

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Boris DOLENC

**ANALIZA OBREMENITEV ORODJA PRI
PERIODIČNEM KROŽNEM ODREZOVANJU**

DIPLOMSKO DELO
Visokošolski strokovni študij

Ljubljana, 2008

UNIEVRZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Boris DOLENC

**ANALIZA OBREMENITEV ORODJA PRI PERIODIČNEM
KROŽNEM ODREZOVANJU**

DIPLOMSKO DELO
Visokošolski strokovni študij

**ANALYSIS OF THE CUTTING TOOL LOAD DURING PERIODIC
CIRCULAR CUTTING**

GRADUATION THESIS
Heiger professional studies

Ljubljana, 2008

Diplomsko delo je zaključek Visokošolskega strokovnega študija lesarstva. Opravljeno je bilo na Katedri za mehanske obdelovalne tehnologije Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomskega dela imenoval doc. dr. Bojana Bučarja ter doc. dr. Dominiko Gornik Bučar za recenzentko.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo

Predsednik:

Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo

Predsednik:

Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo

Datum zagovora:

Naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela.

Boris Dolenc

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Vs
DK	UDK 621.93.023
KG	periodično krožno odrezovanje/rezalna sila/specifična rezalna sila
AV	DOLENC, Boris
SA	BUČAR, Bojan (mentor)/GORNIK BUČAR, Dominika (recenzentka)
KZ	SI-1000, Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2008
IN	ANALIZA OBREMENITEV ORODJA PRI PERIODIČNEM KROŽNEM ODREZOVANJU
TD	Diplomsko delo (Visokošolski strokovni študij)
OP	XI, 42 str., 5 pregl., 47 sl., 13 pril., 18 vir.
IJ	sl
JJ	sl/en
AI	Prikazali smo analizo obremenitev nastalih med periodičnim krožnim odrezovanjem z vrtečim se rezalnim orodjem. Raziskavo smo opravili z namenom, da bi določili specifično rezalno silo, ki predstavlja osnovni tehnološki parameter. Analizirali smo vplivnost 2 snovnih spremenljivk, in sicer smeri odrezovanja in vlažnosti obdelovanega materiala, ter vplivnost podajalne hitrosti kot osnovne tehnološke spremenljivke. Preizkušance različnih uravnovešenih vlažnosti smo izdelali iz bukovine (<i>Fagus Silvatica</i>). Zasnovali in izdelali smo sistem za merjenje vzporedne in normalne komponente rezalne sile na gibajočem se obdelovancu. Podajalna hitrost obdelovanca je bila med odrezovanjem konstantna. Specifična rezalna sila se z naraščajočo globino odrezovanja in kotom odrezovanja povečuje potenčno. V obeh primerih dosegata regresijska koeficienta vrednost 0,99. Specifična rezalna sila je bila pri vlažnostih lesa 8,2 in 18 % skoraj identična, pri 12 % pa smo zasledili porast vrednosti. Podajalna hitrost na specifično rezalno silo ne vpliva, vpliva pa na velikost vzporedne in normalne komponente rezalne sile.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Vs
DC UDC 621.93.023
CX periodic circular cutting/cutting force/specific cutting force
AU DOLENC, Boris
AA BUČAR, Bojan (supervisor)/GORNIK BUČAR, Dominika (co-advisor)
PP SI-1000, Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science
PY 2008
TI ANALYSIS OF THE CUTTING TOOL LOAD DURING PERIODIC
CIRCULAR CUTTING
DT Graduation Thesis (Higher professional studies)
NO XI, 42 p., 5 tab., 47 fig., 13 ann., 18 ref.
LA sl
AL sl/en
AB Analysis of the load under which the milling tool is at periodic circular cutting is shown. The research was performed in order to define the specific cutting force representing the basic technological parameter. The research includes the analysis of the influence of 2 material variables – the change of the direction of cutting and moisture content of the used material, and the influence of the feed speed as the basic technological variable. The tested samples, with different moisture contents, were made of beech wood (*Fagus Silvatica*). The system for measuring the parallel and the normal components of the cutting force on the moving test model was planned and made out. The feed speed of the test sample was constant during the cutting. The specific cutting force was increasing potentially along with the increasing depth and the angle of the cutting. In both cases the regressive coefficients reached 0.99 of value. The specific cutting force was almost identical at moisture contents of 8.2 and 18 %, while at 12 % the increase in value was traced. The feed speed did not influence the specific cutting force but it influenced the size of the parallel and the normal components of the cutting force.

KAZALO VSEBINE

	Str.
Ključna dokumentacijska informacija (KDI)	III
Key words documentation (KWD)	IV
Kazalo vsebine	V
Kazalo preglednic	VI
Kazalo slik	VII
Kazalo prilog	X
Okrajšave in simboli	XI
1 UVOD	1
2 PREGLED OBJAV	2
2.1 GEOMETRIJA ODREZKA IN KOMPONENT REZALNE SILE	10
3 MATERIALI IN METODE	12
3.1 PODAJALNI SISTEM	12
3.2 VPENJALNI SISTEM Z DINAMOMETRI	13
3.2.1 Induktivni senzorji	14
3.2.2 Statično umerjanje dinamometrov	15
3.2.3 Zajemanje meritev	17
3.3 REZKALNO ORODJE	18
3.4 PRIPRAVA TESTNEGA MATERIALA	18
4 REZULTATI MERITEV	23
4.1 LASTNE FREKVENCE DINAMOMETROV	23
4.2 REZALNE SILE	26
4.3 VZPOREDNE IN NORMALNE KOMPONENTE REZALNE SILE	29
4.4 SPECIFIČNA REZALNA SILA	33
5 RAZPRAVA IN SKLEPI	39
6 POVZETEK	40
7 VIRI	41

KAZALO PREGLEDNIC

	Str.
Preglednica 1	Specifikacije AC servo regulator MR – J2S – 20 A in AC servo motor HC – MFS 23
Preglednica 2	Tehnični podatki induktivnega senzorja IA 12 ASC 05 AK-K
Preglednica 3	Lastnosti lesnega tkiva bukovine (<i>Fagus Silvatica</i>)
Preglednica 4	Pričakovana ravnovesna vlažnost lesa
Preglednica 5	Dejanska ravnovesna vlažnost lesa

KAZALO SLIK

	Str.
Slika 2.1 UNM model za obdelavo rezalnih sil	3
Slika 2.2 Specifična rezalna sila pri odrezavanju lesa japonskega rdečega bora v odvisnosti od kota odrezovanja pri različnih globinah odrezovanja	5
Slika 2.3 Specifična rezalna sila pri odrezavanju brezovine v odvisnosti od ravnovesne vlažnosti pri različnih kotih odrezovanja	6
Slika 2.4 Obremenitve, ki delujejo na konico rezila	7
Slika 2.5 Tlačne obremenitve, ki delujejo na obdelovanec	8
Slika 2.6 Obremenitve, ki nastajajo pri odrezovanju z otopelim rezilom	9
Slika 2.7 Komponente rezalne sile F_R	11
Slika 3.1 Dvostopenjski reduktor	12
Slika 3.2 Vpenjalni sistem z dinamometri	13
Slika 3.3 Merjenje deformacije dinamometra	14
Slika 3.4 Induktivni senzor IA 12 ASC 05 AK-K	14
Slika 3.5 Zveza med vzbujevalno silo in izhodno napetostjo induktivnega senzorja IA 12 ASC 05 AK-K, pri različnih napetostih napajanja, ki velja za dinamometer F_{y1}	15
Slika 3.6 Zveza med vzbujevalno silo in izhodno napetostjo induktivnega senzorja IA 12 ASC 05 AK-K, pri različnih napetostih napajanja, ki velja za dinamometer F_{y2}	16
Slika 3.7 Zveza med vzbujevalno silo in izhodno napetostjo induktivnega senzorja IA 12 ASC 05 AK-K, pri različnih napetostih napajanja, ki velja za dinamometer F_x	16
Slika 3.8 Shematski prikaz eksperimentalnega sistema	17
Slika 3.9 Rezkalno orodje	18
Slika 3.10 Anatomska zgradba bukovine (<i>Fagus Silvatica</i>) v prečnem prerezu	19
Slika 3.11 Anatomska zgradba bukovine (<i>Fagus Silvatica</i>) v radialnem prerezu	20
Slika 3.12 Anatomska zgradba bukovine (<i>Fagus Silvatica</i>) v tangencialnem prerezu	21
Slika 4.1 Odziv dinamometra F_{y1}	23
Slika 4.2 Frekvenčna sestava odziva dinamometra F_{y1}	24
Slika 4.3 Odziv dinamometra F_x	24
Slika 4.4 Frekvenčna sestava odziva dinamometra F_x	25
Slika 4.5 Frekvenčna sestava signala dinamometra F_{y1} med odrezovanjem	25
Slika 4.6 Izmerjena deformacija na dinamometru F_{y1} pri ravnovesni vlažnosti bukovine 18 %, globini odrezovanja 6 mm in podajalni hitrosti 10 m/min ter hipotetična deformacija, ki jo povzroča normalna komponenta rezalne sile (F_{y1})	26

Slika 4.7	Izmerjena deformacija na dinamometru F_x pri ravnovesni vlažnosti bukovine 18 %, globini odrezovanja 6 mm in podajalni hitrosti 10 m/min ter hipotetična deformacija, ki jo povzroča vzporedna komponenta rezalne sile (F_x)	27
Slika 4.8	Seštevanje normalne komponente rezalne sile izmerjene na dinamometrih F_{y1} in F_{y2} pri ravnovesni vlažnosti bukovine 18 %, globini odrezovanja 6 mm in podajalni hitrosti 10 m/min	27
Slika 4.9	Povprečje normalne (F_y) komponente rezalne sile pri ravnovesni vlažnosti bukovine 18 %, globini odrezovanja 6 mm in podajalni hitrosti 10 m/min	28
Slika 4.10	Povprečje vzporedne (F_x) komponente rezalne sile pri ravnovesni vlažnosti bukovine 18 %, globini odrezovanja 6 mm in podajalni hitrosti 10 m/min	28
Slika 4.11	Rezalna sila (F_R) ter njena vzporedna (F_x) in normalna (F_y) komponenta pri ravnovesni vlažnosti bukovine 18 %, globini odrezovanja 6 mm in podajalni hitrosti 10 m/min	29
Slika 4.12	Vzporedna komponenta rezalne sile pri ravnovesni vlažnosti bukovine 8,2 % v odvisnosti od globine odrezovanja pri različnih podajalnih hitrostih obdelovanja	30
Slika 4.13	Normalna komponenta rezalne sile pri ravnovesni vlažnosti bukovine 8,2 % v odvisnosti od globine odrezovanja pri različnih podajalnih hitrostih obdelovanja	30
Slika 4.14	Vzporedna komponenta rezalne sile pri ravnovesni vlažnosti bukovine 12 % v odvisnosti od globine odrezovanja pri različnih podajalnih hitrostih obdelovanja	31
Slika 4.15	Normalna komponenta rezalne sile pri ravnovesni vlažnosti bukovine 12 % v odvisnosti od globine odrezovanja pri različnih podajalnih hitrostih obdelovanja	31
Slika 4.16	Vzporedna komponenta rezalne sile pri ravnovesni vlažnosti bukovine 18 % v odvisnosti od globine odrezovanja pri različnih podajalnih hitrostih obdelovanja	32
Slika 4.17	Normalna komponenta rezalne sile pri ravnovesni vlažnosti bukovine 18 % v odvisnosti od globine odrezovanja pri različnih podajalnih hitrostih obdelovanja	32
Slika 4.18	Srednja debelina odrezka (h_m) v odvisnosti od globine odrezovanja pri različnih podajalnih hitrostih	33
Slika 4.19	Specifična rezalna sila pri ravnovesni vlažnosti bukovine 8,2 % v odvisnosti od pomika obdelovanja na rezilo pri različnih globinah odrezovanja	34
Slika 4.20	Specifična rezalna sila pri ravnovesni vlažnosti bukovine 8,2 % v odvisnosti od globine odrezovanja pri različnih podajalnih hitrostih	34
Slika 4.21	Specifična rezalna sila pri ravnovesni vlažnosti bukovine 8,2 % v odvisnosti od kota odrezovanja pri različnih podajalnih hitrostih	35

Slika 4.22	Specifična rezalna sila pri ravnovesni vlažnosti bukovine 12 % v odvisnosti od pomika obdelovanca na rezilo pri različnih globinah odrezovanja	35
Slika 4.23	Specifična rezalna sila pri ravnovesni vlažnosti bukovine 12 % v odvisnosti od globine odrezovanja pri različnih podajalnih hitrostih	36
Slika 4.24	Specifična rezalna sila pri ravnovesni vlažnosti bukovine 12 % v odvisnosti od kota odrezovanja pri različnih podajalnih hitrostih	36
Slika 4.25	Specifična rezalna sila pri ravnovesni vlažnosti bukovine 18 % v odvisnosti od pomika obdelovanca na rezilo pri različnih globinah odrezovanja	37
Slika 4.26	Specifična rezalna sila pri ravnovesni vlažnosti bukovine 18 % v odvisnosti od globine odrezovanja pri različnih podajalnih hitrostih	37
Slika 4.27	Specifična rezalna sila pri ravnovesni vlažnosti bukovine 18 % v odvisnosti od kota odrezovanja pri različnih podajalnih hitrostih	38
Slika 4.28	Specifična rezalna sila v odvisnosti od ravnovesne vlažnosti bukovine pri različnih globinah odrezovanja	38

KAZALO PRILOG

Priloga A1	Izmerjene deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri ortogonalnem krožnem odrezovanju bukovine, njeni ravnovesni vlažnosti 8,2 % in podajalni hitrosti 6 m/min
Priloga A2	Izmerjene deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri ortogonalnem krožnem odrezovanju bukovine, njeni ravnovesni vlažnosti 8,2 % in podajalni hitrosti 8 m/min
Priloga A3	Izmerjene deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri ortogonalnem krožnem odrezovanju bukovine, njeni ravnovesni vlažnosti 8,2 % in podajalni hitrosti 10 m/min
Priloga A4	Izmerjene deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri ortogonalnem krožnem odrezovanju bukovine, njeni ravnovesni vlažnosti 8,2 % in podajalni hitrosti 12 m/min
Priloga B1	Izmerjene deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri ortogonalnem krožnem odrezovanju bukovine, njeni ravnovesni vlažnosti 12 % in podajalni hitrosti 6 m/min
Priloga B2	Izmerjene deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri ortogonalnem krožnem odrezovanju bukovine, njeni ravnovesni vlažnosti 12 % in podajalni hitrosti 8 m/min
Priloga B3	Izmerjene deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri ortogonalnem krožnem odrezovanju bukovine, njeni ravnovesni vlažnosti 12 % in podajalni hitrosti 10 m/min
Priloga B4	Izmerjene deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri ortogonalnem krožnem odrezovanju bukovine, njeni ravnovesni vlažnosti 12 % in podajalni hitrosti 12 m/min
Priloga C1	Izmerjene deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri ortogonalnem krožnem odrezovanju bukovine, njeni ravnovesni vlažnosti 18 % in podajalni hitrosti 6 m/min
Priloga C2	Izmerjene deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri ortogonalnem krožnem odrezovanju bukovine, njeni ravnovesni vlažnosti 18 % in podajalni hitrosti 8 m/min
Priloga C3	Izmerjene deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri ortogonalnem krožnem odrezovanju bukovine, njeni ravnovesni vlažnosti 18 % in podajalni hitrosti 10 m/min
Priloga C4	Izmerjene deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri ortogonalnem krožnem odrezovanju bukovine, njeni ravnovesni vlažnosti 18 % in podajalni hitrosti 12 m/min
Priloga D1	Načrt vpenjalnega sistema z dinamometri

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

a	globina odrezovanja [mm]
α	prosti kot rezila [°]
b	širina oziroma osna globina odrezovanja [mm]
β	ostrinski kot rezila [°]
d, g	Lubkinova koeficienta vpliva debeline odrezka
e_z	pomik na rezilo [mm]
f_s	specifična rezalna sila [N/mm ²]
$f_{s(\varphi, h)}$	specifična rezalna sila pri zasučnem kotu φ in debelini odrezka h [N/mm ²]
f_{s0}	specifična rezalna sila pri premočrtnem odrezovanju v vzdolžni smeri lesnega tkiva [N/mm ²]
$f_{s\varphi}$	specifična rezalna sila pri zasučnem kotu φ [N/mm ²]
F_m	glavna komponenta rezalne sile na konici rezila [N]
F_r	radialna komponenta rezalne sile [N]
F_R	rezalna sila [N]
F_t	tangencialna komponenta rezalne sile [N]
$F_{t,\varphi}$	tangencialna komponenta rezalne sile pri zasučnem kotu φ [N]
$F_x(F_p)$	vzporedna komponenta rezalne sile [N]
$F_y(F_n)$	normalna komponenta rezalne sile [N]
γ	prsni kot rezila [°]
h	debelina odrezka pri premočrtnem odrezovanju [mm]
h_φ	debelina odrezka pri zasučnem kotu φ [mm]
h_m	srednja debelina odrezka [mm]
φ	zasučni kot orodja [°]
i	prestavno razmerje
n	število vrtljajev orodja [min ⁻¹]
r	regresijski koeficient
u	podajalna hitrost [m/min]
u_r	ravnovesna vlažnost lesa [%]
v	rezalna hitrost [m/s]
z	število rezil orodja
z_{ef}	število rezil orodja v odbdelovancu

1 UVOD

Periodično krožno odrezovanje je najpogostejše uporabljen mehanski način obdelave lesnega tkiva. Novo nastala površina je posledica lokalnih porušitev tkiva v neposredni bližini konice rezila, kjer nastajajo odrezki spremenljive presečne površine z lokalno usmeritvijo tkiva. Na geometrijo odrezkov vplivajo tudi variabilne fizikalne lastnosti lesnega tkiva, ki so posledica izrazite anizotropnosti lesa.

Obremenitve, ki nastanejo v procesu odrezavanja, so v veliki meri pogojene z geometrijskimi parametri samih rezil, ki pa se zaradi njihove obrabe relativno hitro spreminjajo. Na obrabo konic rezil lesno obdelovalnih orodij vplivajo impulzne mehanske obremenitve ter trenje med rezilom in lesnim tkivom, ki povzroča spremenljive termične obremenitve. Slaba obstojnost rezil za preoblikovanje lesa zmanjšuje kvaliteto izdelkov in povečuje njihovo ceno.

V sklopu diplomske naloge bomo zasnovali in izdelali eksperimentalni sistem, ki bo prilagojen konstrukcijskim zahtevam obstoječega miznega rezkalnega stroja. Sistem bo omogočil avtomatiziran pomik, vpetje obdelovanca ter merjenje komponent rezalne sile. Razvili bomo dinamični model periodičnega diskontinuiranega ortogonalnega krožnega odrezovanja lesnega tkiva, ki bo upošteval tudi dinamične lastnosti obdelovalnega sistema. Analizirali bomo spremenljivost rezalne sile v procesu nastajanja odrezka, ki je posledica spreminjajoče se presečne površine odrezka, lokalne usmerjenosti tkiva in variabilne lokalne fizikalne lastnosti tkiva. Na osnovi opravljenih meritev bomo določili specifično rezalno silo, ki predstavlja osnovni relevantni tehnološki parameter.

2 PREGLED OBJAV

Franz (1958, cit. po Eyma in sod., 2004) je bil eden prvih raziskovalcev formacije odrezka in rezalnih sil v smeri odrezovanja lesnega tkiva. Njegovo delo temelji na Merchantovem modelu odrezovanja kovin.

Merchant (1945, cit. po Bučar 1991) je objavil prvi širše sprejeti model tvorbe odrezka za področje odrezovanja kovin. V skladu z modelom je porušitev materiala posledica nateznih in strižnih napetosti v ravnini, ki potekajo poševno od rezalnega roba do površine obdelovanca.

Eyma in sod. (2004) navajajo razmerja in njihove regresijske koeficiente med rezalno silo ter gostoto, trdoto in modulom elastičnosti. Razmerje med gostoto in rezalno silo ni idealno. Nekateri pomanjkljivosti lahko pripišemo sami anizotropnosti lesnega tkiva. Temu razmerju je zelo podobna korelacija med trdoto in rezalno silo. Po njihovem mnenju ima najbolj relevanten vpliv na rezalno silo prav modul elastičnosti katerega regresijski koeficient (r) je 0,6.

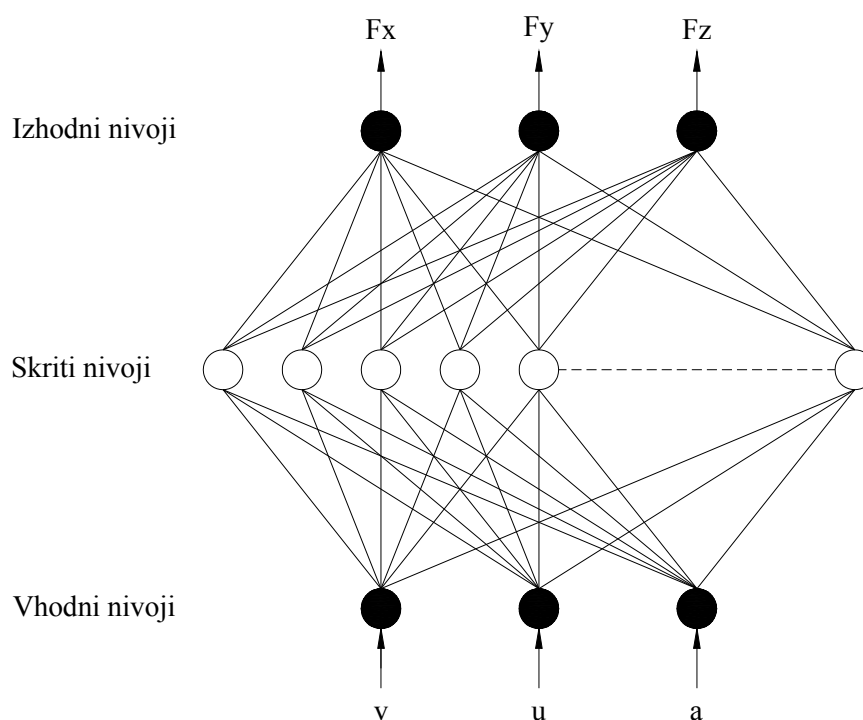
Boucher in sod. (2007) navajajo rezalne sile pri poševnem rezkanju MDF plošč in kako geometrijski parametri rezila vplivajo na njegovo življenjsko dobo ter na kvaliteto obdelane površine. S pomočjo programa Visual Basic 6 so razvili model za napoved rezalnih sil pri procesu poševnega rezkanja MDF plošč, ki daje dokaj natančne simulacije rezalnih sil v vseh treh smereh odrezovanja. Pri eksperimentu so uporabili rezalno orodje iz polikristalnega diamanta (PKD). Rezilo pod kotom 30° zmanjša pritisk na vrhnjem robu obdelane površine za 20 %, kar je pogoj za zmanjševanje števila in dimenzij razpok na melaminski površini. Pri tem načinu odrezovanja se poveča stična ploskev med rezilom in obdelovancem, zaradi česar se zmanjša pritisk na konico rezalnega orodja. Posledica je daljša življenjska doba rezalnega orodja.

Lavery in sod. (1995, cit. po Aguilera in Martin, 2001) opisujejo kvaliteto obdelane površine kot posledico anomalij na obdelovancu in trenutnega stanja obdelovalnega sistema. Juan in Plassat (1990, cit. po Aguilera in Martin, 2001) navajata vpliv debeline odrezka na kvaliteto obdelane površine in na ostrino rezila obdelovalnega orodja. Odrezek večjih dimenzij pomeni večjo produktivnost ter posledično slabšo kvaliteto obdelane površine. Odrezek manjših dimenzij izboljša kvaliteto površine, zmanjša pa se tudi obraba rezalnega orodja.

Aguilera in Martin (2001) zatrjujeta, da mora pri odrezovanju rezilo obdelovalnega orodja doseči vsoto sil, ki jo tvorijo kohezijska trdnost lesnega tkiva, upogibna trdnost vlaken, strižna sila ter sila trenja med obdelovanim materialom in mizo obdelovalnega stroja. Na velikost te rezalne sile vplivajo tudi lastnosti obdelovalnega materiala, parametri odrezovanja ter geometrija rezila. Avtorja sta v eksperimentalnem delu izmerila rezalne sile pri istosmernem in protismernem odrezovanju bukovine (*Fagus Silvatica*) in smrekovine (*Picea Excelsa*) na skobeljnem stroju s piezoelektričnim senzorjem. Podajalna hitrost, rezalna hitrost in globina odrezovanja so spremenljivi eksperimentalni parametri odrezovanja, debelina odrezka in širina rezanja pa sta konstantni. Rezalna sila se pri protismernem odrezovanju povečuje z naraščanjem gostote obdelovanega materiala. Do globine

odrezovanja 3 mm ni pomembnih razlik med odrezovanjem bukovine in smrekovine. Avtorja navajata večje sile rezanja pri istosmernem odrezovanju, kar je v nasprotju s podano literaturo. Zaradi maksimalne debeline odrezka na začetku prodora rezila v lesno tkivo, se pojavijo večje tlačne obremenitve kot na izstopu protismernega odrezovanja. S povečevanjem globine odrezovanja rezalne sile naraščajo. Pri istosmernem odrezovanju se rezalne sile povečujejo sorazmerno z večanjem rezalne hitrosti, to ne velja za protismerno odrezovanje, kar avtorja pojasnjujeta z motnjami pri eksperimentalnem procesu. Povprečna izmerjena rezalna sila pri protismernem odrezovanju smrekovine pri vlažnosti 9 % in globini odrezovanja 3 mm znaša 78 N, pri globini 5 mm pa 83 N, pri odrezovanju bukovine pri enakih pogojih pa izmerjeni rezalni sili znašata 91 N in 95 N.

Aykut in sod. (2007) navajajo dokaj nov postopek za modeliranje rezalnih parametrov pri površinskem rezkanju kobaltove zlitine stelita 6. Postopek se imenuje umetne nevronske mreže (UNM), njihove kompleksne napovedi so pri temeljitnem pristopu skoraj optimalne.



Slika 2.1 UNM model za obdelavo rezalnih sil (Aykut in sod., 2006)

Aykut in sod. (2007), izbrani model UNM na sliki 2.1 je več nivojski, vsebuje 3 vhode, rezalno hitrost (v), podajalno hitrost (u) in globino odrezovanja (a), 35 skritih nevronov in 3 izhode rezalnih sil F_x , F_y in F_z . Uporabili so algoritem feed-forward back-propagation umetnih nevronske mreže, ki minimizira napake na povezavah med nevroni in predvidi izhode. Predvidene vrednosti regresijskih koeficientov (r), ki jih navajajo UNM so za vzporedno (F_x) 0,9897, za normalno (F_y) 0,9864, ter za vertikalno komponento rezalne sile (F_z) 0,9771. Eksperimentalne vrednosti regresijskih koeficientov so pri F_x 0,9937,

F_y 0,9991, ter pri F_z 0,9999. Rezultati dokazujejo, da je model UNM dokaj natančen in se pri takem načinu odrezovanja lahko uporabi za predvidevanje rezalnih parametrov.

Mori (1971) opisuje spreminjanje debeline odrezka in kota odrezovanja pri rezkanju lesnega tkiva ter odvisnost med rezalno silo in kotom odrezovanja. Pri eksperimentalnem delu je uporabil vrtni stroj ter rezkalno orodje z dvema reziloma. Eksperimenti so bili opravljeni pri rezalni hitrosti 11,8 m/s v kombinaciji z različnimi globinami odrezovanja in koti odrezovanja pri prostem kotu rezila (γ) 30°.

