вертикалне силе глодања која одговара зубима који нису најдубље ни најплиће у захвату. Вредности бирати на устаљеном делу дијаграма промене величине силе.

### АНАЛИТИЧКИ

редни број режима (j)

$$s_z(j) = \frac{v_s(j)}{n \cdot z}; \quad \psi = \arcsin \left( 2 \sqrt{\frac{a}{D} - \left(\frac{a}{D}\right)^2} \right) \quad \psi_t = \frac{360^\circ}{z};$$

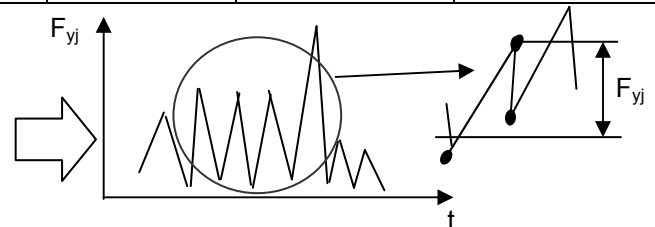
$$i_z = \frac{\psi}{\psi_t};$$

$$q_1 = \sum_{i=1}^{i_z} \sin^{1-x_1} \psi_i \cos \psi_i \quad q_2 = \sum_{i=1}^{i_z} \sin^{2-x_1} \psi_i$$

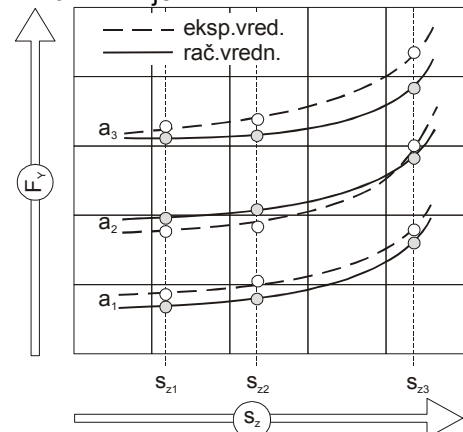
Потребне коефицијенте ( $C_F, C_{K1}, x_1, k_{Fv}, k_{F\gamma}$ ) извадити из таблице 9.3.2 приручника Технологија обраде резањем.

$$\text{Усвојити однос: } \varepsilon = \frac{F_2}{F_1} = 0.3$$

$$F_y(j) = C_F b s_{zj}^{1-x_1} (q_2 - \varepsilon q_1), \text{ књига ТМ стр.188.}$$

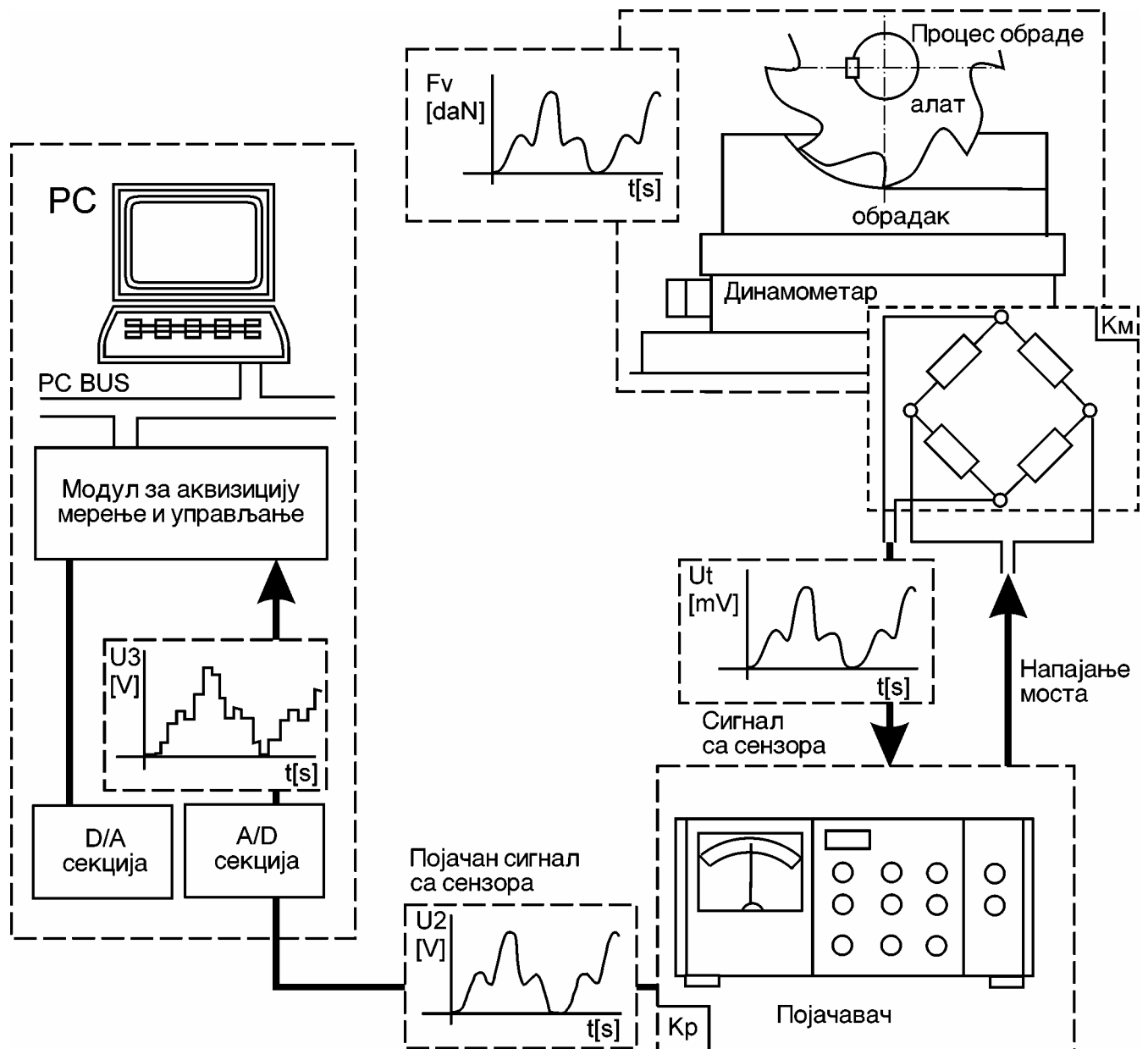


4. Нацртати дијаграме зависности (на милиметарском папиру). Пример изгледа дијаграма  $F_y(s_{zj})$ , за  $a_i = \text{const.}$ , ( $i, j = 1, 2, 3$ ) дат је на слици доле. На исти начин нацртати и дијаграм зависности  $F_y(a_j)$ , за  $s_{zj} = \text{const.}$ , ( $i, j = 1, 2, 3$ ). Вредности добијене аналитички дати на истим дијаграмима, другом бојом или другим типом линије.



5. Дати интелигентан и оригиналан коментар о добијеним резултатима.

## Општа шема експерименталне инсталације за мерење сила/отпора при обради резањем



Шему нацртати и за стругање и за глодање. Избацити са слика оне елементе са опште шеме који не постоје у конкретној инсталацији. Инсталација се не мора приказивати детаљно, довољно је нацртати блок шему са одговарајућим улазима и излазима из елемената и током сигнала. Уз симбол сваког елемента у блок шеми дати опис његове намене (по једну реченицу).