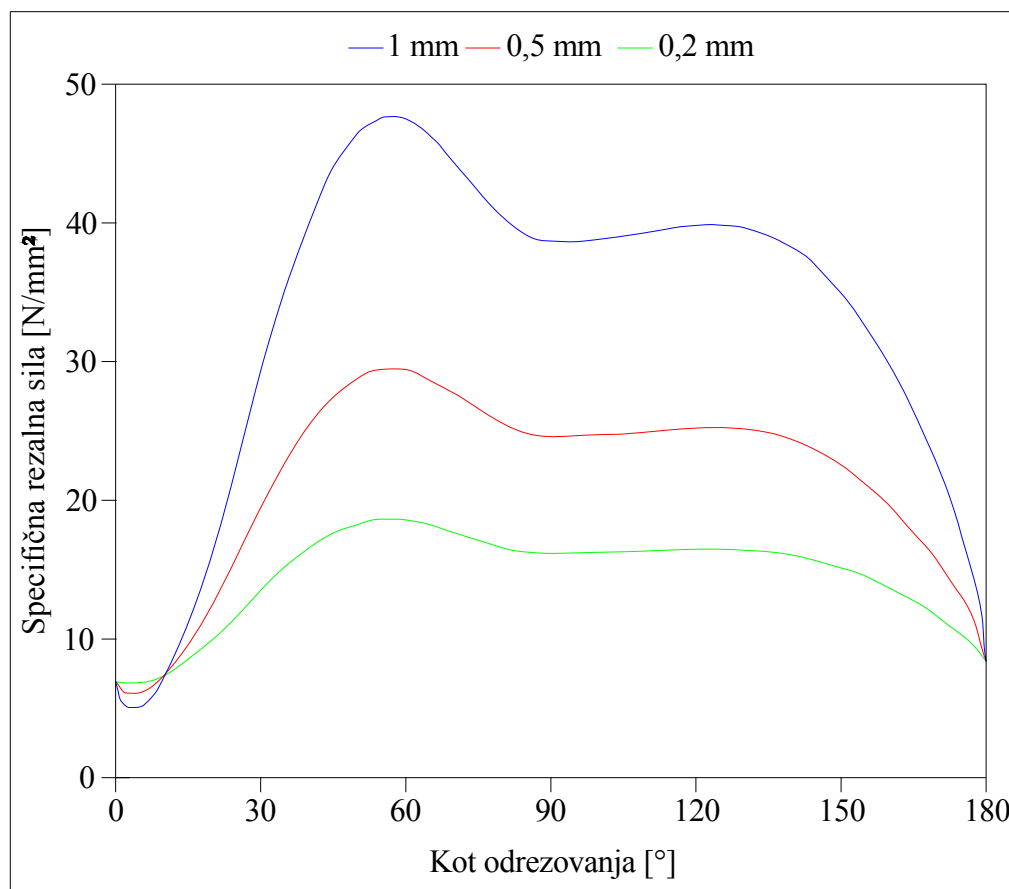
Zvezo med specifičnim rezalnim tlakom in kotom odrezovanja izrazimo glede na način odrezovanja (Mori, 1971, cit. po Bučar, 1996).

$$f_{s\varphi} = f_{s0} \times (\sin^4(\varphi) + \sin^2(\varphi) + 0,5 \times \sin(\varphi) - 0,5 \times \sin^{0,5}(\varphi)) \quad \dots(1)$$

$$f_{s\varphi} = f_{s0} \times (\sin^2(\varphi) \times \sin^{0,5}(\varphi) + \sin^{1,5}(\varphi)) \quad \dots(2)$$

Enačba 1 velja v primeru, ko velja $0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$, enačba 2 pa v primeru, ko velja $90^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$. f_{s0} je specifična rezalna sila pri odrezovanju vzporedno z lesnim tkivom (Mori, 1971, cit. po Bučar, 1996).

$$f_{s0} = \frac{F_p}{b \times (d + g \times h)} \quad \dots(3)$$



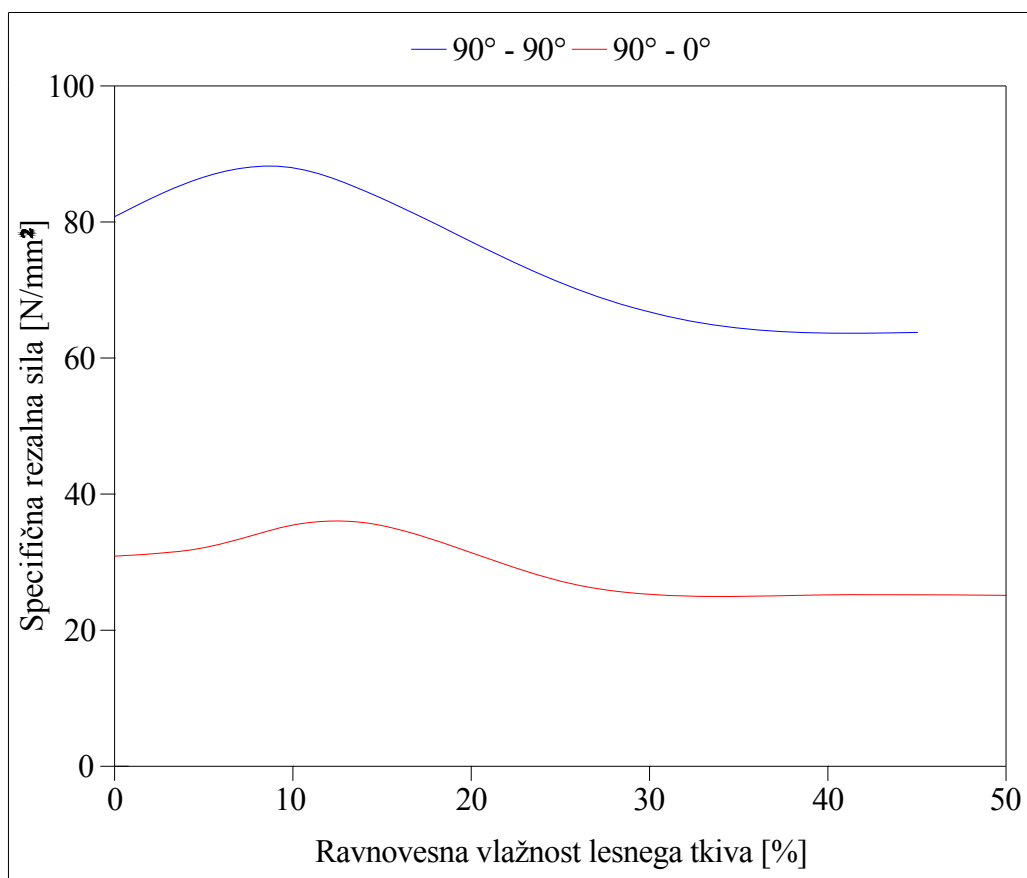
Slika 2.2 Specifična rezalna sila pri odrezavanju lesa japonskega rdečega bora v odvisnosti od kota odrezovanja pri različnih globlinah odrezovanja (Mori, 1971, cit. po Bučar, 1996)

Specifična rezalna sila prikazana na sliki 2.2 temelji na enačbi 1 in 2.

Bučar (1991) opisuje vpliv smeri odrezovanja na spremenljivost komponent rezalne sile. Odrezovanje poteka v smeri $90^\circ - 5^\circ$, $90^\circ - 10^\circ$, ... $90^\circ - 85^\circ$. Sprememb najmanjših izmerjenih komponent rezalne sile praktično ni do kota 55° ter so zelo majhne od kota 55° do 85° . Spremembe največjih izmerjenih komponent rezalne sile so 3 do 4-krat večje. Za proces odrezovanja je potreben nek minimalni obremenitveni potencial. Z naraščanjem kota ϕ se povečuje obsežnost deformacijskega območja, zato se povečujejo tudi signali komponent rezalne sile, pri čemer so spremembe pri vzporednih komponentah manjše. Pri določitvi vpliva geometrije rezila na spremenljivost komponent rezalne sile je odrezovanje potekalo v smeri $90^\circ - 0^\circ$. Avtor navaja prsni kot za najvplivnejši geometrijski element rezila na vzporedno in normalno komponento rezalne sile. Z naraščajočim prsnim kotom rezila se vzporedna komponenta rezalne sile zmanjšuje, spremembe normalne komponente so manjše. Razlike med največjimi in najmanjšimi izmerjenimi komponentami rezalne sile so praktično neodvisne od prsnega kota rezila. Z naraščajočim prsnim kotom rezila se zmanjšuje tudi verjetnost najpogostejše amplitude komponente rezalne sile, pri čemer so verjetnosti za normalno komponento občutno višje. Pri določitvi vpliva debeline odrezka na spremenljivost komponent rezalne sile je odrezovanje potekalo v smeri $90^\circ - 35^\circ$. Z naraščajočo debelino odrezka se linearno povečujeta obe komponenti rezalne sile,

spremembe so večje pri vzporedni komponenti. Z naraščajočo debelino odrezka se povečuje tudi razlika med najmanjšimi in največjimi izmerjenimi amplitudami komponent rezalne sile. Verjetnost najpogostejše amplitude se z naraščajočo debelino odrezka zmanjšuje, kar je posledica obsežnejšega deformacijskega območja.

Kivimaa (1952) opisuje odvisnost med specifično rezalno silo lesnega tkiva in njegovo ravnovesno vlažnostjo. Eksperimenti so bili opravljeni na obdelovancih brezovine z gostoto $0,7 \text{ g/cm}^3$, pri dveh kotih odrezovanja ter pri geometrijskih parametrih rezila katerega prosti (α), ostrinski (β) in prsni (γ) koti so 10° , 45° in 35° .

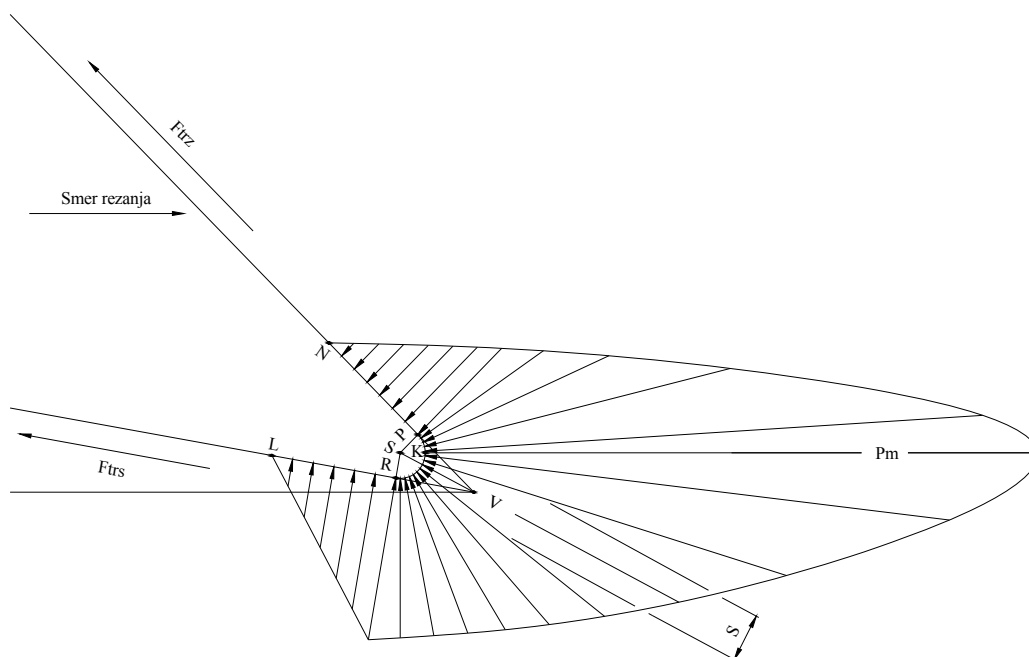


Slika 2.3 Specifična rezalna sila pri odrezavanju brezovine v odvisnosti od ravnovesne vlažnosti pri različnih kotih odrezovanja (Kivimaa, 1952, cit. po Bučar, 1996)

Hlebanja (1998) v članku opisuje teoretični model odrezovanja lesnega tkiva, ki zajema obremenitve delujoče na konico rezila in obdelovanec ter obremenitve, ki delujejo pri odrezovanju z otopelim rezilom. Model je nastal na podlagi razmisleka in je namenjen kot izhodišče za nove raziskave. Ker odrezovanje poteka na konici rezila, to dogajanje ni do podrobnosti pojasnjeno.

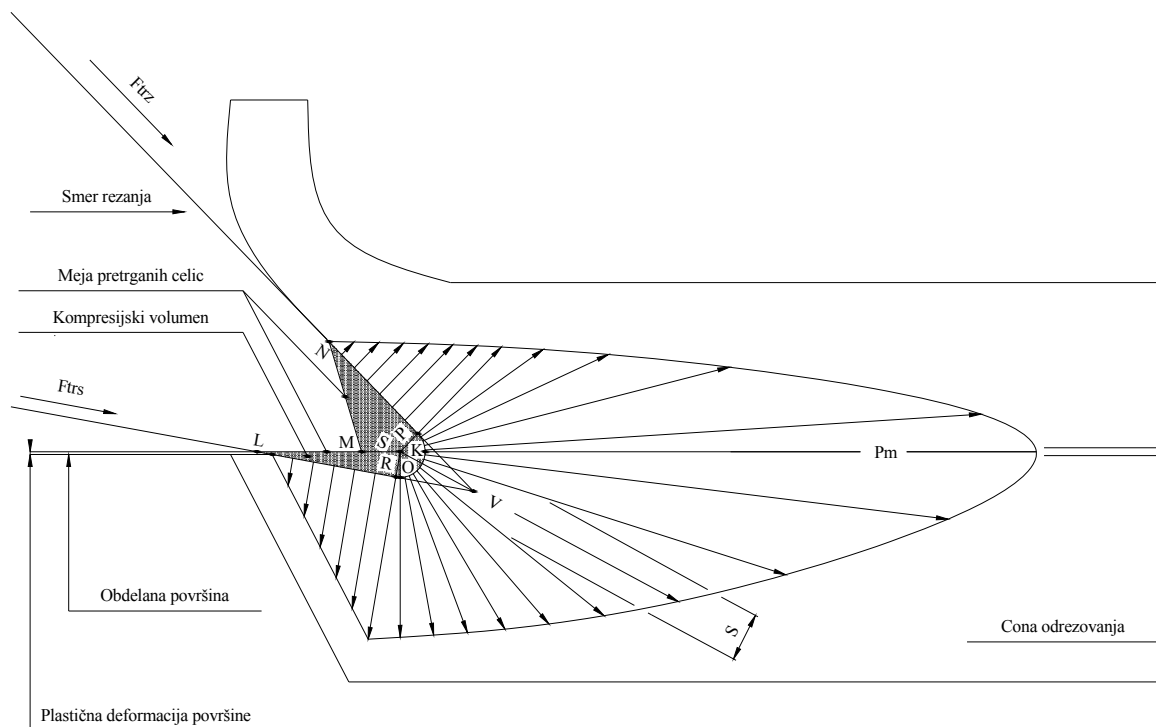
Na slikah 2.4, 2.5 in 2.6 je prikazano rezilo v obliki klina, s prostim kotom 10° in ostrinskim kotom 40° . Rob ostrine rezila ni natančno merljiv, zaokrožen je z radijem P , rezilo ima v območju zaokrožitve debelino S . Odrezovanje poteka tako, da se rezilo skozi

tkivo pomika v smeri rezanja s hitrostjo V . Ločevanje odrezka od obdelovanca poteka na sprednjem robu ostrine v točki K , ki je na črti skozi središče zaokrožitve S . Obdelana površina se na spodnjem robu rezila stisne približno za vrednost radia zaokrožitve P in se za vrednost elastične deformacije zopet zravna. Obdelana površina je zato nižja od ravnine odrezovanja za debelino plastične deformacije.



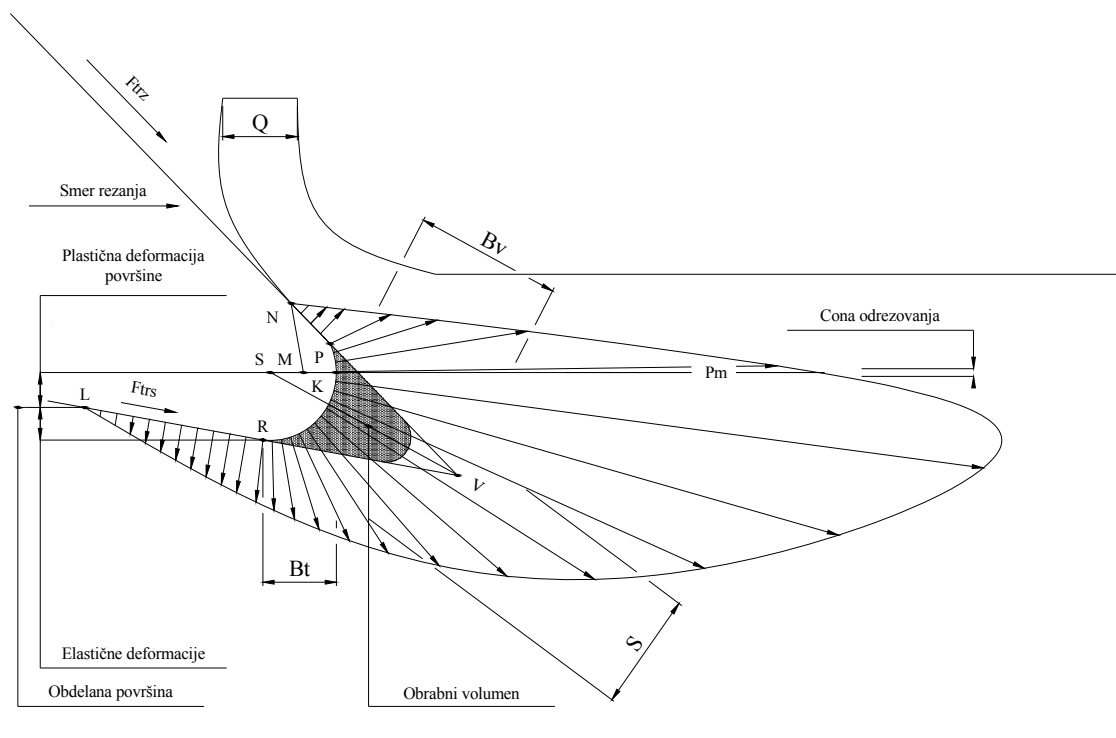
Slika 2.4 Obremenitve, ki delujejo na konico rezila (Hlebanja, 1998)

Tlak, ki deluje na površino rezila, deluje v vsaki točki enako velik. V točki K mora biti tlačna deformacija lesnega tkiva tako velika, da pride do porušitve lesnih vlaken. To ustreza tlačni porušitveni trdnosti lesnega tkiva P_m . Če odrezujemo v smeri lesnih vlaken, je njegova trdnost večja, stisljivost pa manjša. Če silo trenja med površino rezila in lesnim tkivom zanemarimo, potem deluje tlak pravokotno na površino rezila. Ker je les pravokotno na lesna vlakna bolj stisljiv, se bo tlak enakomerno zmanjševal od točke K proti zaokrožitvi v točki P in R ter do dotika lesnega tkiva z rezilom na obeh poševninah v točki N in L . Ker pa se rezilo pri odrezovanju giblje, se pojavita še sili trenja F_{trz} in F_{trs} , ki se spreminjata v toploto, zato se rezilo pri odrezovanju segreva.



Slika 2.5 Tlačne obremenitve, ki delujejo na obdelovanec (Hlebanja, 1998)

Vrzel obdelovanca, ki jo prikazuje slika 2.5, ima med odrezovanjem obliko konice noža. Zaradi delovanja tlačnih obremenitev je lesna masa ob površini noža stisnjena sorazmerno s tlakom. Če bi umaknili nož iz vrzeli, ter bi točki M in L ostali v isti legi kot pri rezanju in če bi se deformacije lesa popolnoma sprostile, bi vrzel dobila približno obliko kot jo prikazujejo točke LMN. Domnevana razdalja KM predstavlja porušitveno deformacijo v smeri odrezovanja, SO je prečna deformacija v pravem merilu. Prostornina lesnega tkiva, ki jo prikazuje kompresijski volumen med mejo pretrganih celic in obliko noža, se mora vtisniti v lesno tkivo, ki leži pred nožem. Tlak in globina vtisnjenega lesnega tkiva sta si soodvisna. Tlak v točki P je odvisen od debeline odrezka, ki se z njim povečuje sorazmerno. Tlak na spodnji strani v točki O je odvisen od ostrine rezila.



Slika 2.6 Obremenitve, ki nastajajo pri odrezovanju z otopelim rezilom (Hlebanja, 1998)

Rezilo se med odrezovanjem segreva, izgublja trdoto in se zaradi trenja obrablja. Otopelo rezilo prikazano na sliki 2.6 ima značilno obliko obrabljenega rezila, ki jo poznamo iz prakse. Tlak na robu topega rezila v točki K mora pri odrezovanju vedno dosegati porušitveno vrednost lesnega tkiva. Doseči mora enako vrednost kot pri ostrem rezilu. Enake, ne glede na debelino rezalnega robu, so tudi porušitvene deformacije na razdalji KM. Z večanjem rezilnega robu se povečujejo tlačne deformacije lesnega tkiva na spodnji strani rezila. Pri otopelem rezilu se povečuje debelina rezilnega robu S na razdalji Bt in Bv. Ko se poveča debelina rezilnega robu, se poveča dotikalna površina med rezilom in obdelovancem. Če pomnožimo dele površine s pripadajočo komponento tlaka v smeri rezanja, dobimo silo rezanja, ki se povečuje z otopelostjo rezila. Ker se na sprednjem robu rezila povečuje radij zaokrožitve, se povečuje tudi debelina cone odrezovanja, ta pa negativno vpliva na kakovost obdelane površine.

Obrabo konice rezila pri lesno obdelovalnih orodjih ne povzročajo samo sile, ampak k temu pripomore tudi korozija, katero opisujejo Gauvent in sod. (2007). Korozijo orodnega jekla povzročajo ekstraktivne snovi raztopljene v vezani in prosti vodi, ki se nahaja v lesnem tkivu. Pri eksperimentalnem delu so polirane elemente ogljikovih orodnih jekel ter različne stelite izpostavili vodi, ki je vsebovala ekstraktivne snovi hrasta z vrednostjo pH 4,5 za 24 ur, katerim so na 2 uri z elektronskim mikroskopom posneli spremembe površine. Steliti z nizko koncentracijo veziva kobalta, niklja in kroma (Co, Ni in Cr) so odpornejši proti koroziji od zlitin z visoko koncentracijo veziva. Krom tudi pri ogljikovih jeklih zmanjšuje odpornost proti koroziji, naraščajoča koncentracija niklja v zlitini pa jo povečuje. Najmočnejši razkroj pri orodnih jeklih se pojavi v bližini spojin karbida, kar

lokalno močno oslabi mehanske lastnosti zlitine, zato v kombinaciji z abrazijo lahko pride do popolne degradacije materiala.

2.1 GEOMETRIJA ODREZKA IN KOMPONENT REZALNE SILE

Odrezek je posledica relativnega gibanja med orodjem in obdelovancem, katerega obliko določata tira dveh zaporednih rezil, ki sta v smeri podajanja medsebojno oddaljeni za parameter podajanja na rezilo (e_z) (Bučar, 1996).

$$e_z = \frac{u}{n \times z} \quad \dots(4)$$

Debelina odrezka je pri določenem zasučnem kotu φ razdalja med nastajajočo ravnino in ravnino predhodnega reza, merjeno v smeri radija proti trenutnemu središču orodja (Rosenblit, 1945, cit. po Bučar, 1996).

Srednja debelina odrezka

$$h_m = \frac{1}{\hat{\varphi}_i - \hat{\varphi}_v} \times e_z (\cos(\varphi_v) - \cos(\varphi_i)) \quad \dots(5)$$

Glavna rezalna sila na konici rezila

$$F_m = h_m \times b \times f_s \quad \dots(6)$$

Specifična rezalna sila oziroma rezalni upor je kvocient, ki pove kolikšna normalna sila je potrebna za porušitev orientiranega lesnega tkiva, oziroma za tvorjenje odrezka določene presečne površine (Bučar, 1996).

V procesu krožnega odrezovanja, kjer sta smer odrezovanja in debelina odrezka odvisni od zasučnega kota, lahko izrazimo specifično rezalno silo pri določenem zasučnem kotu φ (Bučar, 1996).

$$f_{s(\varphi, h)} = \frac{F_{t, \varphi}}{b \times h_\varphi} \quad \dots(7)$$

Število rezil, ki je v obdelovanem materialu

$$z_{ef} = \frac{(\varphi_i - \varphi_v) \times z}{360^\circ} \quad \dots(8)$$

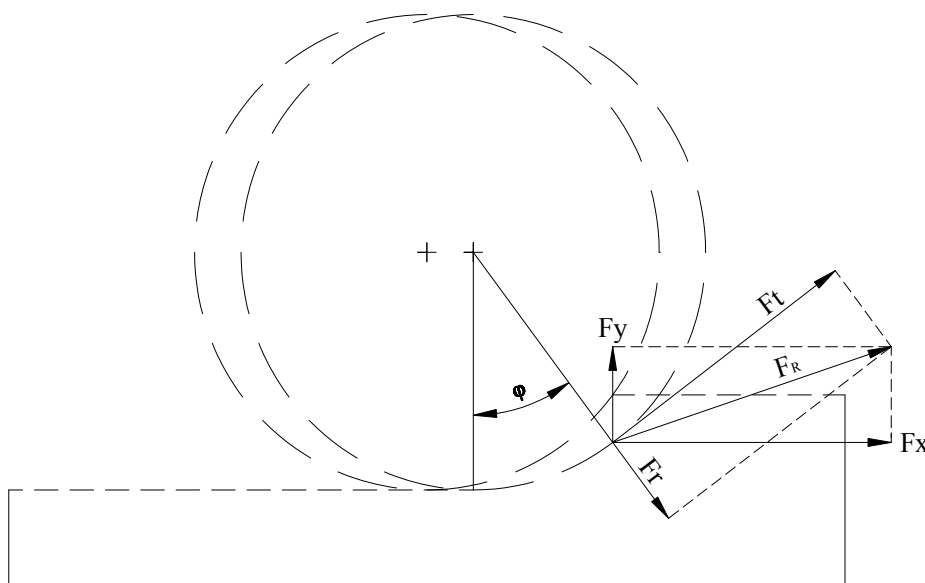
Glavna rezalna sila

$$F_R = F_m \times z_{ef} \quad \dots(9)$$

Vzporedna (F_x) in normalna (F_y) komponenta rezalne sile (F_R) sta prikazani na sliki 2.7. Pri poteku izračuna specifične rezalne sile smo zanemarili radialno (F_r) komponento rezalne sile, ter predpostavili, da sta si tangencialna (F_t) komponenta rezalne sile in rezalna sila (F_R) enaki.

Glavna rezalna sila

$$F_R = \sqrt{(F_y^2 \times F_x^2)} \quad \dots(10)$$



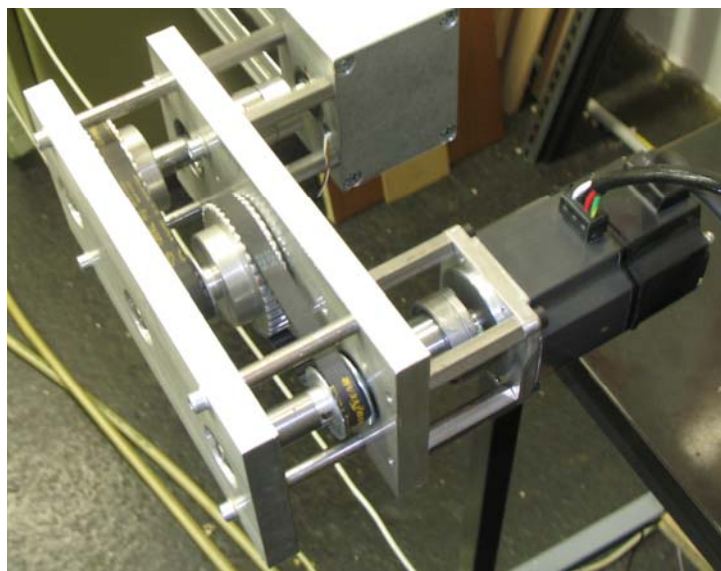
Slika 2.7 Komponente rezalne sile F_R (Bučar, 1996)

3 MATERIALI IN METODE

Eksperimentalni del naloge smo opravili na rezkalnem stroju SCM T 130. Na osnovno konstrukcijo stroja smo pritrdili eksperimentalni sistem, ki je bil zasnovan tako, da omogoča vpenjanje obdelovanca ter nadzorovan pomik le tega, hkrati pa omogoča merjenje komponenti rezalne sile.

3.1 PODAJALNI SISTEM

Podajalni sistem, pritrjen na konstrukcijo mize je sestavljen iz linearnega modula LEZ 4, povezan je z vpenjalnim sistemom obdelovanca, ki vsebuje tri dinamometre. Vpenjalni sistem je pritrjen na pomična podporna vozička s kotalnimi elementi, ki omogočajo preme pomike po vodilni letvi. Na linearni modul smo namestili reduktor s prestavnim razmerjem 6,25 (slika 3.1) s pogonskim AC servo motorjem HC-MFS. Za regulacijo vrtljajev motorja smo izbrali AC servo regulator MEL – J2S – 20 A. Dodali smo mu še tri induktivna stikala IA 12 ASC 05 AK-K, katerih funkcije so vpisane pod naslovom 3.2.1.



Slika 3.1 Dvostopenjski reduktor

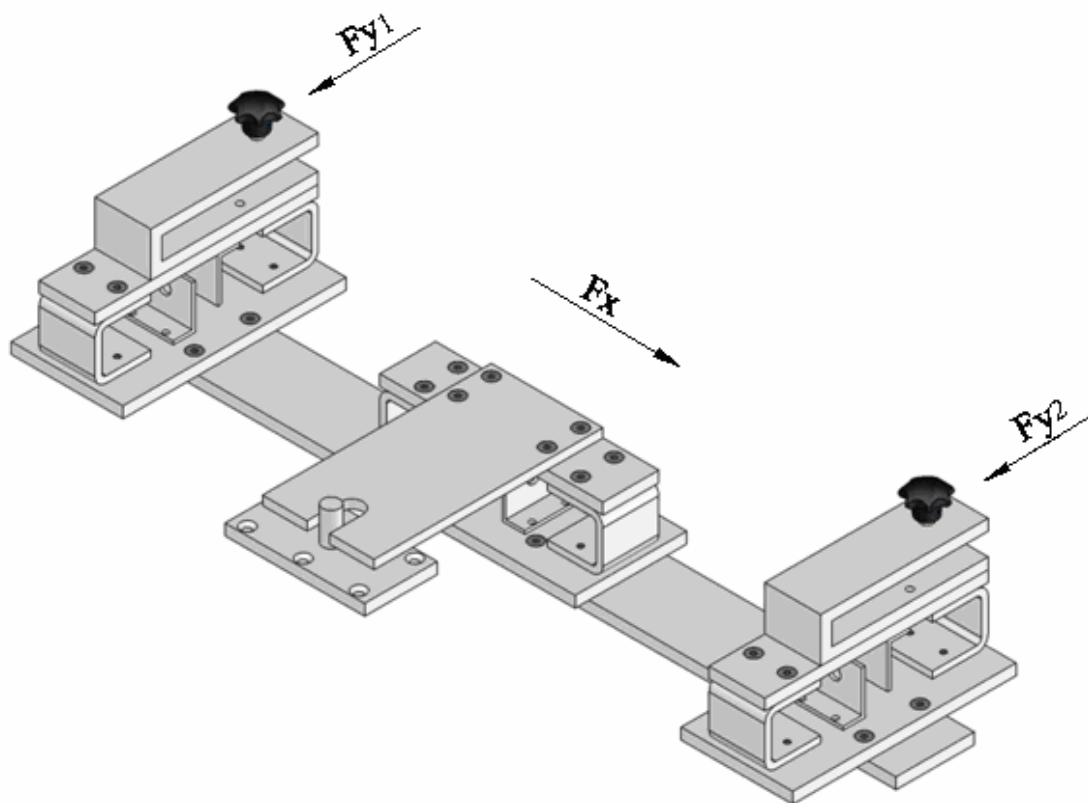
Za doseganje konstantne podajalne hitrosti smo na izbranem AC servo regulatorju nastavili opcijo samo-nastavitve (auto-tuning), s katero regulator sam nastavi vrednosti relevantnih parametrov in tako vzdržuje konstanten moment glede na obremenitve, ki jih mora premagovati. Specifikacije enote, ki jo sestavljata AC servo regulator MR – J2S – 20 A in AC servo motor HC – MFS 23, so navedene v preglednici 1.

Preglednica 1 Specifikacije AC servo regulator MR – J2S – 20 A in AC servo motor HC – MFS 23 (Mitsubishi Electric)

AC servo regulator MR – J2S – 20 A, AC servo motor HC – MFS 23	
Konstantni moment [Nm]	0,64
Maksimalen moment [Nm]	1,9
Izhodna moč [W]	200
Vztrajnostni moment rotorja [kgcm^2]	0,088

3.2 VPENJALNI SISTEM Z DINAMOMETRI

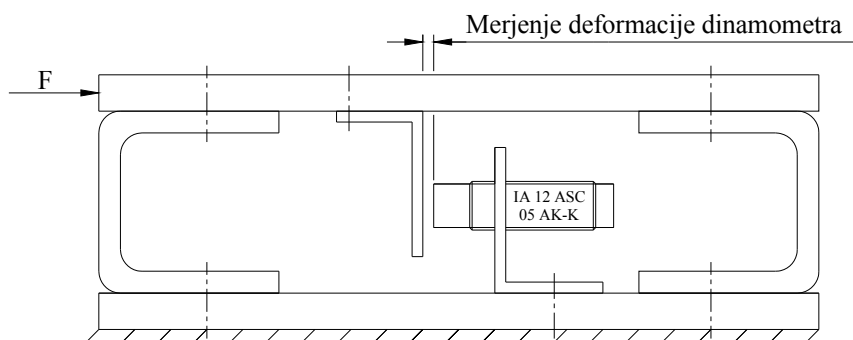
Najpomembnejši del našega merilnega sistema so dinamometri, ki so del vpenjalnega sistema prikazanega, na sliki 3.2. Da konstrukcija dinamometra omogoča natančne meritve, moramo zagotoviti primerno togo – robustno konstrukcijo, ki vpliva na dinamične značilnosti dinamometra in njegovo odzivnost v primeru časovno spremenljivih obremenitev. Zagotoviti moramo, da so merjene komponente rezalne sile medsebojno neodvisne. Celoten načrt vpenjalnega sistema z dinamometri je prikazan v prilogi D4.



Slika 3.2 Vpenjalni sistem z dinamometri

3.2.1 Induktivni senzorji

Deformacijo dinamometrov smo merili z induktivnimi senzorji (IA 12 ASC 05 AK-K). Dinamometra F_{y1} in F_{y2} merita normalno, dinamometer F_x pa vzporedno komponento rezalne sile. Induktivnim senzorjem se med eksperimentom na izhodu pojavijo električni potenciali, ki so sorazmerni oddaljenosti feromagnetnih tarč te so posledica obremenitev, kar je prikazano na sliki 3.3. Da smo eksperimentalni sistem lahko v celoti nadzorovali, smo v sistemu uporabili še tri induktivna stikala. Z dvema smo nadzorovali zaustavitev merilno podajalnega sistema z obdelovancem, tretjega pa smo uporabili kot prožilno stikalo za aktiviranje merilnega sistema. Merilni sistem je deloval v LabVIEW programskem okolju. Na sliki 3.3 je prikazano merjenje deformacije dinamometra z induktivnim senzorjem. Induktivni senzor IA 12 ASC 05 AK-K je prikazan na sliki 3.4, njegovi tehnični podatki pa v preglednici 2.



Slika 3.3 Merjenje deformacije dinamometra



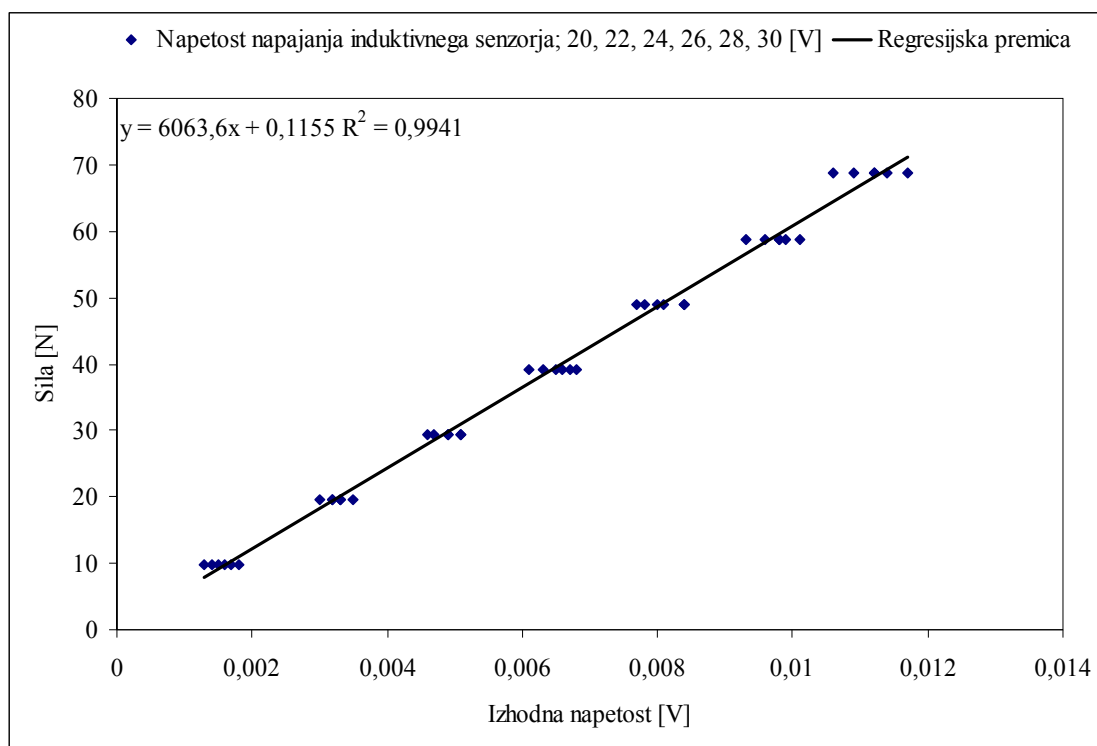
Slika 3.4 Induktivni senzor IA 12 ASC 05 AK-K (Carlo Gavazzi)

Preglednica 2 Tehnični podatki induktivnega senzorja IA 12 ASC 05 AK-K (Carlo Gavazzi)

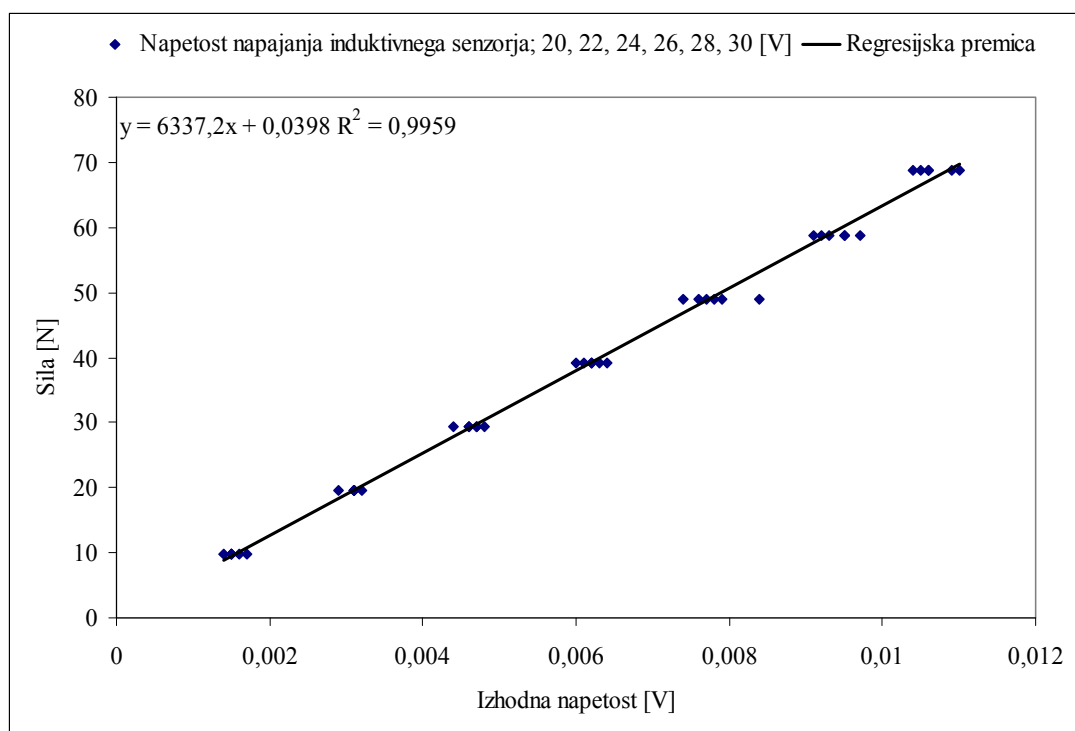
Induktivni senzor IA 12 ASC 05 AK-K	
Napetost napajanja [V DC]	17 – 30
Izhodna napetost [V]	0 – 10
Maksimalen tok lastne rabe [mA]	< 22
Maksimalna upornost bremena [Ω]	> 300
Območje delovanja [mm]	0,3 – 5
Linearna napaka [%]	< 3
Temperaturno odstopanje [%]	< 5
Temperatura okolice [$^{\circ}\text{C}$]	0 - 70

3.2.2 Statično umerjanje dinamometrov

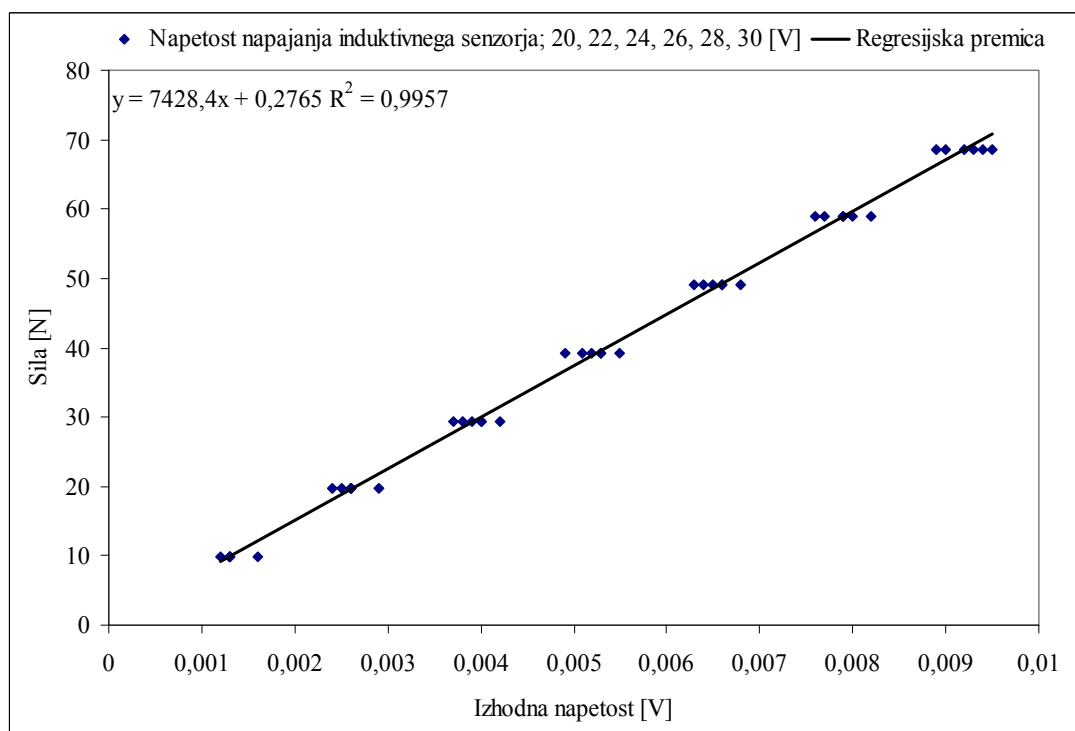
Statično umerjanje dinamometrov smo izvedli z utežmi znane mase pri različnih napetostih napajanja induktivnega senzorja, za vse tri dinamometre vpenjalnega sistema posebej. Za F_{y1} in F_{y2} (slika 3.5 in 3.6), ki merita normalno komponento ter za F_x (slika 3.7), ki meri vzporedno komponento rezalne sile. Konstante dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x so 12901,4 N/mm, 13483,4 N/mm in 15805,4 N/mm.



Slika 3.5 Zveza med vzbujevalno silo in izhodno napetostjo induktivnega senzorja IA 12 ASC 05 AK-K, pri različnih napetostih napajanja, ki velja za dinamometer F_{y1}



Slika 3.6 Zveza med vzbujevalno silo in izhodno napetostjo induktivnega senzorja IA 12 ASC 05 AK-K, pri različnih napetostih napajanja, ki velja za dinamometer F_{y2}



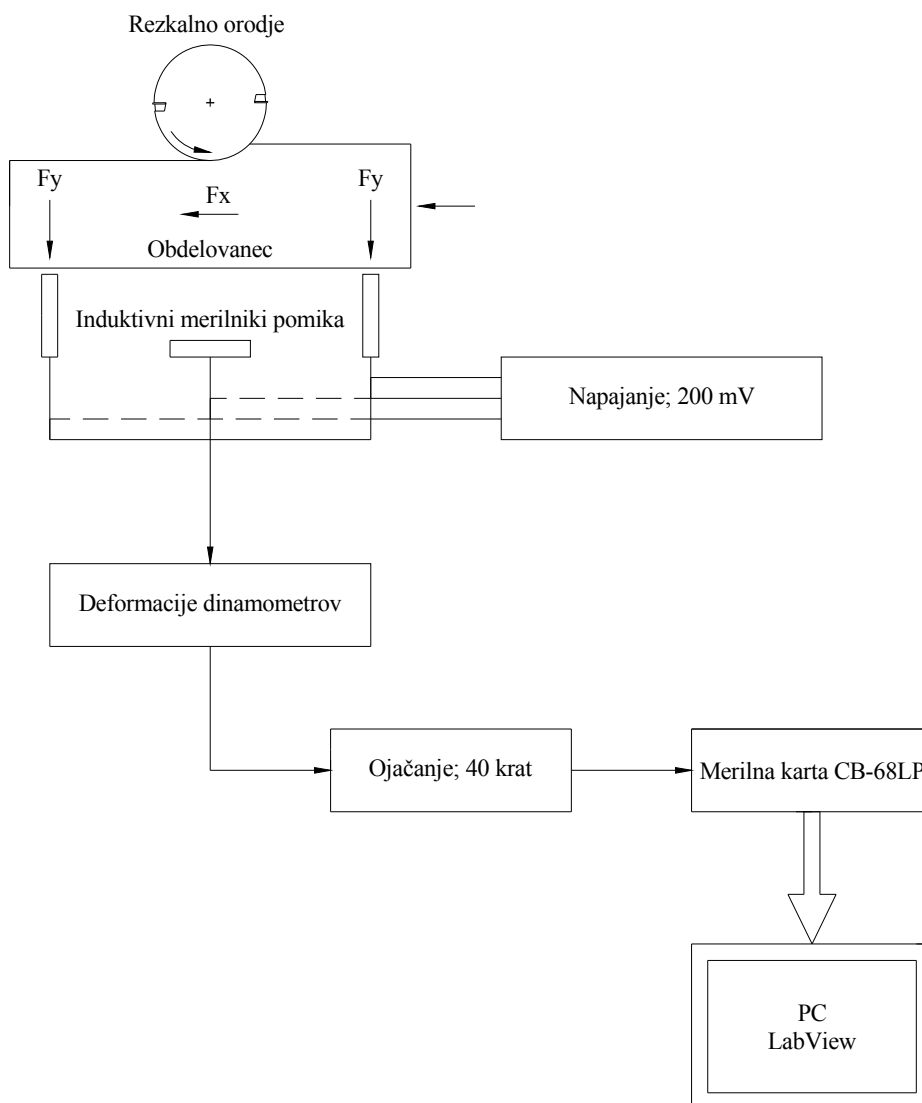
Slika 3.7 Zveza med vzbujevalno silo in izhodno napetostjo induktivnega senzorja IA 12 ASC 05 AK-K, pri različnih napetostih napajanja, ki velja za dinamometer F_x

3.2.3 Zajemanje meritev

Induktivne senzorje smo napajali z napetostjo 200 mV. Tem se med eksperimentom na izhodu pojavijo električni potenciali, ki so sorazmerni obremenitvam. Te signale smo nato ločeno ojačali za 40 krat in jih preko merilne karte CB-68LP prenesli v LabVIEW programsko okolje, kar je prikazano na sliki 3.8.

Deformacije dinamometrov smo izračunali tako, da smo izmerjeni odziv dinamometra pomnožili s konstanto induktivnega senzorja 0,47 mm/V (preglednica 2) ter delili s faktorjem ojačanja 40.

Izmerjene deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x so prikazane v prilogah od A1 do C4.



Slika 3.8 Shematski prikaz eksperimentalnega sistema

3.3 REZKALNO ORODJE

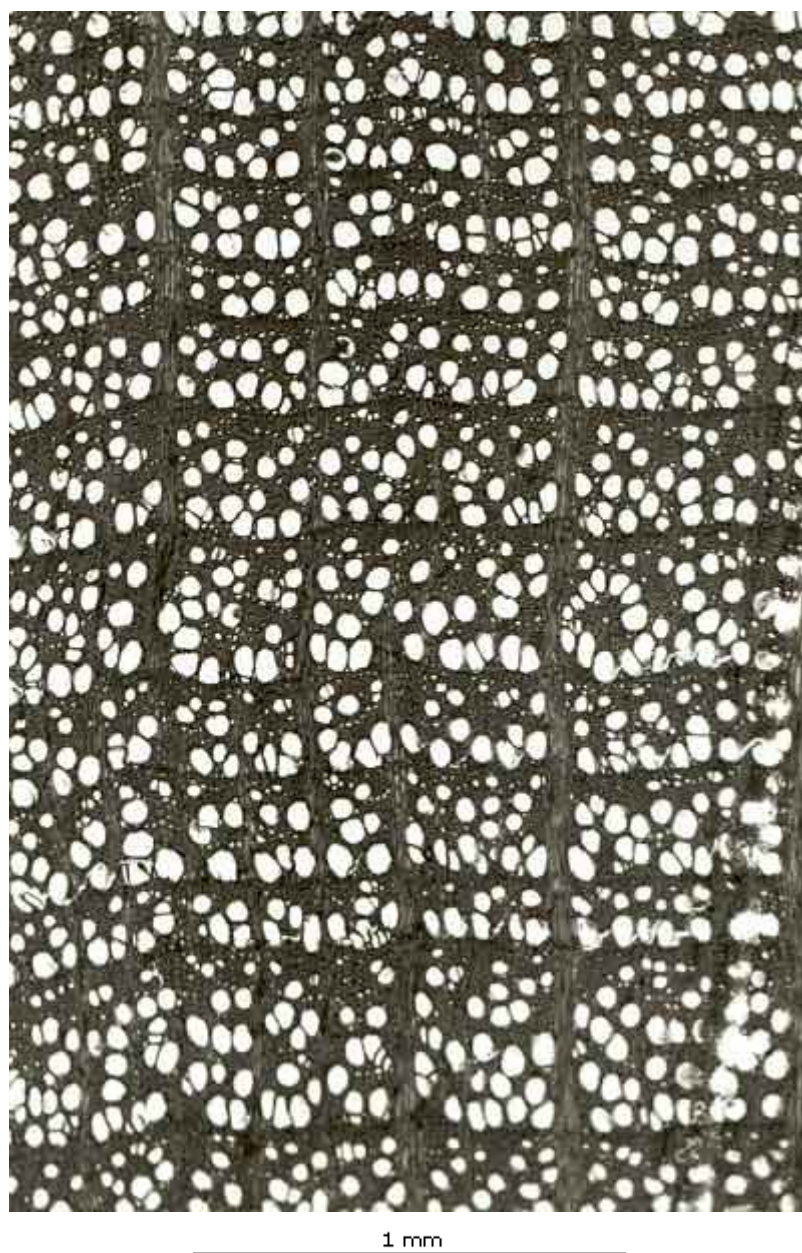
Za odrezavanje smo uporabili rezkalno orodje za obdelavo robov proizvajalca Leitz, premera 125 mm, pri vrtilni hitrosti 6870 vrt/min. Prosti kot rezila (α) meri 15° , ostrinski kot (β) 63° , prsni kot pa (γ) 12° . Rezkalno orodje je prikazano na sliki 3.9.



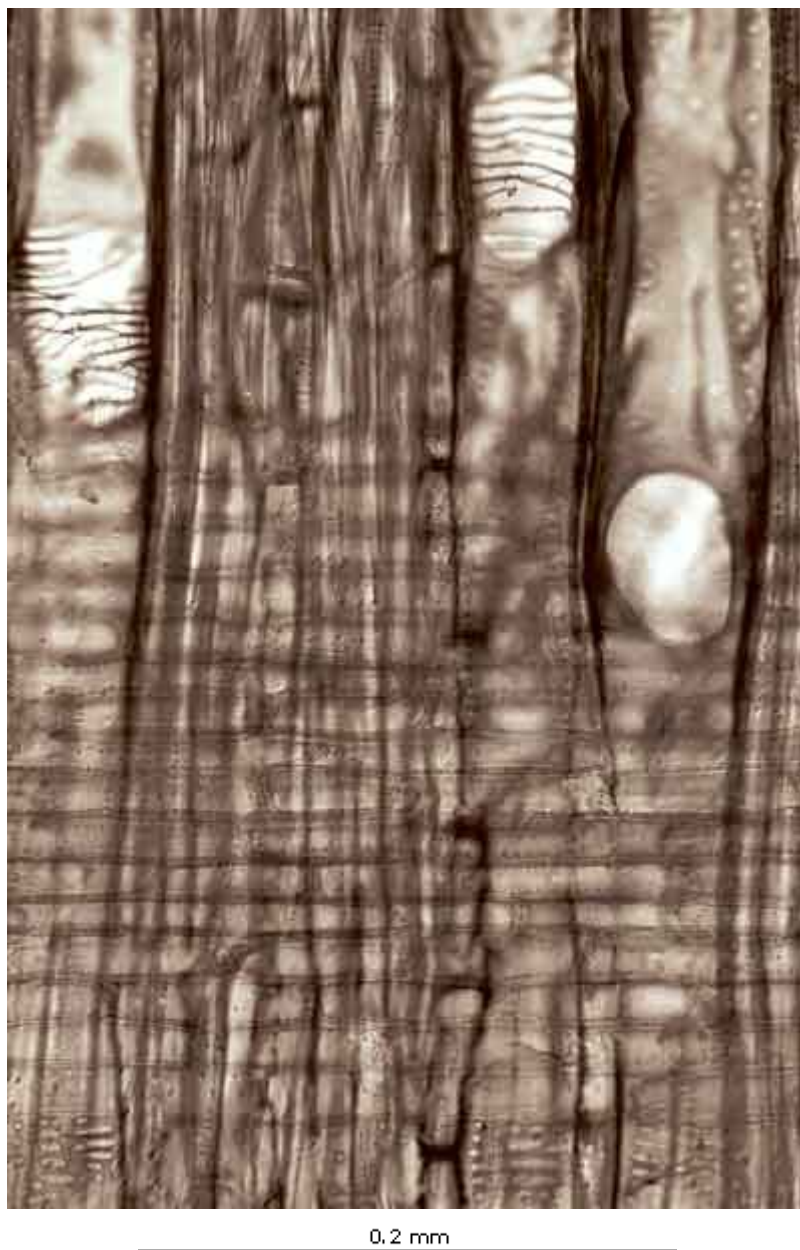
Slika 3.9 Rezkalno orodje (Leitz)

3.4 PRIPRAVA TESTNEGA MATERIALA

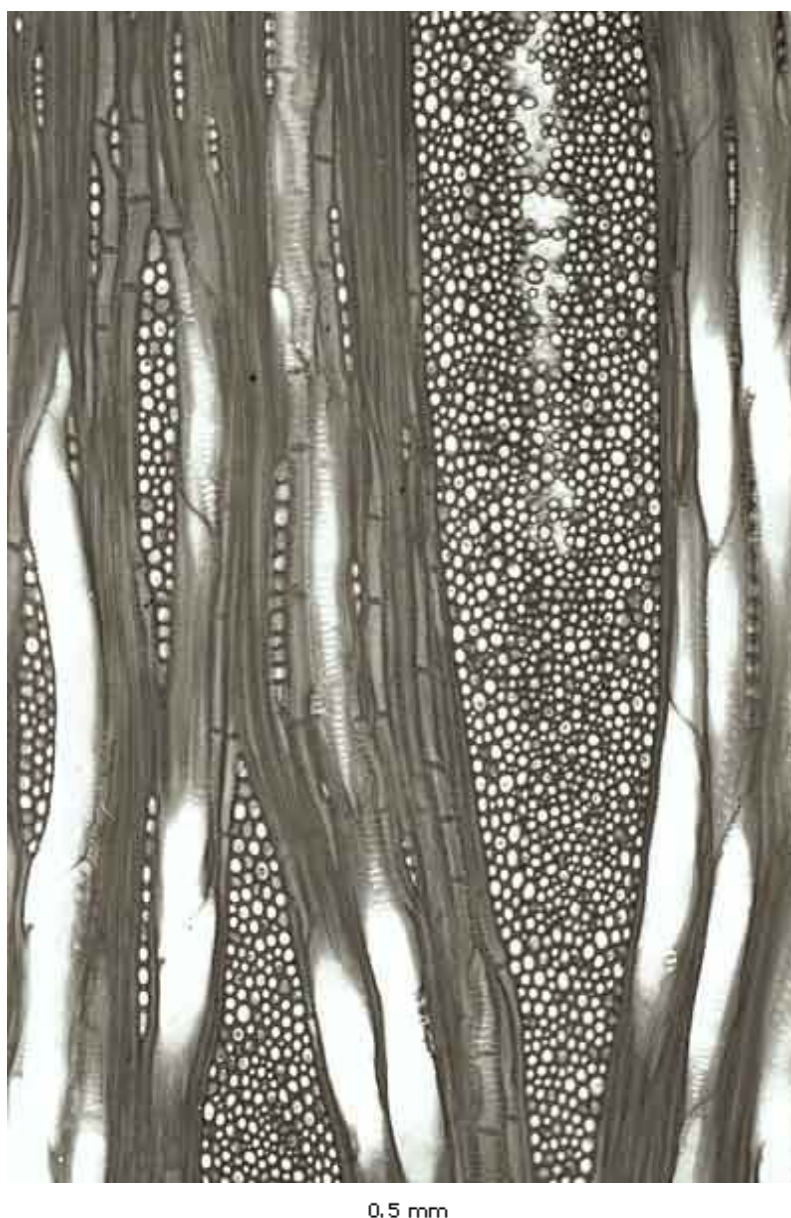
Za eksperimente smo izbrali bukovino (*Fagus Silvatica*), ki je naš najbolj razširjen in pomemben listavec. Njena anatomska zgradba je prikazana na slikah 3.10, 3.11 in 3.12. Glavne lastnosti lesnega tkiva bukovine so našteje v preglednici 3. Preizkušanci dolžine 750 mm in debeline 19 mm so bili izdelani iz radialnih desk ter niso vsebovali vizualnih anomalij, uravnovešeni so bili pri treh različnih vlažnostih. Pričakovane ravnovesne vlažnosti preizkušancev so prikazane v preglednici 4, dejanske pa v preglednici 5.



Slika 3.10 Anatomska zgradba bukovine (*Fagus silvatica*) v prečnem prerezu (Schweingruber in sod., 2006)



Slika 3.11 Anatomska zgradba bukovine (*Fagus Silvatica*) v radialnem prerezu (Schweingruber in sod., 2006)



Slika 3.12 Anatomska zgradba bukovine (*Fagus Silvatica*) v tangencialnem prerezu (Schweingruber in sod., 2006)

Preglednica 3 Lastnosti lesnega tkiva bukovine (*Fagus Silvatica*) (Čufar, 2001)

<i>Fagus Silvatica</i>	
Gostota v absolutnem suhem stanju [kg/m^3] ...	490 ... 680 ... 880
E-modul; upogibni, vzporedno s potekom aksialnih elementov [N/mm^2] ...	16000
Tlačna trdnost; vzporedno s potekom aksialnih elementov [N/mm^2] ...	53
Natezna trdnost; vzporedno s potekom aksialnih elementov [N/mm^2] ...	135
Upogibna trdnost; vzporedno s potekom aksialnih elementov [N/mm^2] ...	105
Strižna trdnost; vzporedno s potekom aksialnih elementov [N/mm^2] ...	8
Srednje vrednosti E-modula in trdnosti veljajo za vzorce brez napak z vlažnostjo 12%	

Preglednica 4 Pričakovana ravnovesna vlažnost preizkušancev

Nasičena raztopina soli	Ravnovesna vlažnost lesa [%]
Kalijev karbonat ($K_2 CO_3 \times 2H_2O$)	8,2
Natrijev nitrat ($Na NO_2$)	12
Cinkov sulfat ($Zn SO_4 \times 7H_2O$)	18

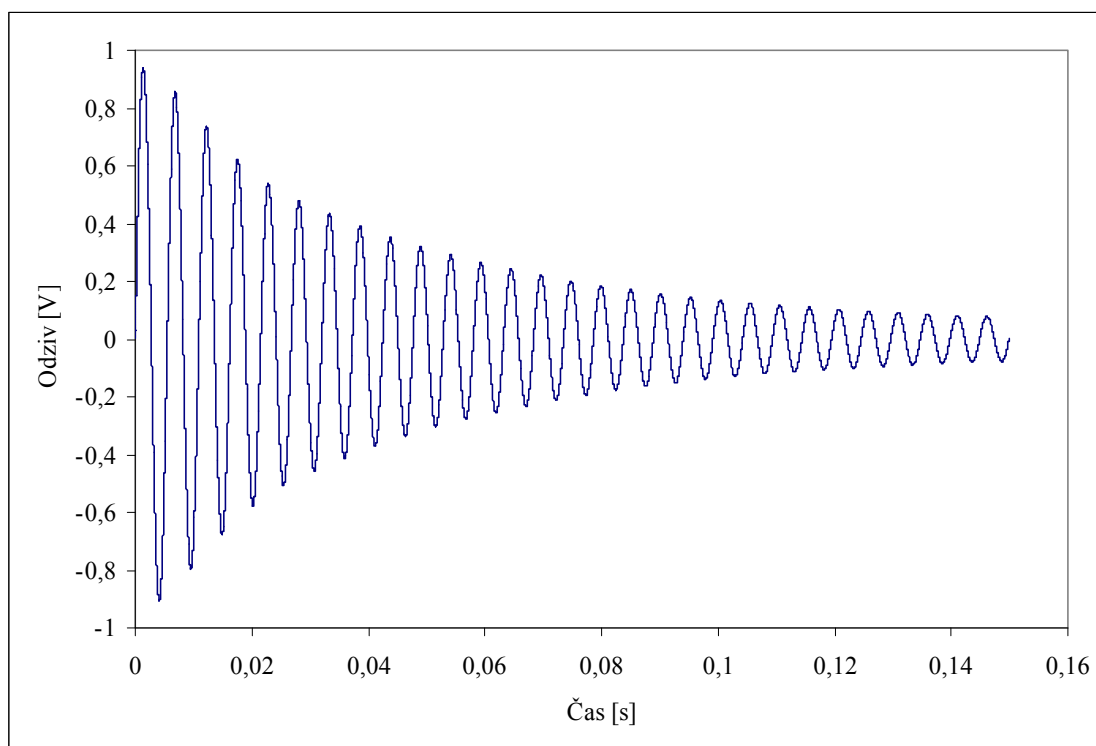
Preglednica 5 Dejanska ravnovesna vlažnost preizkušancev

	$K_2 CO_3 \times 2H_2O$	$Na NO_2$	$Zn SO_4 \times 7H_2O$
Ravnovesna vlažnost lesa [%]	8,35	12,32	17,23
	7,94	11,54	17,69
	8,49	12,87	16,49
	7,73	11,91	16,82
	8,49	12,69	17,88

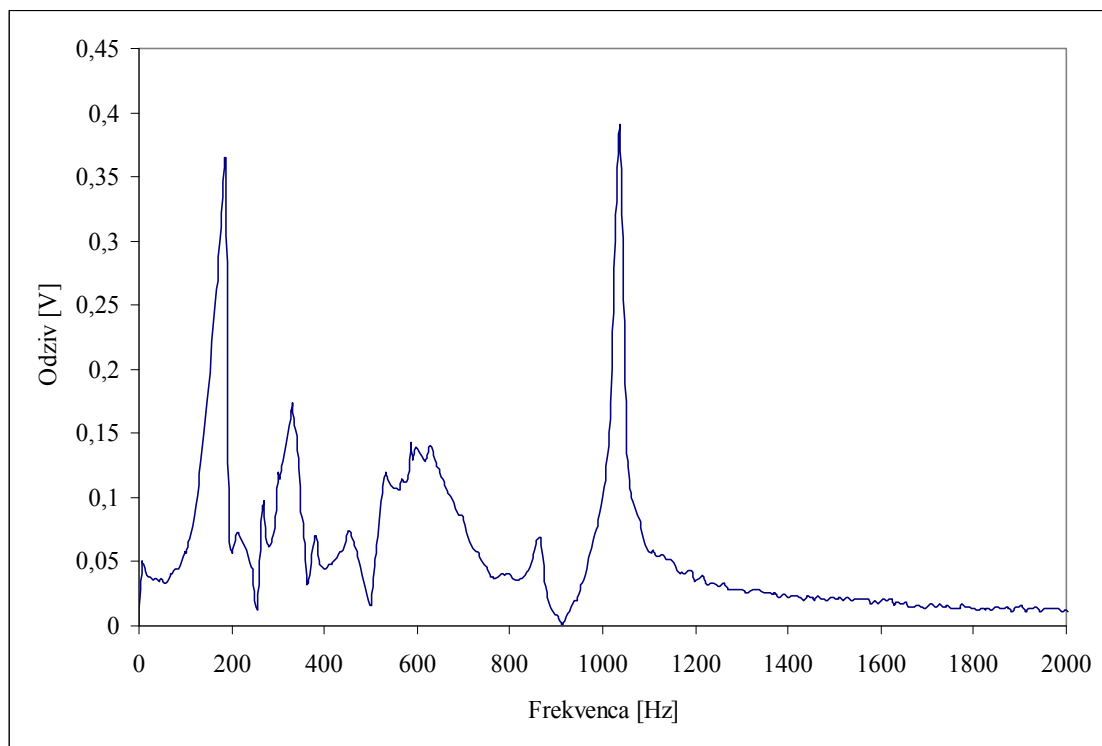
4 REZULTATI MERITEV

4.1 LASTNE FREKVENCE DINAMOMETROV

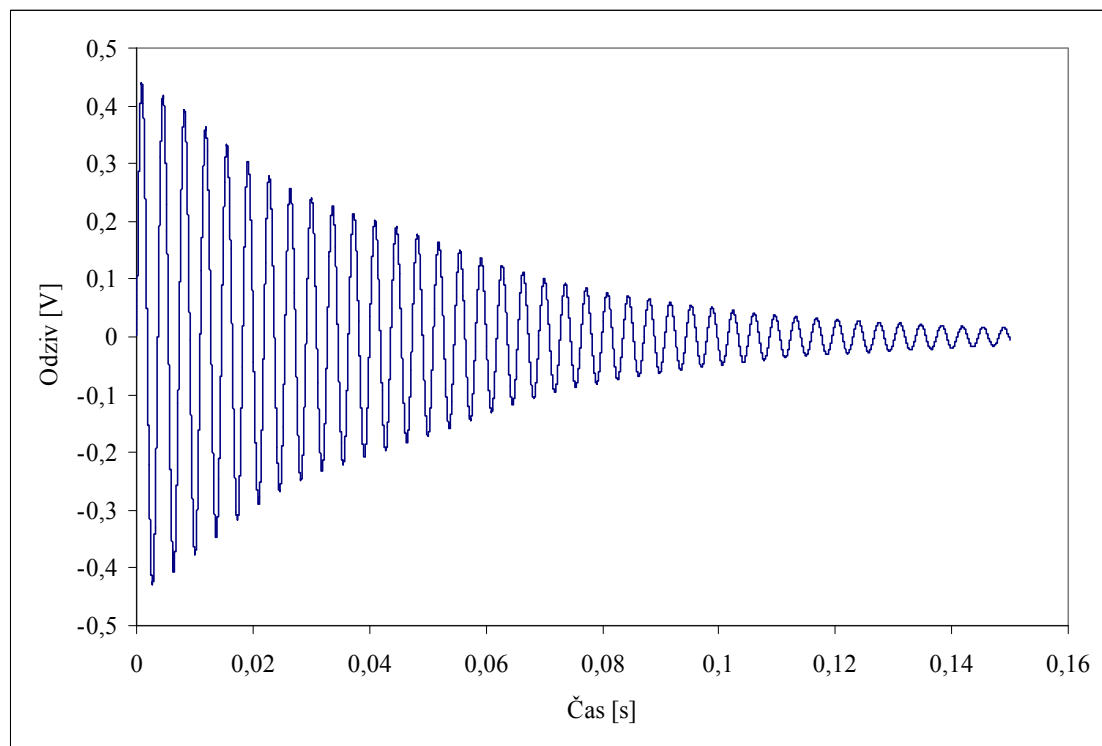
V tem poglavju so prikazani odzivi pulzno vzbujanih dinamometrov, njihove frekvenčne sestave ter frekvenčna sestava signala komponente rezalne sile izmerjene na enem od dinamometrov. Dinamometra F_{y1} in F_{y2} imata enako lastno frekvenco $194,7 \text{ Hz}$ in faktor dušenja $0,0111$, pri dinamometru F_x je lastna frekvenca 277 Hz , faktor dušenja pa $0,0132$. Sliki 4.1 in 4.3 prikazujeta odziva dinamometra F_{y1} in F_x na sliki 4.2 in 4.4 pa so prikazane njima pripadajoče frekvenčne sestave. Slika 4.4 prikazuje frekvenčni spekter rezalne sile pri procesu ortogonalnega krožnega odrezovanja lesnega tkiva oziroma frekvenco odrezovanja.



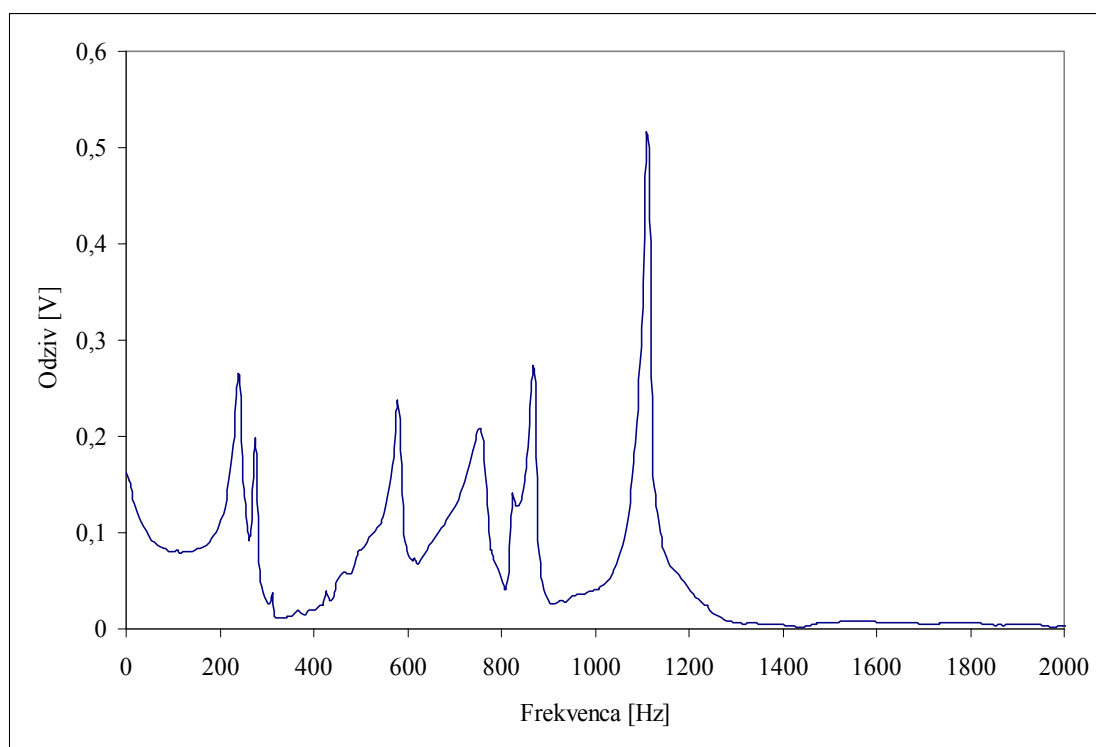
Slika 4.1 Odziv dinamometra F_{y1}



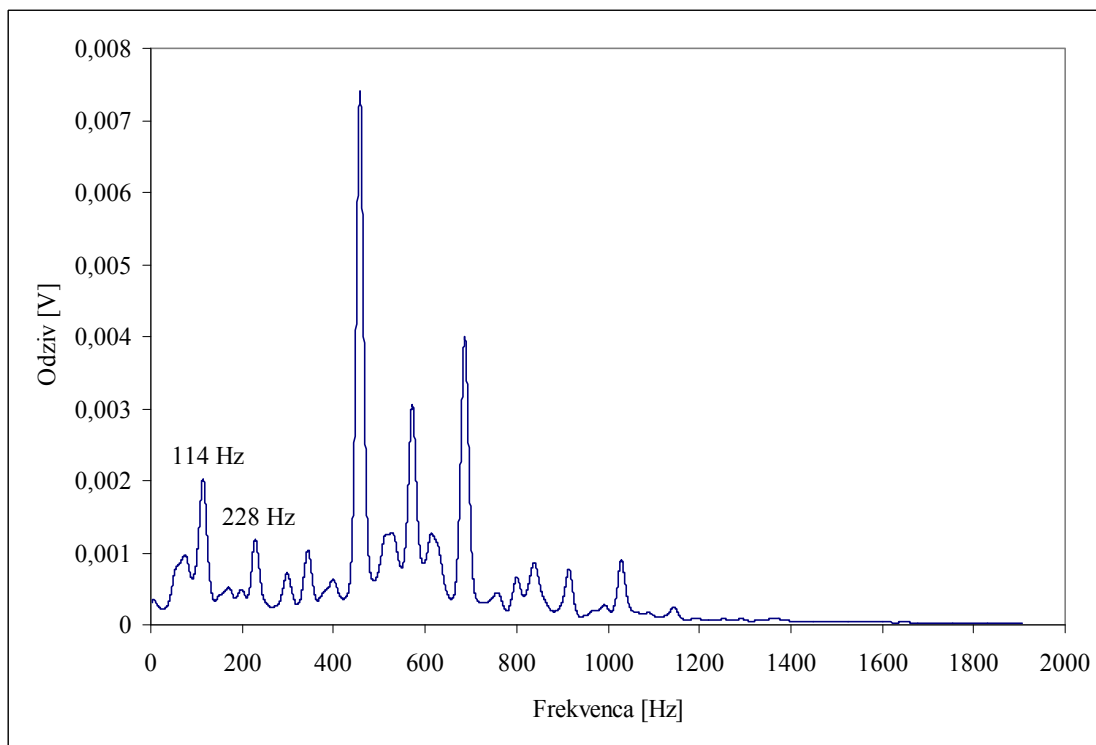
Slika 4.2 Frekvenčna sestava odziva dinamometra F_{y1}



Slika 4.3 Odziv dinamometra F_x



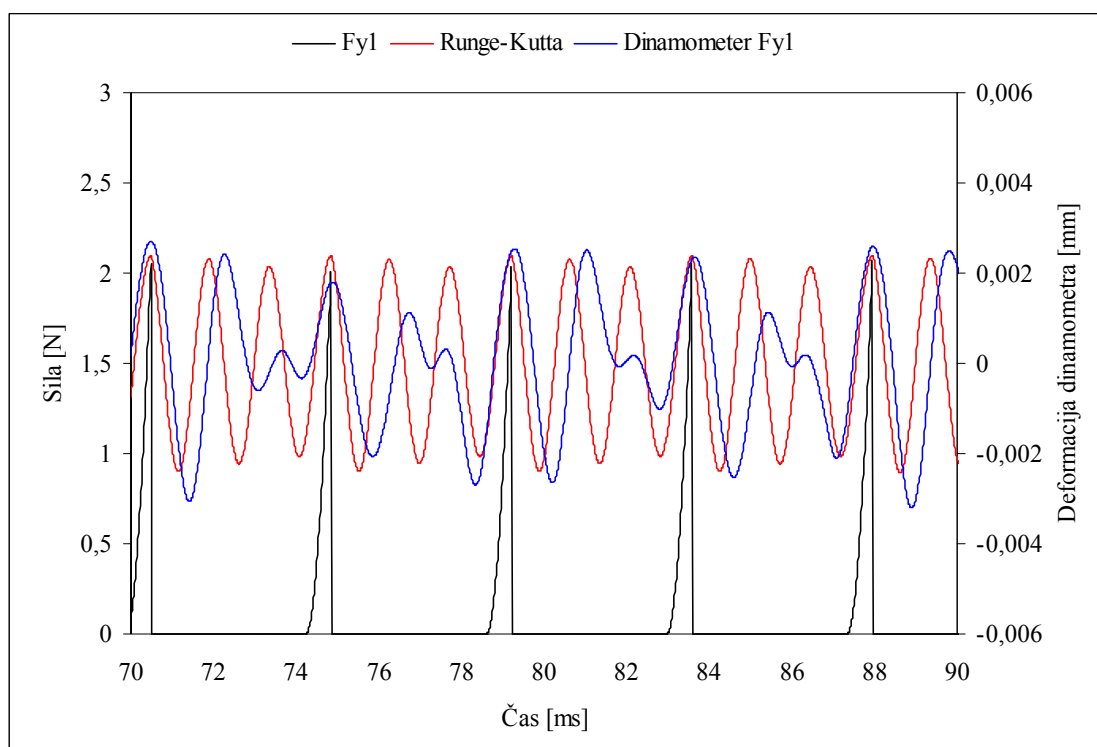
Slika 4.4 Frekvenčna sestava odziva dinamometra F_x



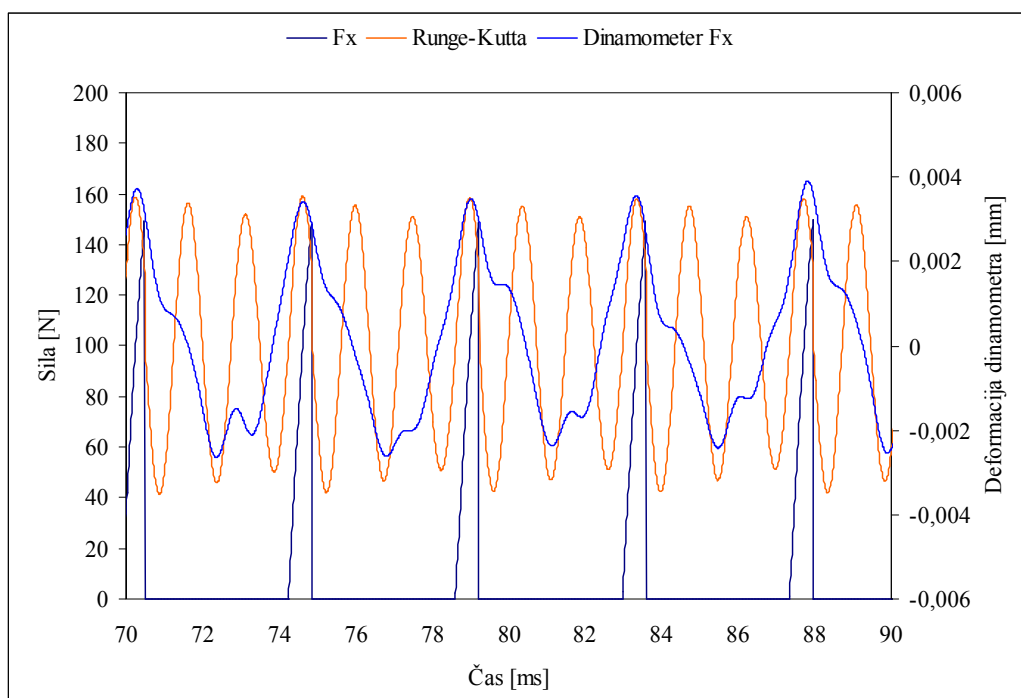
Slika 4.5 Frekvenčna sestava signala dinamometra F_{y1} med odrezovanjem

4.2 REZALNE SILE

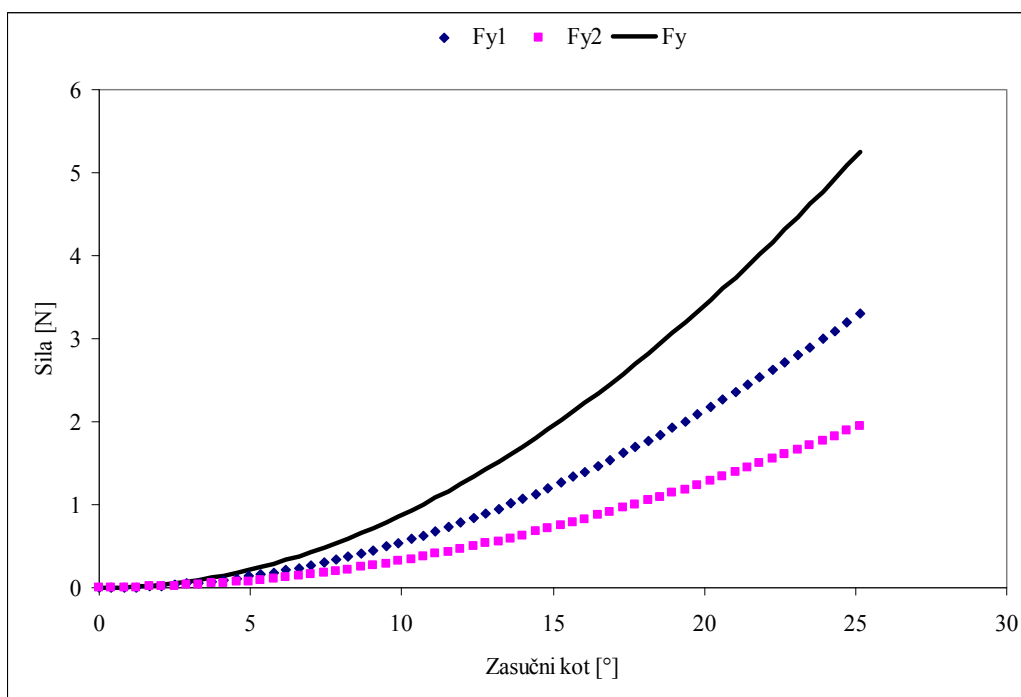
V tem poglavju je prikazano določevanje rezalnih sil iz izmerjenih deformacij dinamometrov. Rezalne sile smo določili na osnovi primerjave izmerjenih in hipotetičnih modeliranih odzivov dinamometrov. Za omenjeno metodo smo se odločili zaradi dokaj neugodnega razmerja med lastnimi frekvencami dinamometrov in frekvenco odrezavanja. Za modeliranje odziva posameznega dinamometra smo uporabili numerično metodo Runge-Kutta, pri čemer smo v dinamičnem modelu dinamometrov upoštevali realne, izmerjene relevantne parametre. Rezalne sile smo določili z metodo prilagajanja vzbujevalne sile v dinamičnem modelu. Samo prilagajanje je potekalo toliko časa, da je bila razlika med modeliranim in izmerjenim odzivom sprejemljiva. Sliki 4.6 in 4.7 prikazujeta izmerjeno deformacijo dinamometra F_{y1} in F_x ter hipotetično deformacijo dinamometra, ki jo povzročata normalna in vzporedna komponenta rezalne sile. Na sliki 4.8 je prikazano seštevanje normalne komponente rezalne sile izmerjene na dinamometrih F_{y1} in F_{y2} . Sliki 4.9 in 4.10 prikazujeta povprečje 15 meritev normalne in vzporedne komponente rezalne sile. Slika 4.11 prikazuje rezalno silo izračunano po enačbi 10 ter njeno vzporedno in normalno komponento. Rezalni parametri navedenih meritev so: ravnovesna vlažnost lesa 18 %, podajalna hitrost obdelovanca 10 m/min in globina odrezovanja 6 mm.



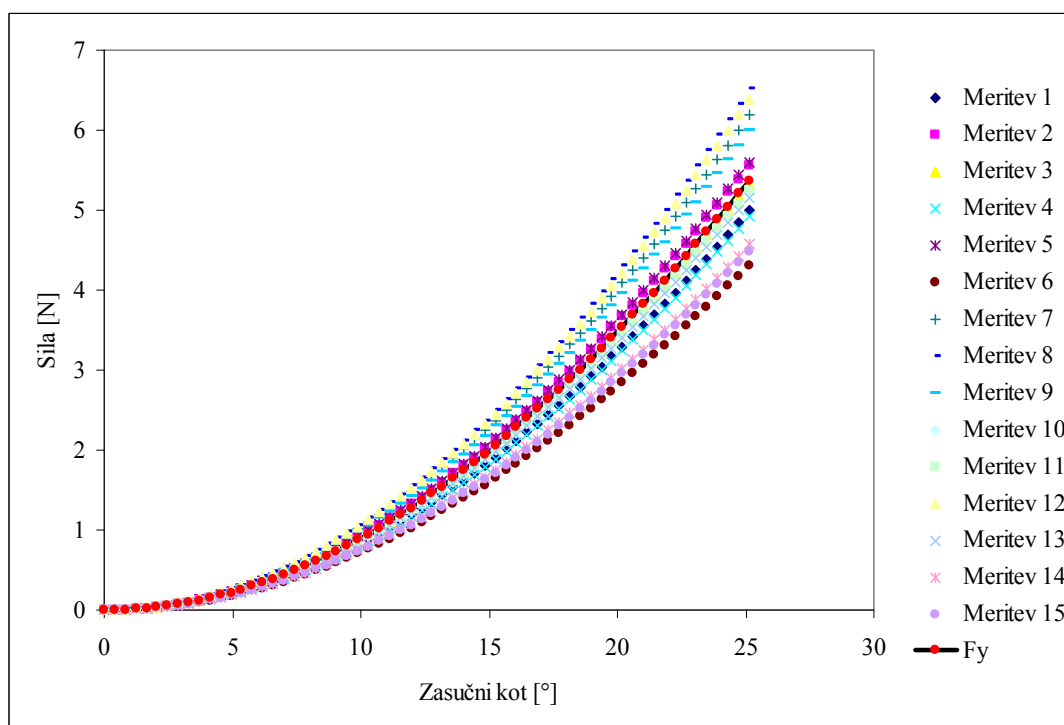
Slika 4.6 Izmerjena deformacija na dinamometru F_{y1} pri ravnovesni vlažnosti bukovine 18 %, globini odrezovanja 6 mm in podajalni hitrosti 10 m/min ter hipotetična deformacija, ki jo povzroča normalna komponenta rezalne sile (F_{y1})



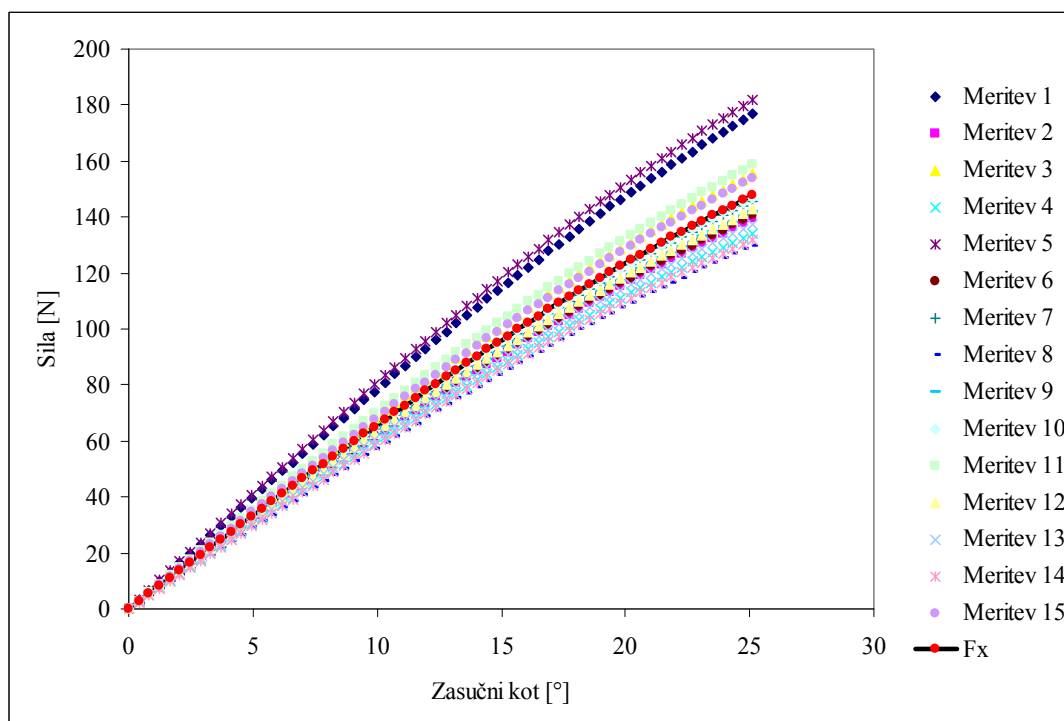
Slika 4.7 Izmerjena deformacija na dinamometru F_x pri ravnovesni vlažnosti bukovine 18 %, globini odrezovanja 6 mm in podajalni hitrosti 10 m/min ter hipotetična deformacija, ki jo povzroča vzporedna komponenta rezalne sile (F_x)



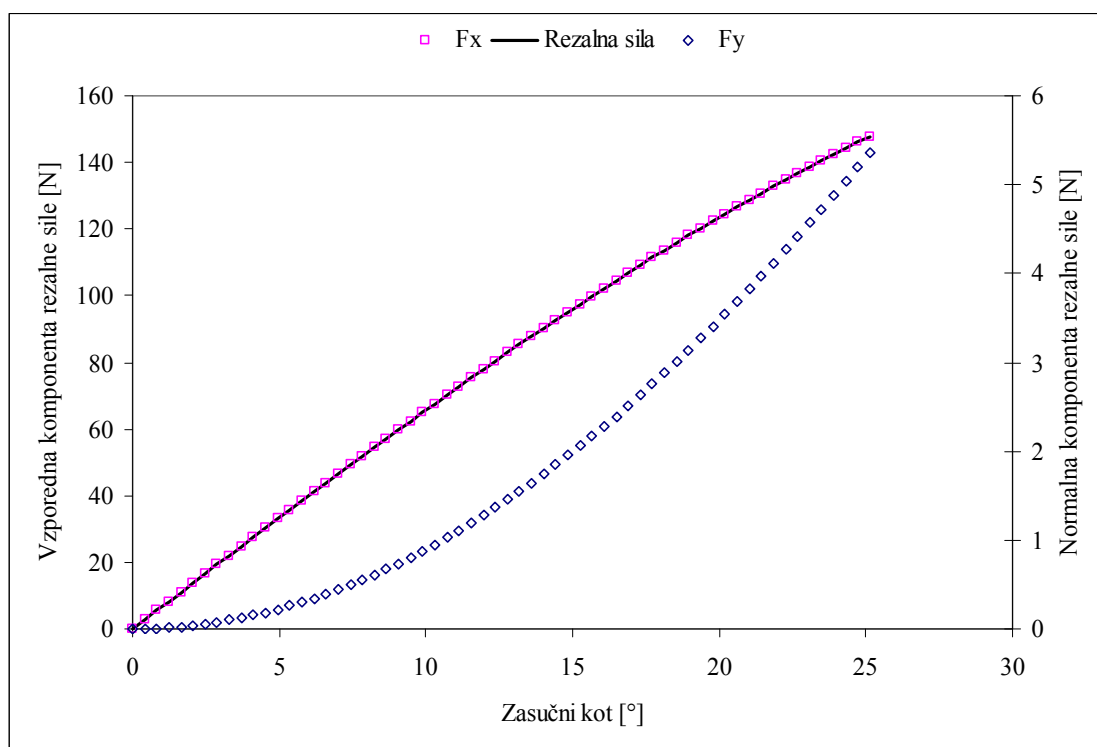
Slika 4.8 Seštevanje normalne komponente rezalne sile izmerjene na dinamometrih F_{y1} in F_{y2} pri ravnovesni vlažnosti bukovine 18 %, globini odrezovanja 6 mm in podajalni hitrosti 10 m/min



Slika 4.9 Povprečje normalne (F_y) komponente rezalne sile pri ravnovesni vlažnosti bukovine 18 %, globini odrezovanja 6 mm in podajalni hitrosti 10 m/min



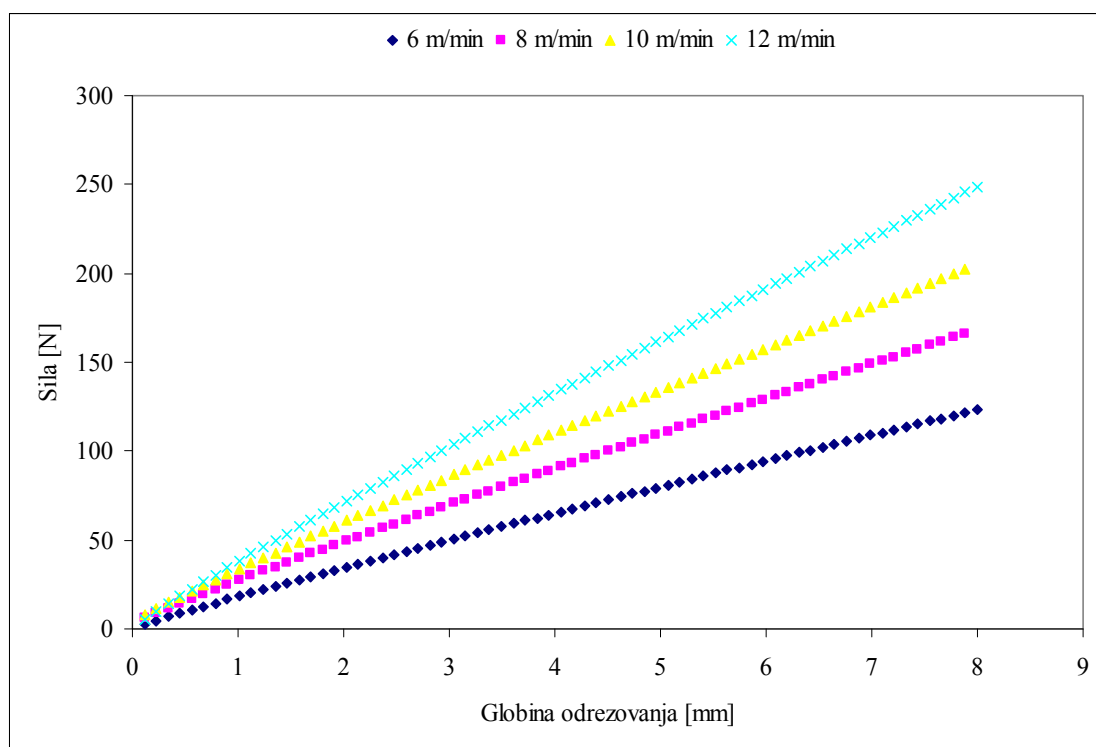
Slika 4.10 Povprečje vzporedne (F_x) komponente rezalne sile pri ravnovesni vlažnosti bukovine 18 %, globini odrezovanja 6 mm in podajalni hitrosti 10 m/min



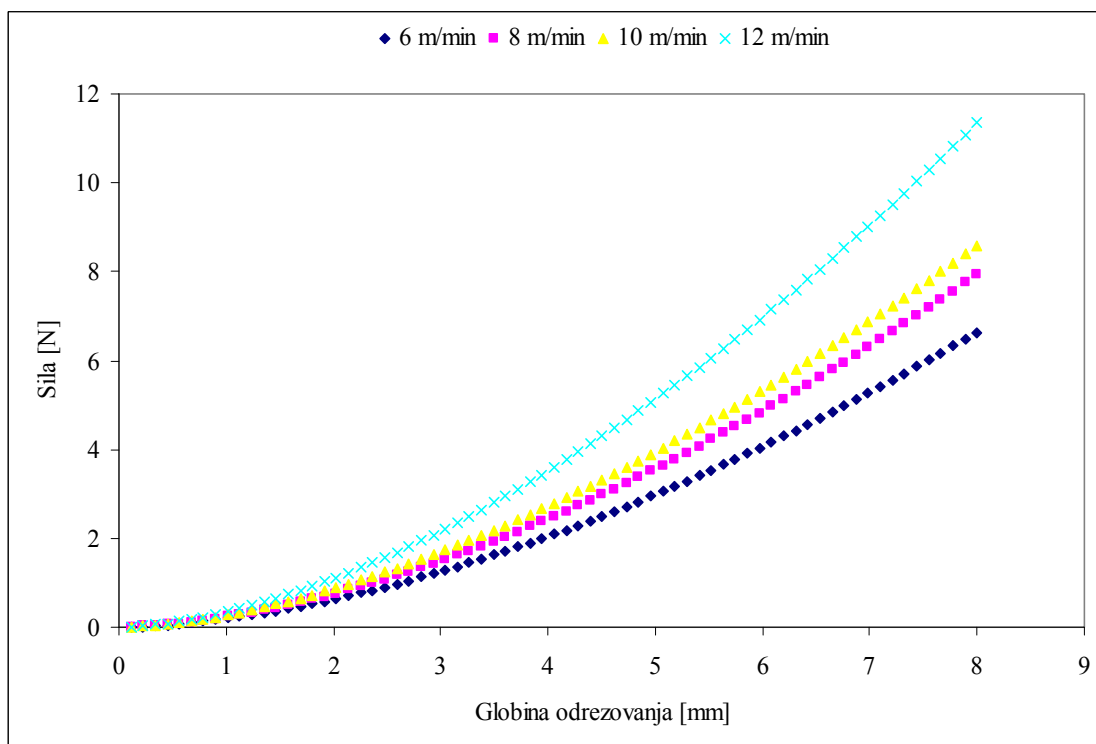
Slika 4.11 Rezalna sila (F_R) ter njena vzporedna (F_x) in normalna (F_y) komponenta pri ravnovesni vlažnosti bukovine 18 %, globini odrezovanja 6 mm in podajalni hitrosti 10 m/min

4.3 VZPOREDNE IN NORMALNE KOMPONENTE REZALNE SILE

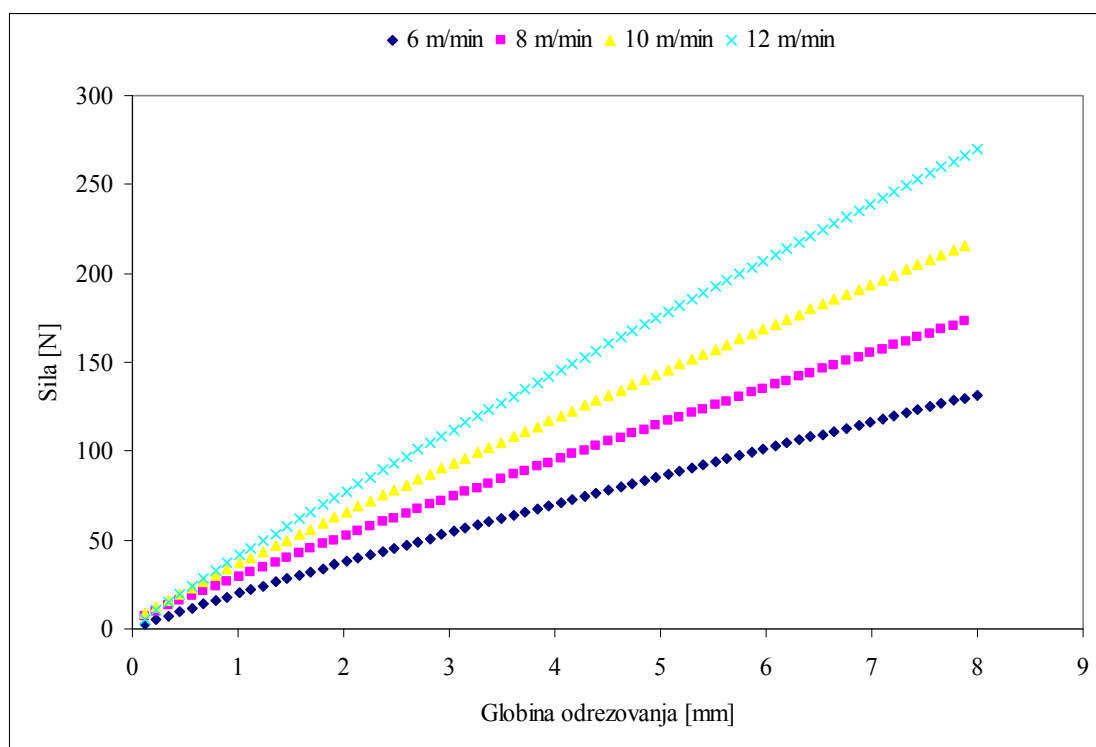
V tem poglavju so prikazane vzporedne (F_x) in normalne (F_y) komponente rezalne sile (F_R) v odvisnosti od globine odrezovanja pri podajalnih hitrostih obdelovanca 6, 8, 10 in 12 m/min. Slika 4.12 prikazuje F_x komponento rezalne sile, slika 4.13 pa F_y komponento rezalne sile v odvisnosti od globine odrezovanja pri ravnovesni vlažnosti bukovine 8,2 %. Sliki 4.14 in 4.15 prikazujeta to odvisnost pri ravnovesni vlažnosti bukovine 12 %, sliki 4.16 in 4.17 pa pri ravnovesni vlažnosti 18 %.



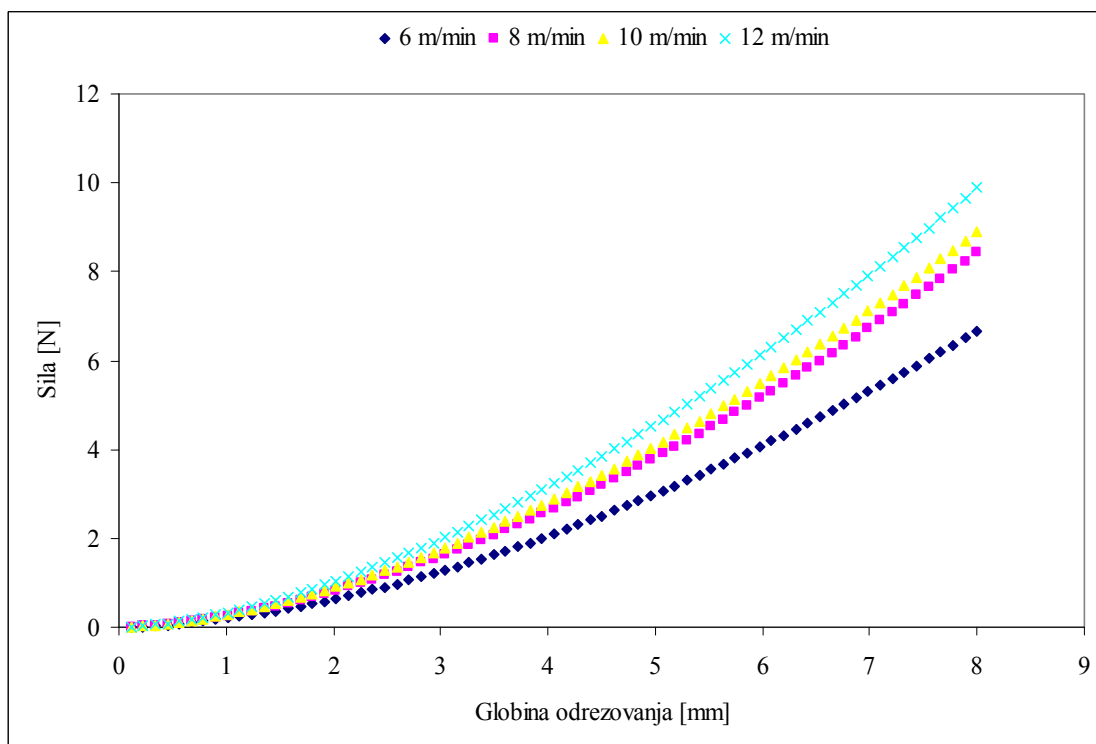
Slika 4.12 Vzporedna komponenta rezalne sile pri ravnovesni vlažnosti bukovine 8,2 % v odvisnosti od globine odrezovanja pri različnih podajalnih hitrostih obdelovanja



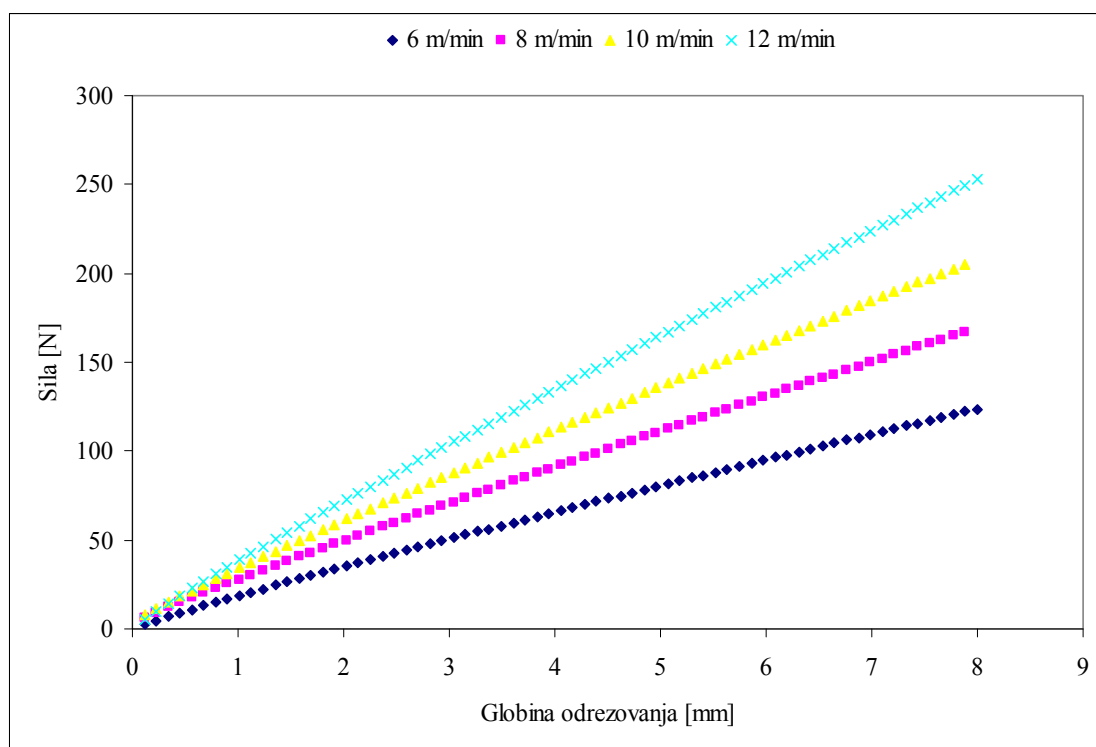
Slika 4.13 Normalna komponenta rezalne sile pri ravnovesni vlažnosti bukovine 8,2 % v odvisnosti od globine odrezovanja pri različnih podajalnih hitrostih obdelovanja



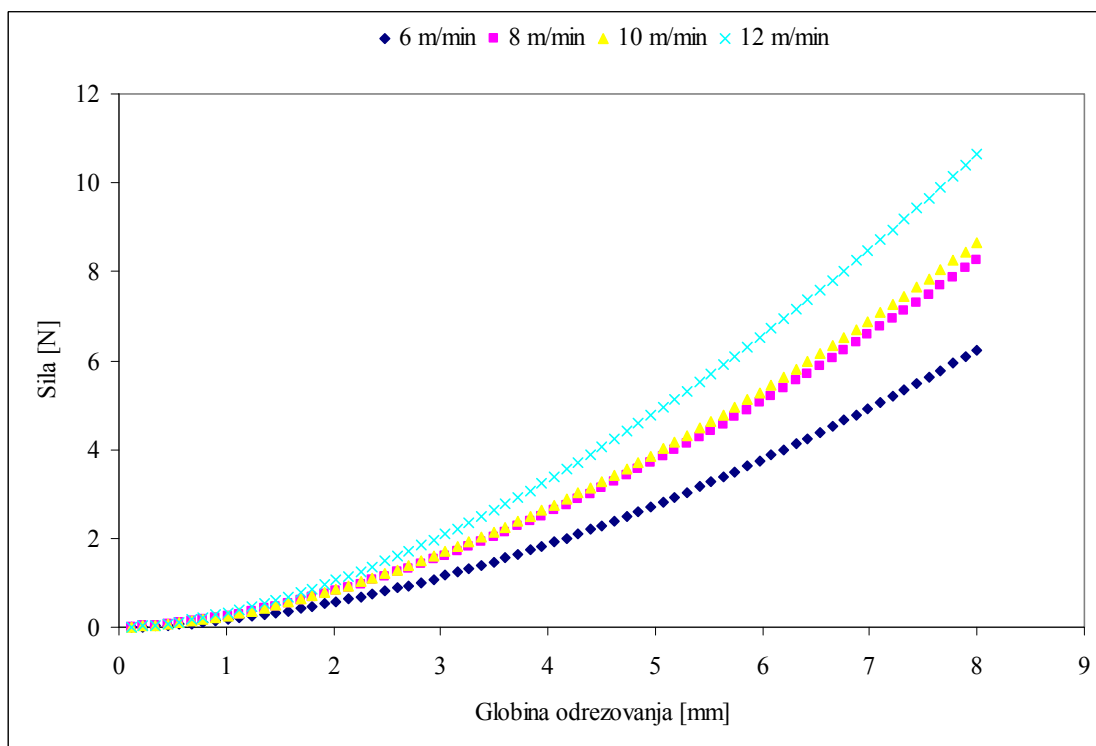
Slika 4.14 Vzporedna komponenta rezalne sile pri ravnovesni vlažnosti bukovine 12 % v odvisnosti od globine odrezovanja pri različnih podajalnih hitrostih obdelovanja



Slika 4.15 Normalna komponenta rezalne sile pri ravnovesni vlažnosti bukovine 12 % v odvisnosti od globine odrezovanja pri različnih podajalnih hitrostih obdelovanja



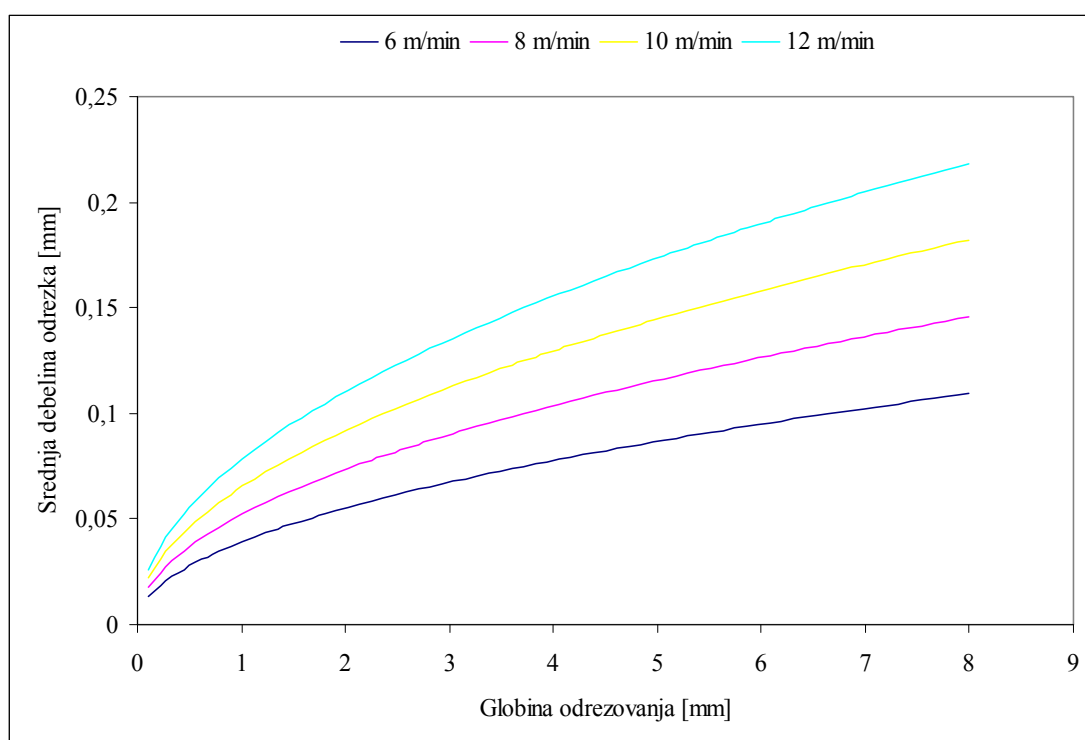
Slika 4.16 Vzporedna komponenta rezalne sile pri ravnovesni vlažnosti bukovine 18 % v odvisnosti od globine odrezovanja pri različnih podajalnih hitrostih obdelovanja



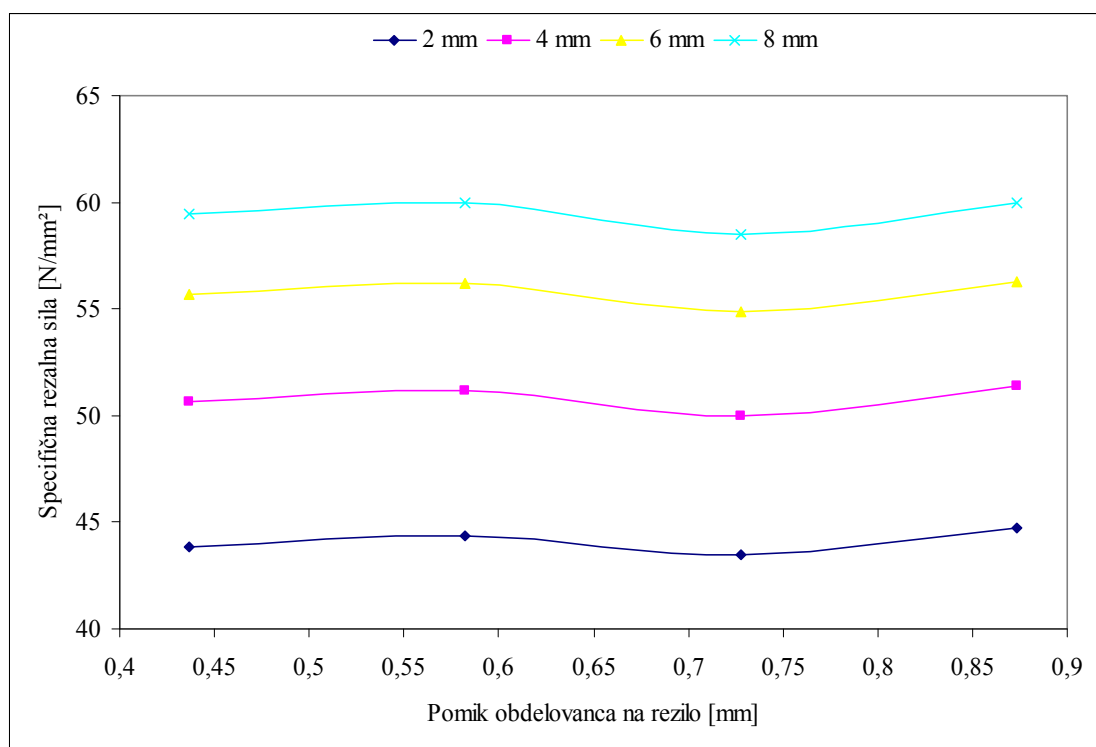
Slika 4.17 Normalna komponenta rezalne sile pri ravnovesni vlažnosti bukovine 18 % v odvisnosti od globine odrezovanja pri različnih podajalnih hitrostih obdelovanja

4.4 SPECIFIČNA REZALNA SILA

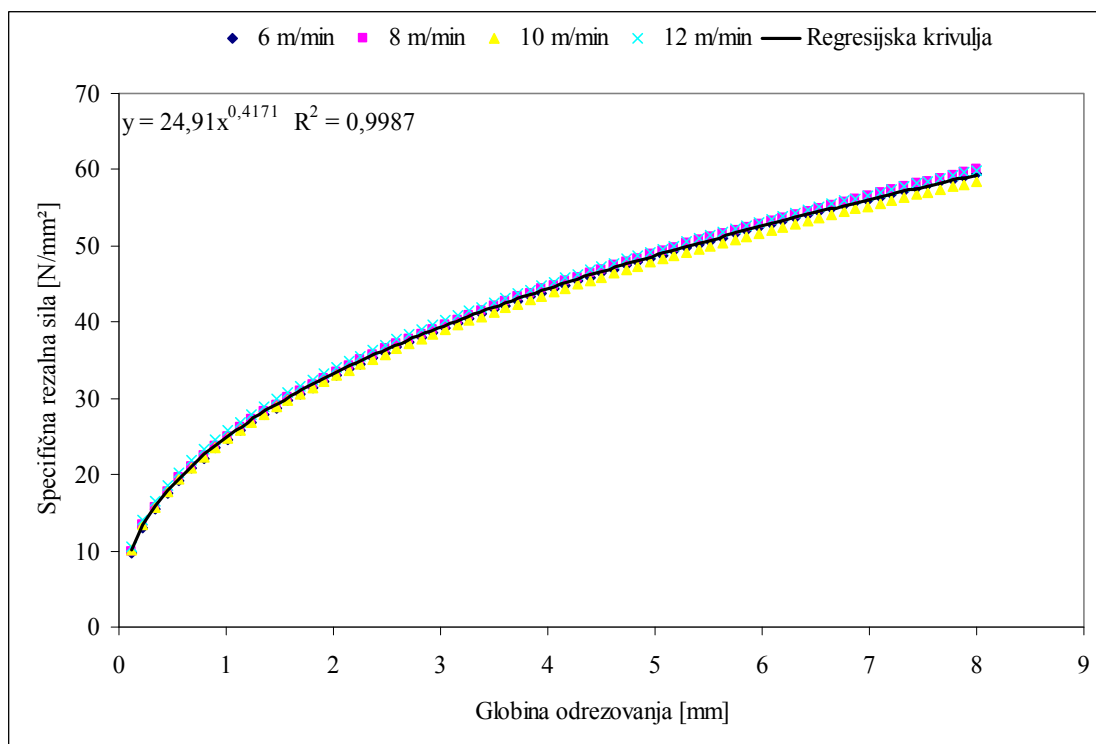
V tem poglavju so prikazane specifične rezalne sile bukovine pri različnih odvisnostih. Slika 4.18 prikazuje srednjo debelino odrezka (h_m) v odvisnosti od globine odrezovanja pri podajalnih hitrostih obdelovanca 6, 8, 10 in 12 m/min. Slika 4.19 prikazuje specifično rezalno silo v odvisnosti od pomika obdelovanca na rezilo, pri globinah odrezovanja 2, 4, 6 in 8 mm. Sliki 4.20 in 4.21 prikazujeta specifično rezalno silo v odvisnosti od globine odrezovanja in kota odrezovanja pri omenjenih podajalnih hitrostih. Specifične rezalne sile prikazane na slikah 4.19, 4.20 in 4.21 so izmerjene pri ravnovesni vlažnosti bukovine 8,2 %, slike 4.22, 4.23 in 4.24 prikazujejo specifično rezalno silo pri ravnovesni vlažnosti bukovine 12 %, slike 4.25, 4.26 in 4.27 pa pri ravnovesni vlažnosti bukovine 18 %. Slika 4.28 prikazuje specifično rezalno silo v odvisnosti od ravnovesne vlažnosti bukovine.



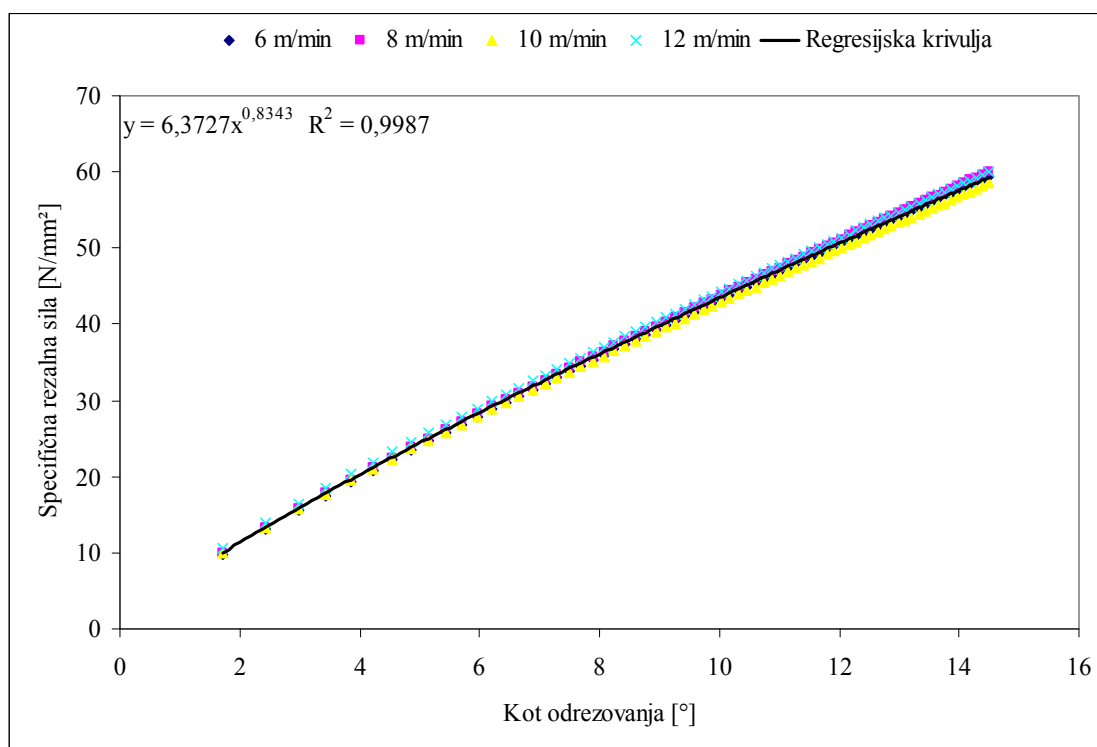
Slika 4.18 Srednja debelina odrezka (h_m) v odvisnosti od globine odrezovanja pri različnih podajalnih hitrostih



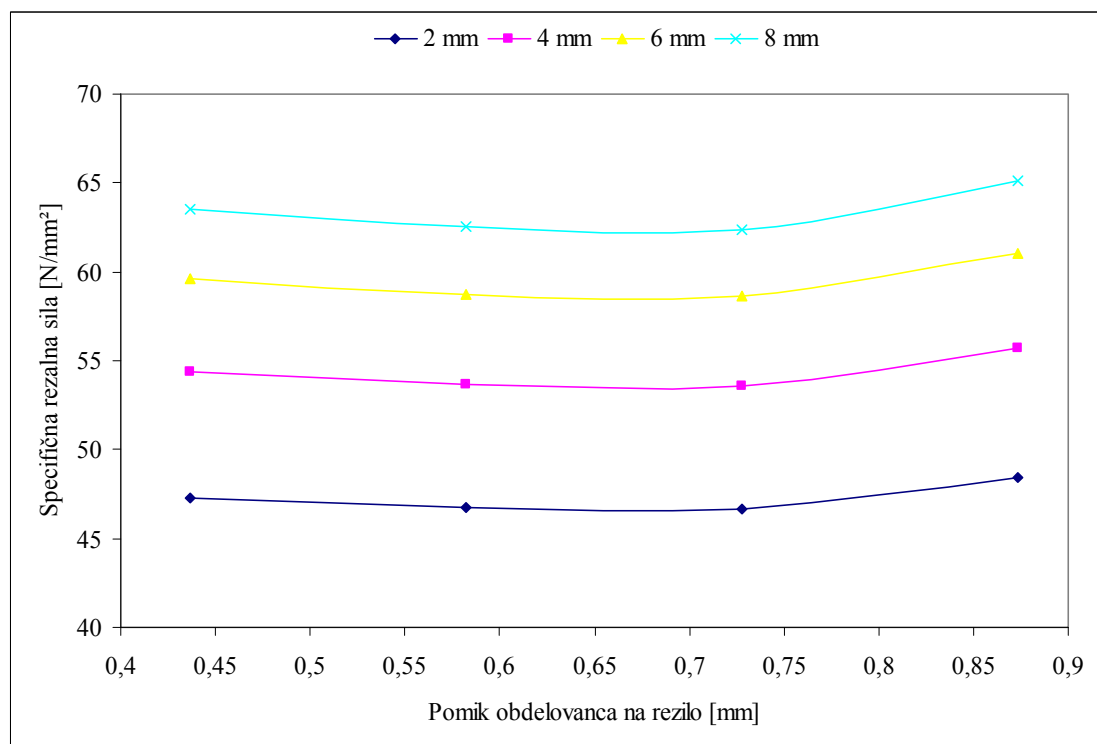
Slika 4.19 Specifična rezalna sila pri ravnovesni vlažnosti bukovine 8,2 % v odvisnosti od pomika obdelovanca na rezilo pri različnih globinah odrezovanja



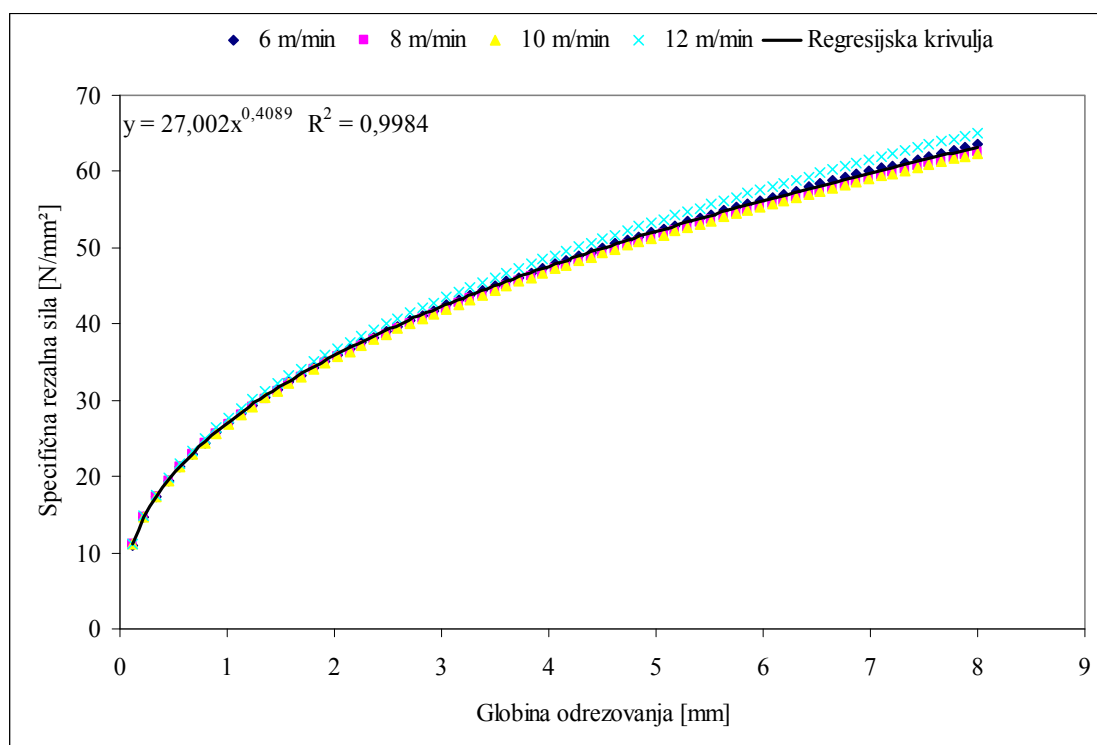
Slika 4.20 Specifična rezalna sila pri ravnovesni vlažnosti bukovine 8,2 % v odvisnosti od globine odrezovanja pri različnih podajalnih hitrostih



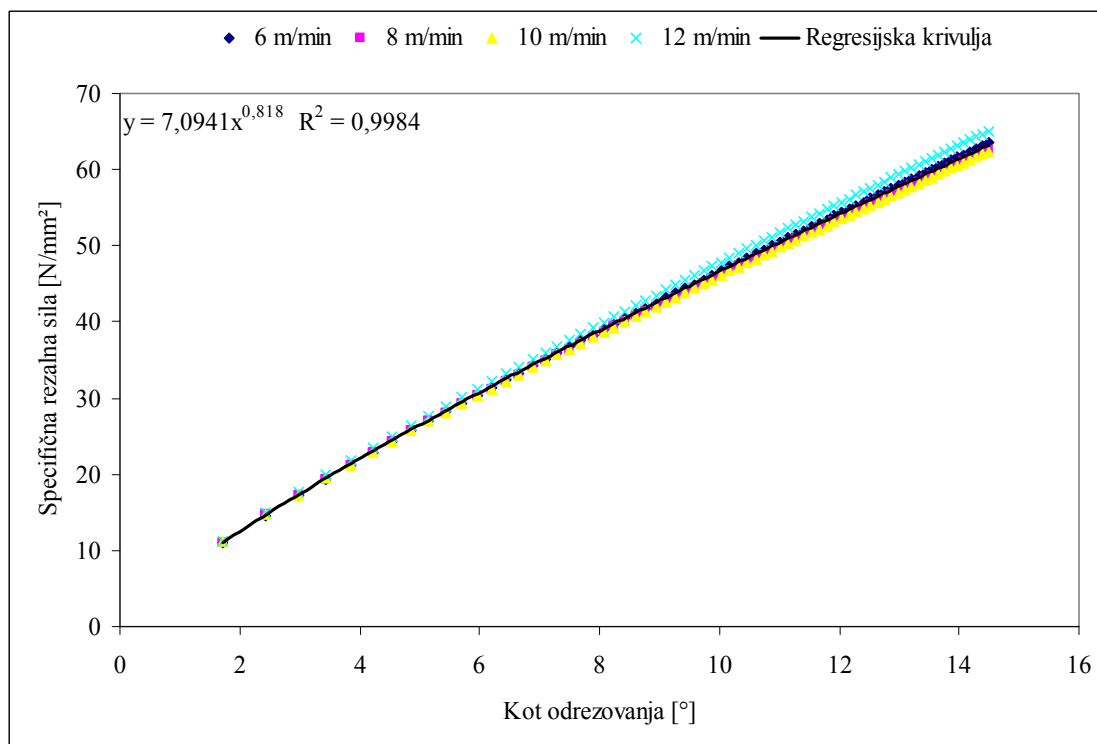
Slika 4.21 Specifična rezalna sila pri ravnovesni vlažnosti bukovine 8,2 % v odvisnosti od kota odrezovanja pri različnih podajalnih hitrostih



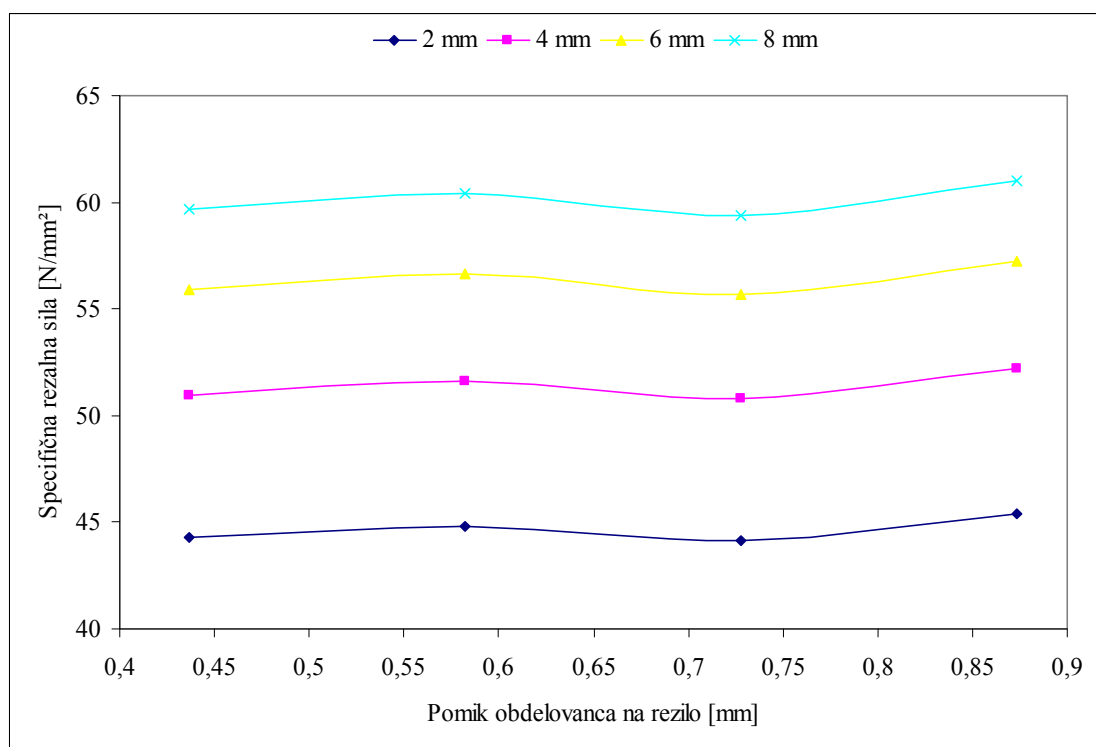
Slika 4.22 Specifična rezalna sila pri ravnovesni vlažnosti bukovine 12 % v odvisnosti od pomika obdelovanca na rezilo pri različnih globinah odrezovanja



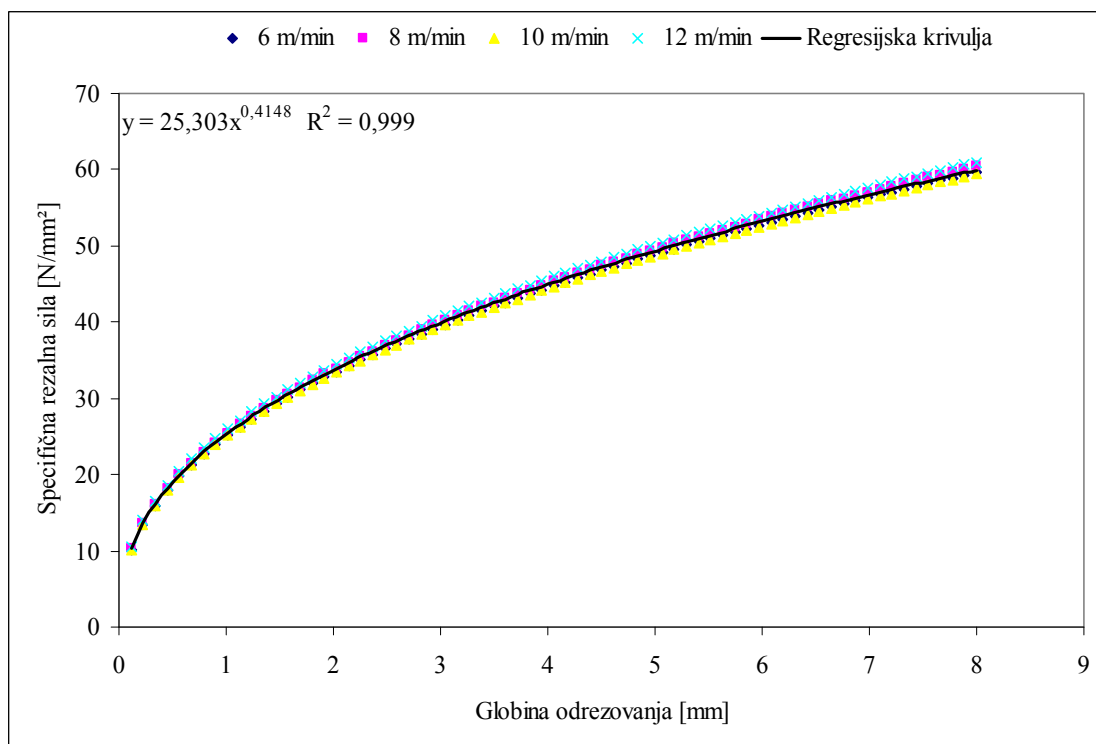
Slika 4.23 Specifična rezalna sila pri ravnovesni vlažnosti bukovine 12 % v odvisnosti od globine odrezovanja pri različnih podajalnih hitrostih



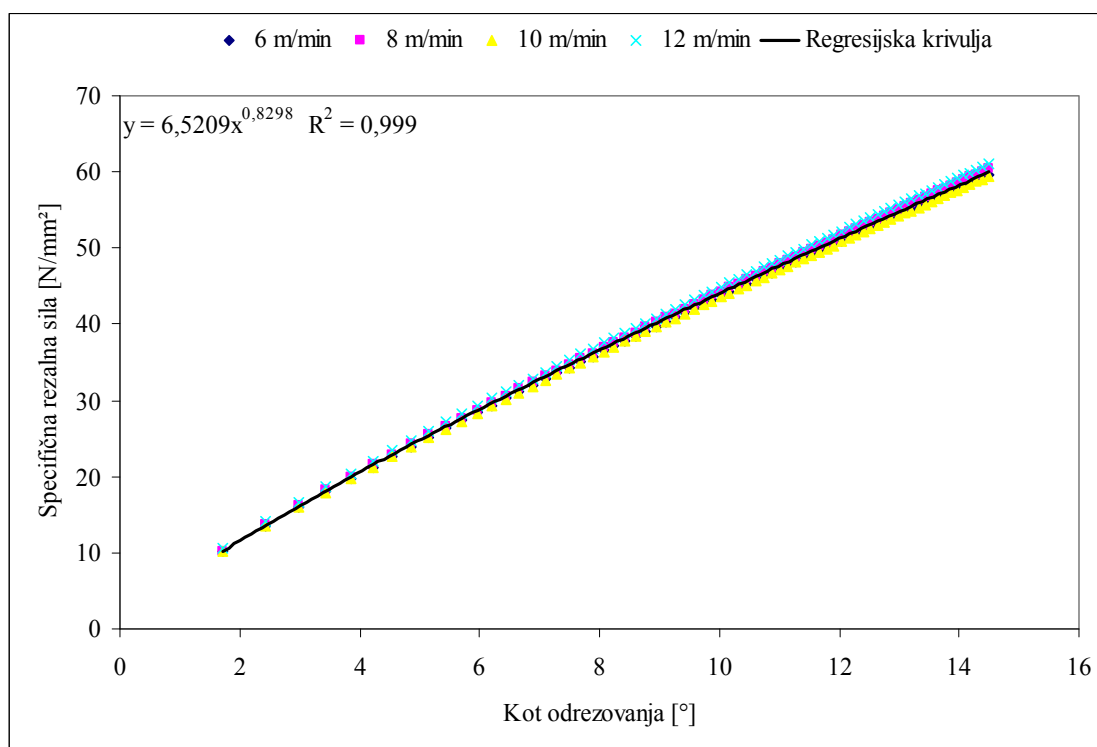
Slika 4.24 Specifična rezalna sila pri ravnovesni vlažnosti bukovine 12 % v odvisnosti od kota odrezovanja pri različnih podajalnih hitrostih



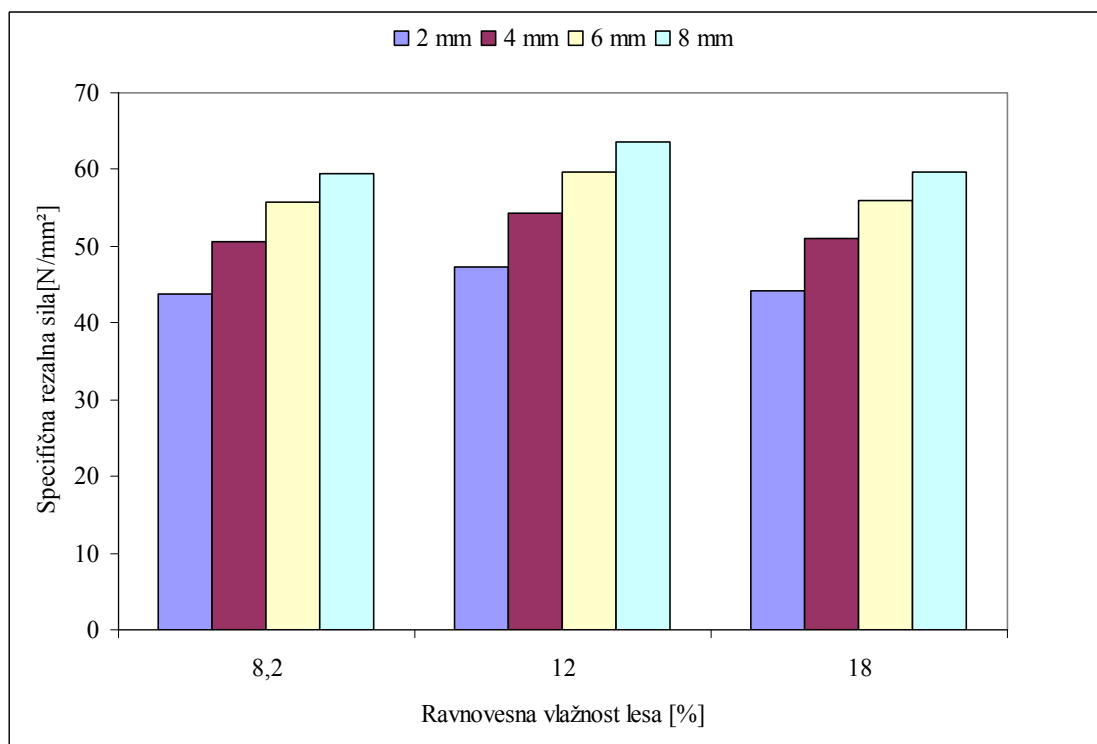
Slika 4.25 Specifična rezalna sila pri ravnovesni vlažnosti bukovine 18 % v odvisnosti od pomika obdelovanca na rezilo pri različnih globinah odrezovanja



Slika 4.26 Specifična rezalna sila pri ravnovesni vlažnosti bukovine 18 % v odvisnosti od globine odrezovanja pri različnih podajalnih hitrostih



Slika 4.27 Specifična rezalna sila pri ravnovesni vlažnosti bukovine 18 % v odvisnosti od kota odrezovanja pri različnih podajalnih hitrostih



Slika 4.28 Specifična rezalna sila v odvisnosti od ravnovesne vlažnosti bukovine pri različnih globinah odrezovanja

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

V diplomski nalogi smo prikazali in opisali periodično diskontinuirano ortogonalno krožno odrezovanje orientiranega lesnega tkiva, ki je v lesni industriji najpogostejše uporabljen mehanski način obdelave in predelave lesa. Spremenljivost rezalne sile v procesu nastajanja odrezka je posledica spreminjajoče se presečne površine odrezka, lokalne usmeritve tkiva in variabilne lokalne fizikalne lastnosti tkiva, kar nakazuje, da je odrezovanje kompleksen proces deformacije in porušitve lesnega tkiva v lokaliziranem območju.

Zasnovali in izdelali smo vpenjalni sistem z dinamometri. Razvili smo model periodičnega diskontinuiranega ortogonalnega krožnega odrezovanja lesnega tkiva, ki upošteva vse dinamične lastnosti obdelovalnega sistema. Meritve so bile opravljene z namenom analize specifične rezalne sile, kot relevantnega parametra obdelovanega materiala.

Iz časovnega poteka izmerjenih deformacij na dinamometrih F_{y1} , F_{y2} in F_x , ki so prikazane v prilogah od A1 do D4 je razvidna ekscentričnost rezkalnega orodja, ki je posledica vpetja rezilnih ploščic. V povprečju so deformacije, ki jih povzroča eno rezilo večje za 20 %, kar negativno vpliva na obrabo rezil, predvsem na kvaliteto obdelane površine.

Specifična rezalna sila se med kotoma odrezovanja $7,24^\circ$ in $14,49^\circ$ ter med globino odrezovanja 2 mm in 8 mm povečuje potenčno. Regresijska koeficienta se v obeh primerih približata vrednosti 0,99.

Podajalna hitrost obdelovanca ne vpliva na velikost specifične rezalne sile, vpliva pa na vzporedno in normalno komponento rezalne sile. Z naraščanjem podajalne hitrosti med 6 m/min in 12 m/min se povečujeta obe komponenti rezalne sile.

Na velikost specifične rezalne sile ima poseben vpliv tudi ravnovesna vlažnost lesnega tkiva. Pri ravnovesnih vlažnostih bukovine 8,2 in 18 % je specifična rezalna sila približno enaka, medtem ko je pri ravnovesni vlažnosti bukovine 12 % v povprečju nekoliko večja od teh dveh vrednosti. Do podobnih rezultatov je prišel tudi Kivimaa (1952), ki navaja odvisnost specifične rezalne sile brezovine od njene ravnovesne vlažnosti.

6 POVZETEK

Da bi analizirali obremenitev orodja pri periodičnem krožnem odrezovanju, kot najpogostejše uporabljenem mehanskem načinu obdelave, smo svojo pozornost usmerili predvsem na spremenljivost rezalne sile v procesu nastajanja odrezka.

V uvodnem delu naloge smo zasnovali in izdelali eksperimentalni sistem, ki nam je omogočil vpetje obdelovanca in pomikanje le tega, ter sočasno spremljanje spremenljivosti vzporedne in normalne komponente rezalne sile. Podajalni sistem, pritrjen na konstrukcijo mize je sestavljen iz linearnega modula LEZ 4, povezan je z vpenjalnim sistemom obdelovanca, ki vsebuje tri dinamometre. Vpenjalni sistem je pritrjen na pomična podporna vozička s kotalnimi elementi, ki omogočajo preme pomike po vodilni letvi. Na linearni modul smo namestili reduktor s pogonskim AC servo motorjem HC-MFS. Za regulacijo vrtiljajev motorja smo izbrali AC servo regulator MEL – J2S – 20 A.

Rezalne sile smo določili na osnovi primerjave izmerjenih in hipotetičnih modeliranih odzivov dinamometrov. Za omenjeno metodo smo se odločili zaradi dokaj neugodnega razmerja med lastnimi frekvencami dinamometrov in frekvenco odrezavanja. Za modeliranje odziva posameznega dinamometra smo uporabili numerično metodo Runge-Kutta, pri čemer smo v dinamičnem modelu dinamometrov upoštevali realne, izmerjene relevantne parametre. Rezalne sile smo določili z metodo prilagajanja vzbujevalne sile v dinamičnem modelu. Eksperimente smo izvajali pri konstantni vrtilni hitrosti orodja, ki je znašala 6870 vrt/min, ter različnih globinah odrezavanja (2, 4, 6 in 8 mm) in podajalnih hitrostih (6, 8, 10 in 12 m/min). Preizkušance izdelane iz radialnih desk bukovine (*Fagus Silvatica*), smo uravnovesili na tri različne vlažnosti in sicer 8,2, 12 in 18 %. Na osnovi opravljenih meritev, smo za posamezne načine odrezavanja določili specifično rezalno silo.

Iz rezultatov je razvidno, da se specifična rezalna sila z naraščajočo globino ter kotom odrezavanja povečuje potenčno. Naraščajoča podajalna hitrost ne vpliva na velikost specifične rezalne sile, vpliva pa na vzporedno in normalno komponento rezalne sile, kar se odraža v njunem povečevanju. Vlažnost lesa ima spremenljiv vpliv na specifično rezalno silo. Pri vlažnostih 8,2 in 18 % sta specifični rezalni sili skoraj identični, pri vlažnosti 12 % pa je opaženo signifikantno povečanje vrednosti.

7 VIRI

- Aguilera A., Martin P. 2001. Machining qualification of solid wood of *Fagus sylvatica* L. and *Picea excelsa* L.: cutting forces, power requirements and surface roughness. Holz als Roh-und Werkstoff, 59: 483-488
- Aykut S., Golcu M., Semiz S., Ergur H.S. 2007. Modeling of cutting forces as function of cutting parameters for face milling of satellite 6 using artificial neural network. Journal of Materials Processing Technology, 190: 199-203
- Bučar B. 1991. Ortogonalno premočrtno odrezovanje kot naključni stacionarni proces. Les, 3-4: 65-71
- Bučar B. 1996. Modulacija rezalne sile pri periodičnem krožnem odrezovanju lesnega tkiva kot samovzbujevalnem sistemu. Doktorska disertacija. Ljubljana, Fakulteta za strojništvo: 136 str.
- Boucher J., Meausoone P.J., Martin P., Auchet S., Perrin L. 2007. Influence of helix angle and density variation on the cutting force in wood-based products machining. Journal of Materials Processing Technology, 189: 211-218
- Carlo Gavazzi
<https://www.gavazzionline.com/pdf/IA12ASC05AK-K.pdf>
- Čufar K. 2001. Opis lesnih vrst. Študijsko gradivo za interno uporabo. Ljubljana: 15-17
- Eyma F., Meausoone P.J., Martin P. 2004. Strains and cutting forces involved in the solid wood rotating cutting process. Journal of Materials Processing Technology, 148: 220-225
- Franz N. C. 1958. An analysis of the wood-cutting process. Michigan
- Gauvent M., Rocca E., Meausoone P.J., Brenot P. 2006. Corrosion of materials used as cutting tools of wood. Wear, 261: 1051-1055
- Hlebanja J. 1998. Teoretični model odrezovanja, vpliv ostrine na rezanje lesa in videz ostrine pod mikroskopom. Les, 50, 11: 329-333
- Juan J., Plassat F. 1990. Les outils de travail du bois. Collection Sunsteel/Techno-Nathan: 76
- Kivimaa E. 1952. Die Schnittkraft in der Holzzbearbeitung. Holz als Roh – und Werkstoff 10 (3): 94 – 108
- Lavery DJ., McLarnontul D., Taylor JM., Moloney S., Atanackovic A. 1995. Parameters affecting the surface finish of planed sitka spruce. Forest Prod J, 45: 45-50

Merchant M. E. 1945. Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting and a type II chip: 267 – 275

Mitsubishi Electric

http://194.130.244.64/branch/database/service/downloads_manager.php?portal_id=3&type=doc_loc&id=1103

Mori M. 1971. An analysis of cutting work in peripheral milling of wood. 42. Variation of cutting force in inside cutting of wood with router-bit. Mokuzai Gakkaishi, 17, 10: 437-442

Schweingruber F.H., Borner A., Schulze E.D. 2006. Atlas of Woody Plant Stems. Modification of the Xylem Within a Plant. Berlin Springer Heidelberg: 95-105

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju doc. dr. Bojanu Bučarju za vse nasvete in podporo pri izdelavi diplomskega dela.

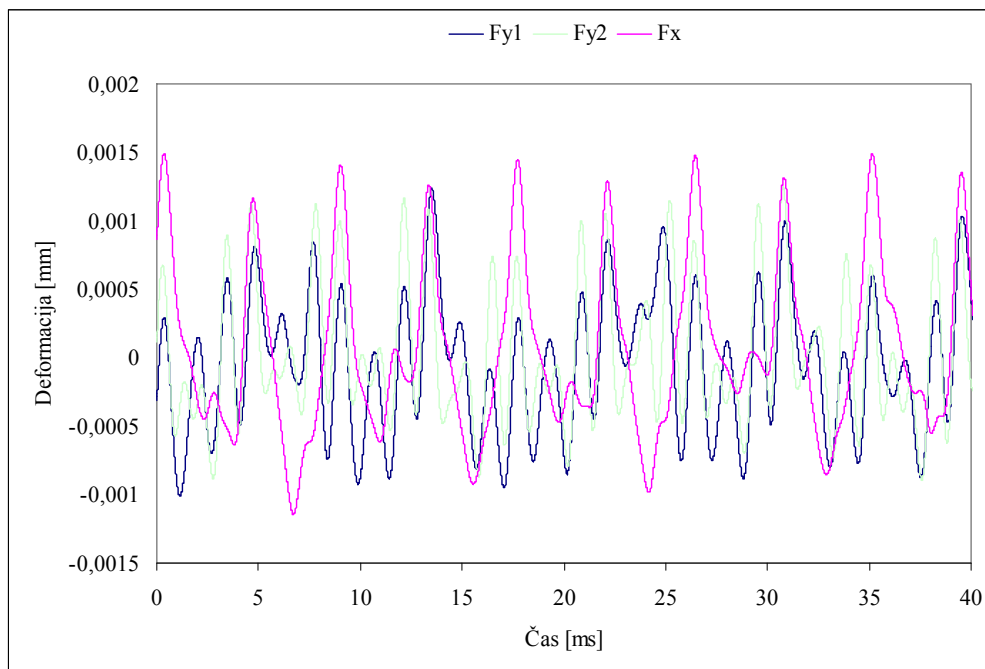
Najlepša hvala dr. Bojanu Gospodariču, asistentu Miranu Merharju in dipl. inž. les. Dragu Vidicu za pomoč pri izvajanju meritev.

Zahvaljujem se mami in očetu, ker sta mi omogočila študij.

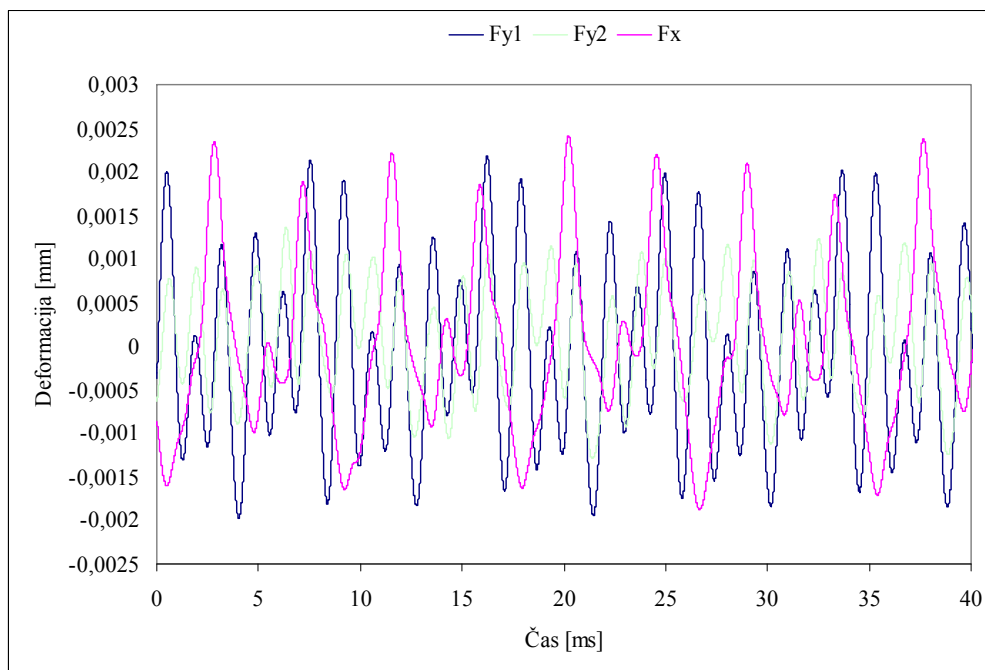
PRILOGE

PRILOGA A1

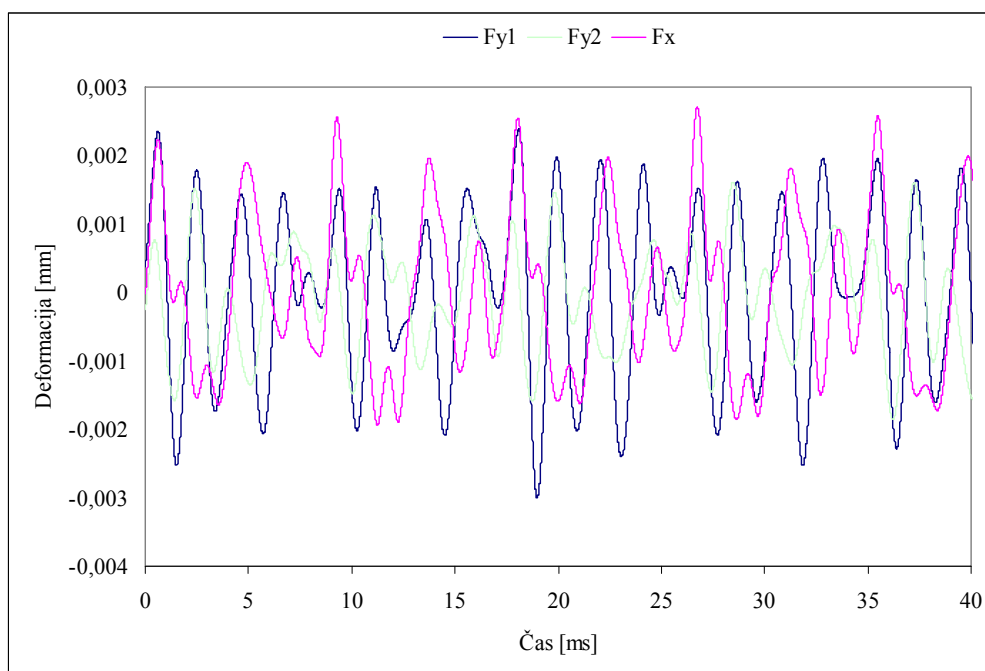
Izmerjene deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri ortogonalnem krožnem odrezovanju bukovine, njeni ravnovesni vlažnosti 8,2 % in podajalni hitrosti 6 m/min.



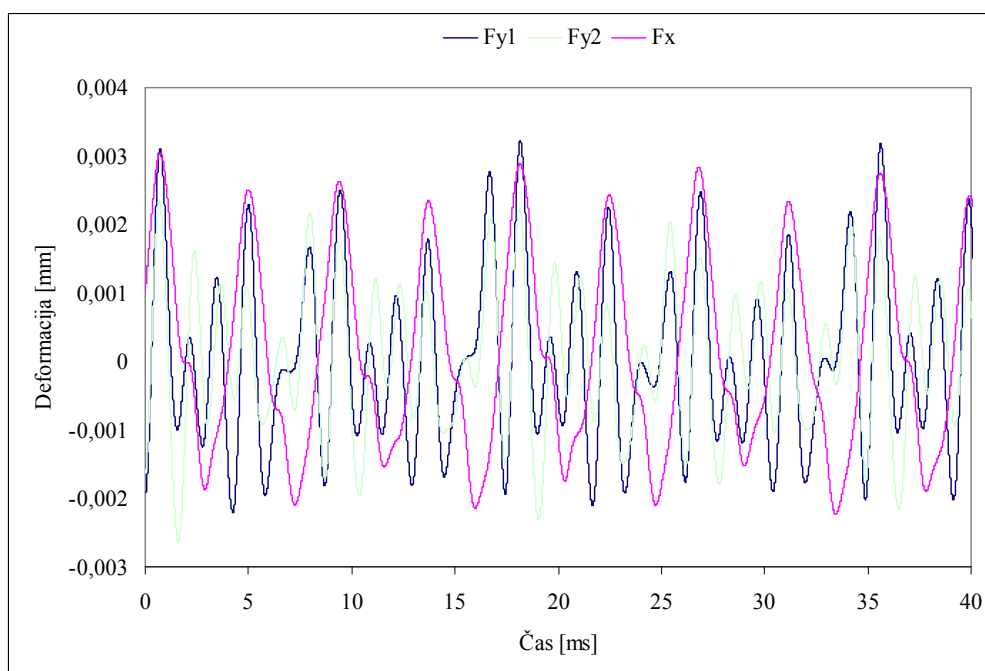
Slika A1-1 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 2 mm



Slika A1-2 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 4 mm



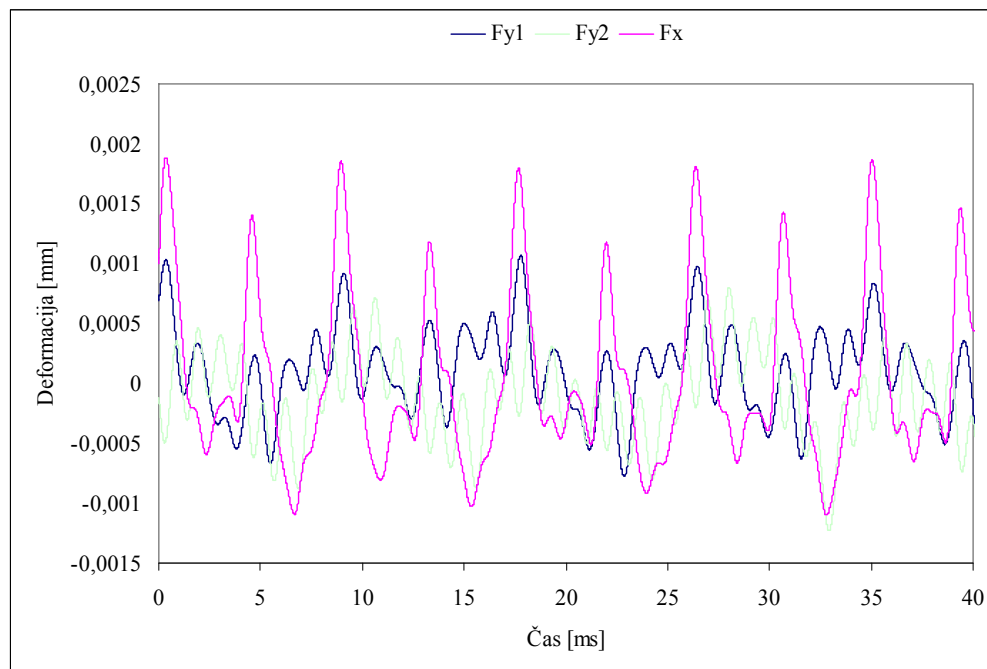
Slika A1-3 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 6 mm



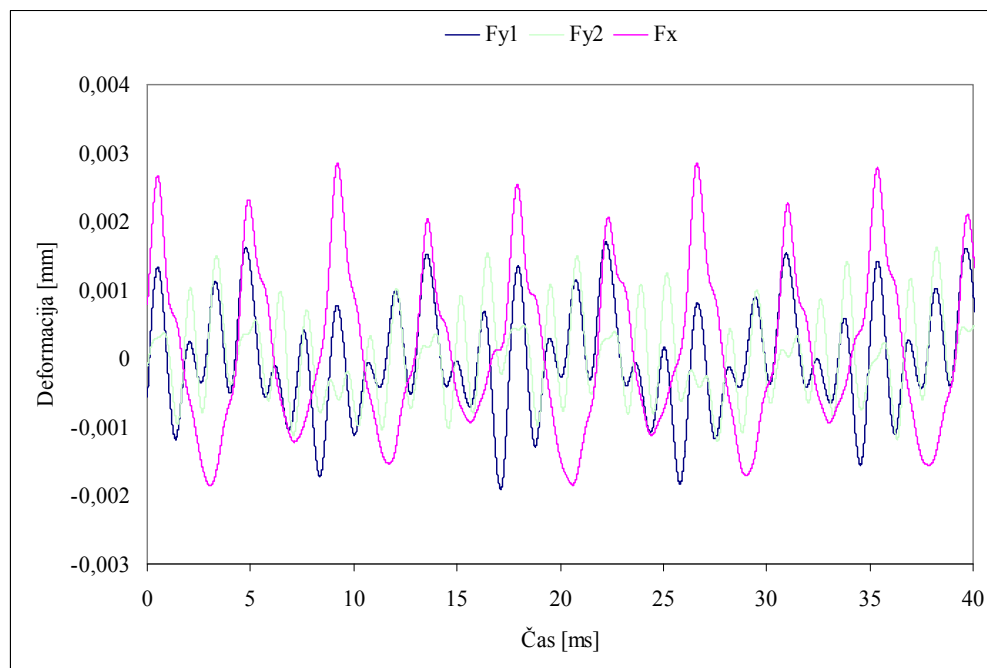
Slika A1-4 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 8 mm

PRILOGA A2

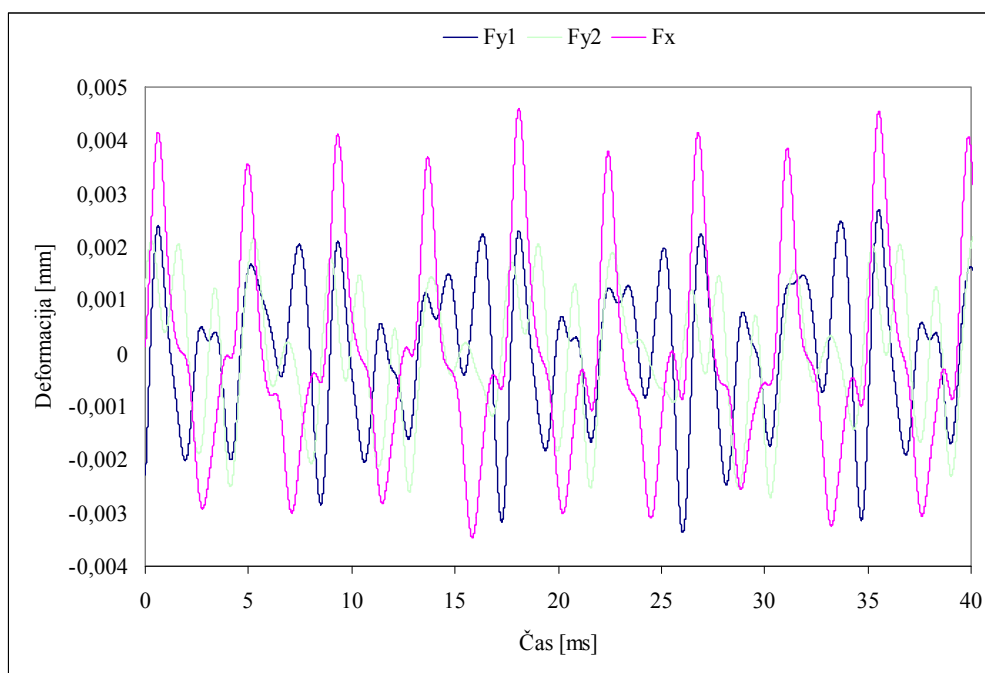
Izmerjene deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri ortogonalnem krožnem odrezovanju bukovine, njeni ravnovesni vlažnosti 8,2 % in podajalni hitrosti 8 m/min.



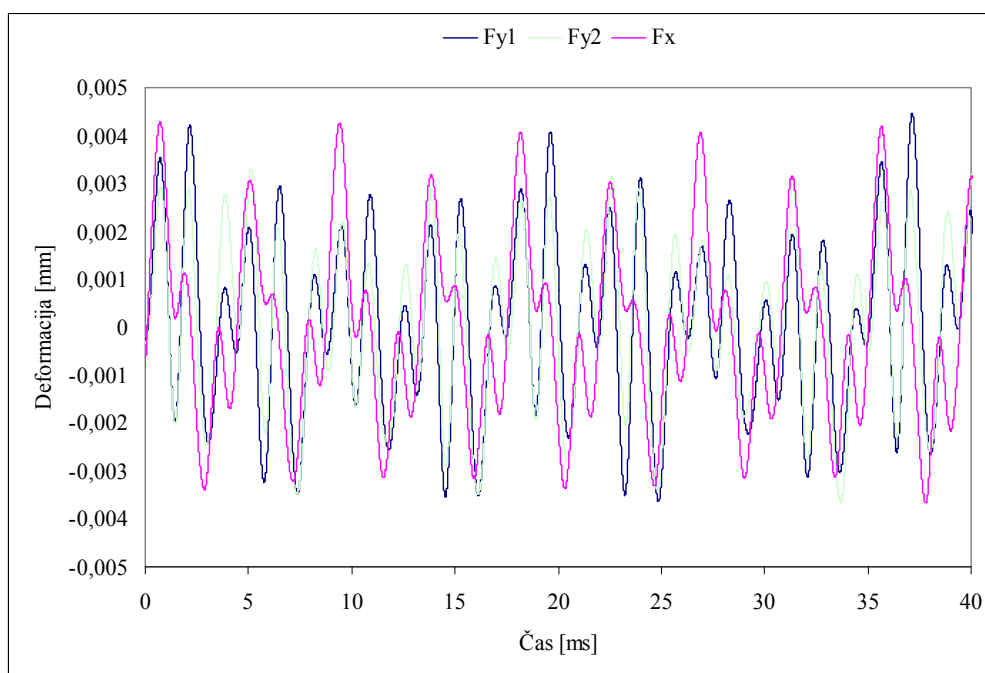
Slika A2-1 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 2 mm



Slika A2-2 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 4 mm



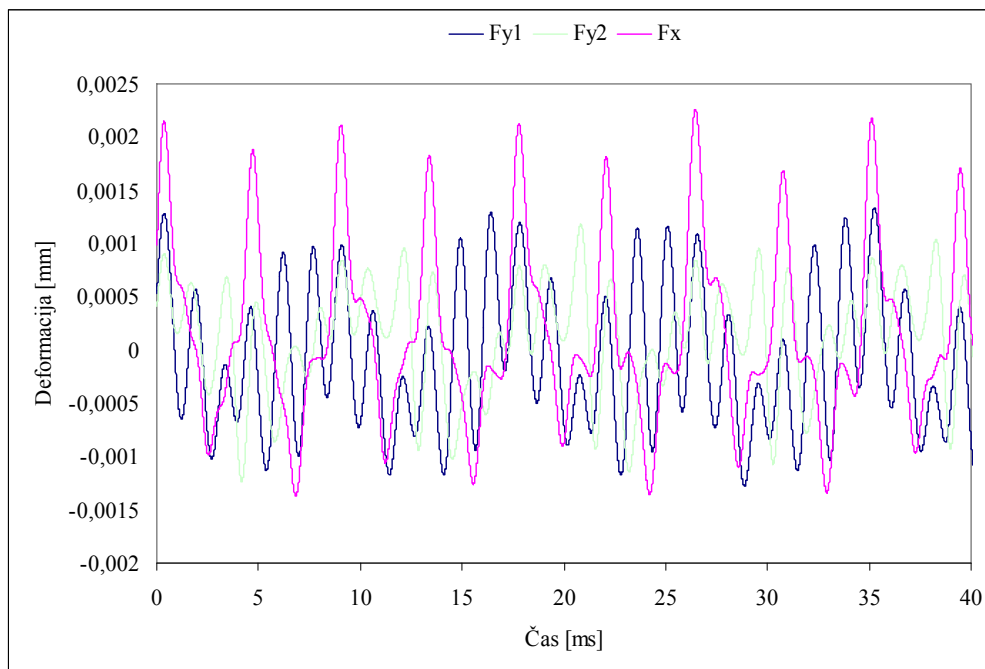
Slika A2-43 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 6 mm



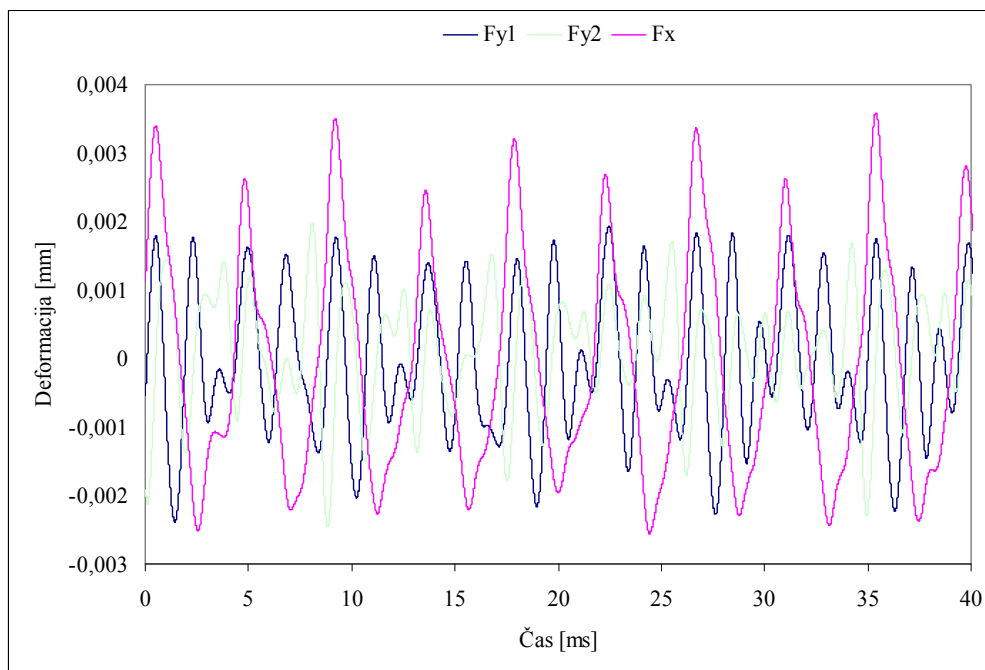
Slika A2-4 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 8 mm

PRILOGA A3

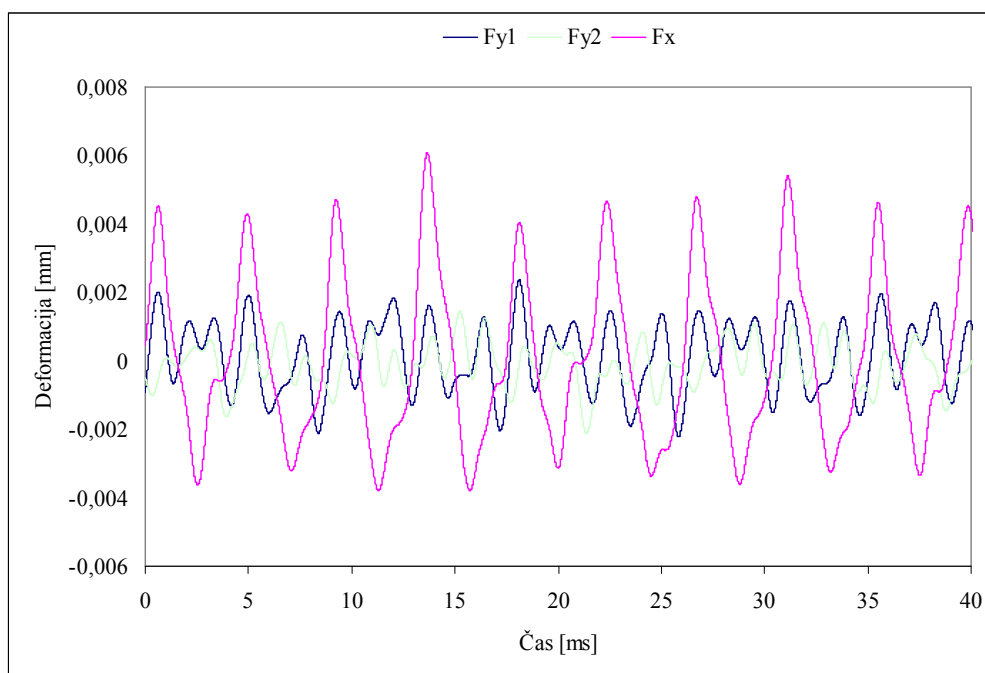
Izmerjene deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri ortogonalnem krožnem odrezovanju bukovine, njeni ravnovesni vlažnosti 8,2 % in podajalni hitrosti 10 m/min.



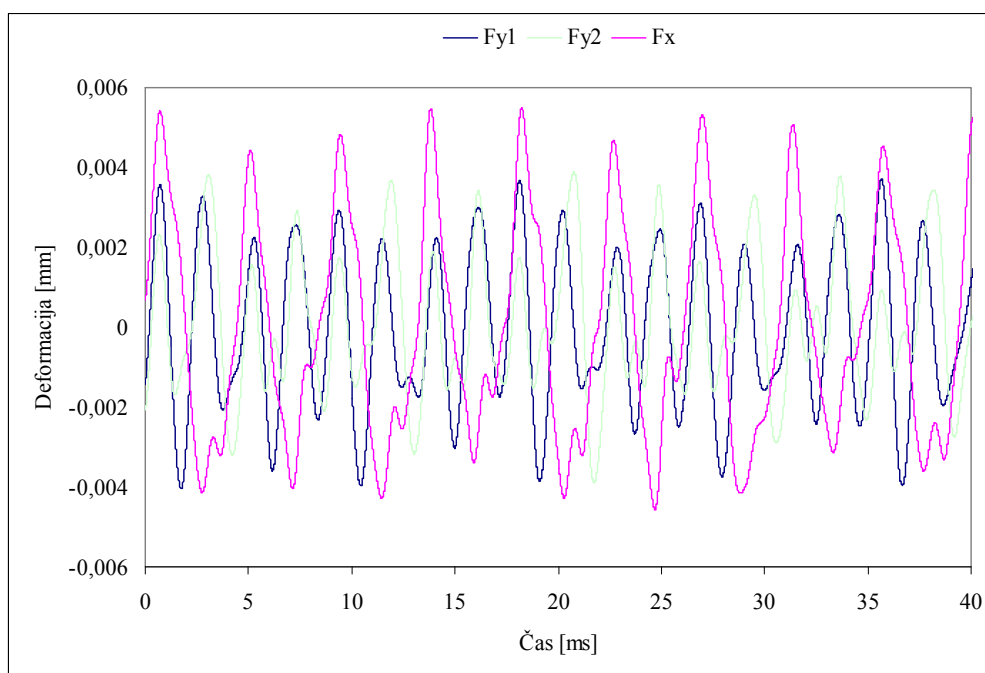
Slika A3-1 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 2 mm



Slika A3-2 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 4 mm



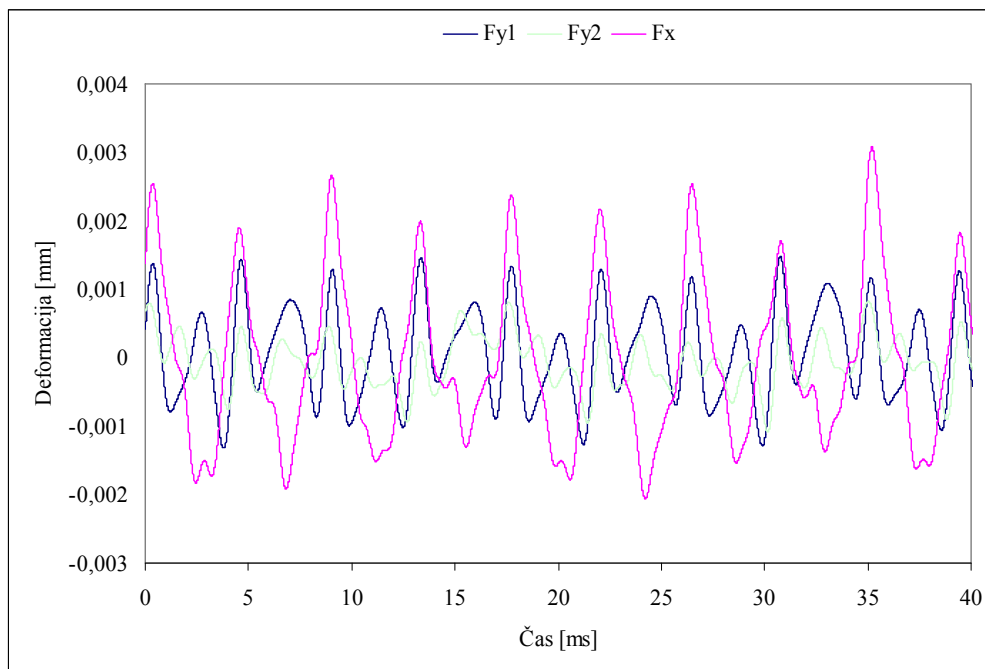
Slika A3-3 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 6 mm



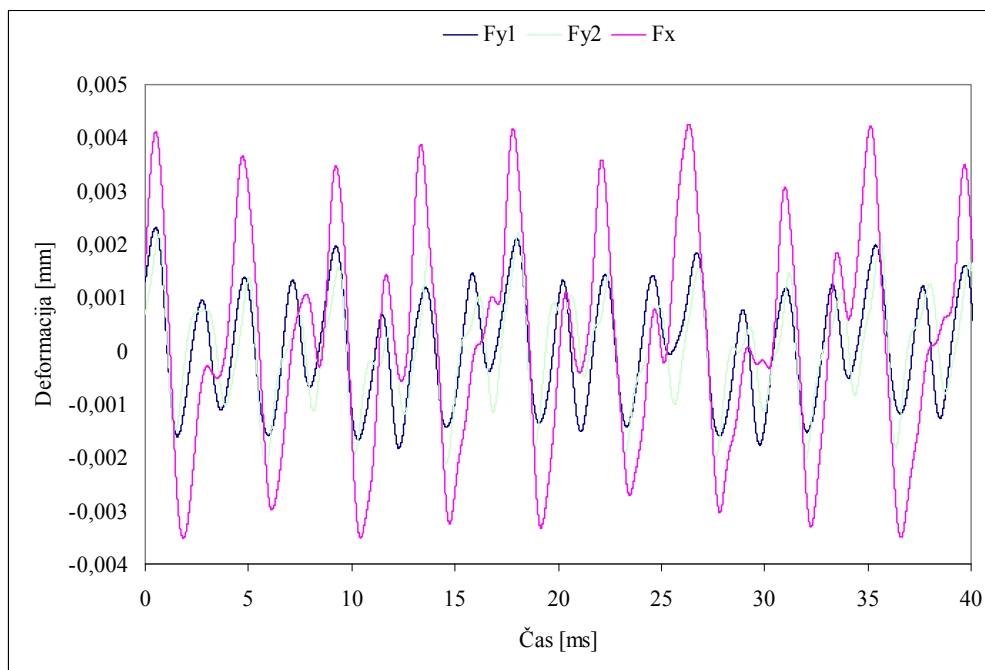
Slika A3-4 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 8 mm

PRILOGA A4

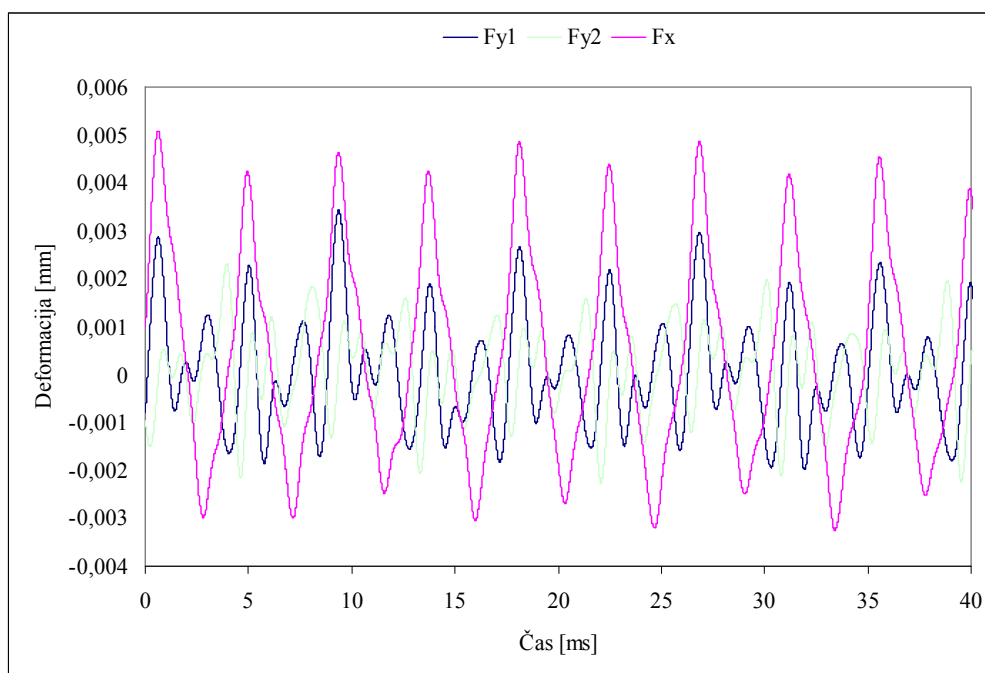
Izmerjene deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri ortogonalnem krožnem odrezovanju bukovine, njeni ravnovesni vlažnosti 8,2 % in podajalni hitrosti 12 m/min.



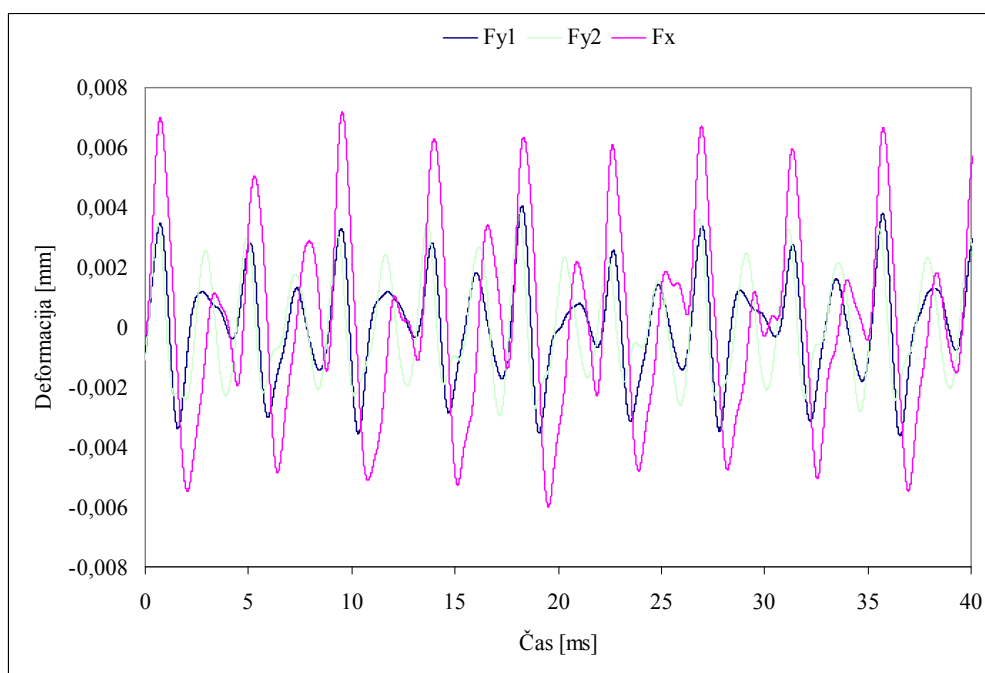
Slika A4-1 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 2 mm



Slika A4-2 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 4 mm



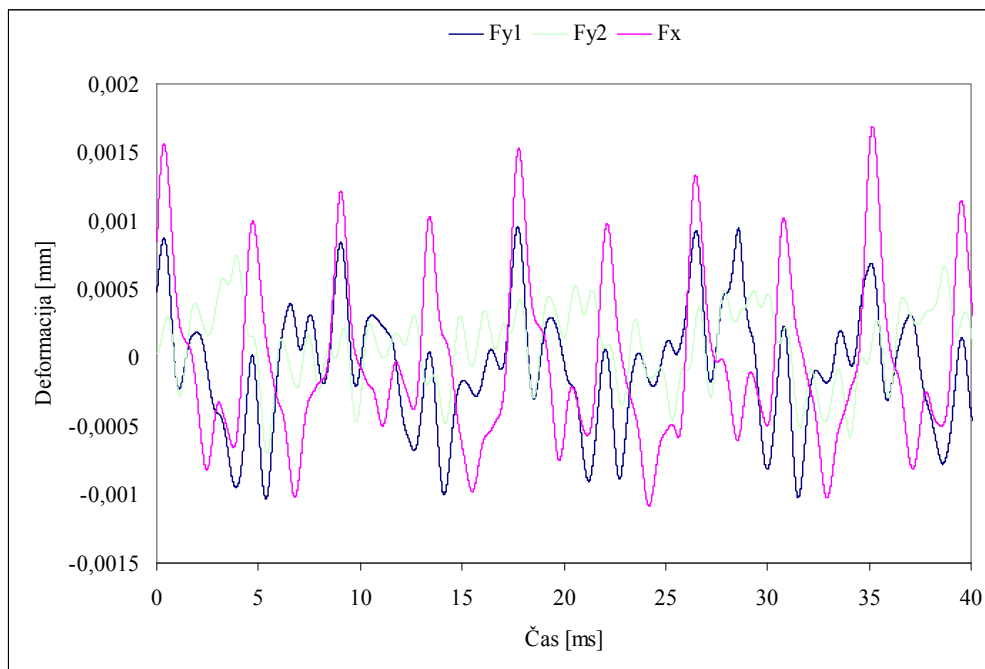
Slika A4-3 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 6 mm



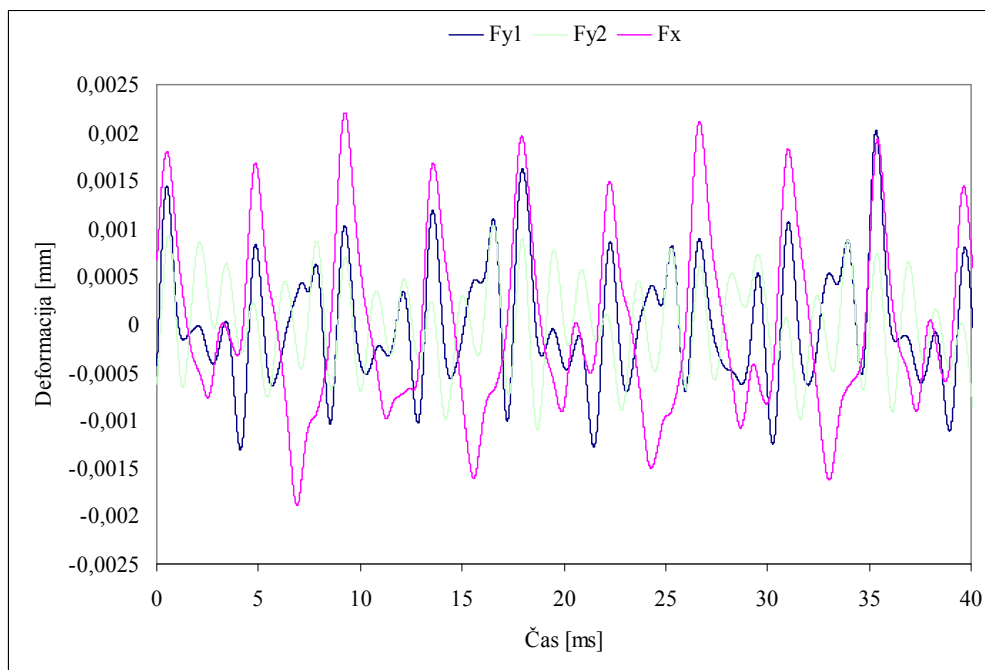
Slika A4-4 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 8 mm

PRILOGA B1

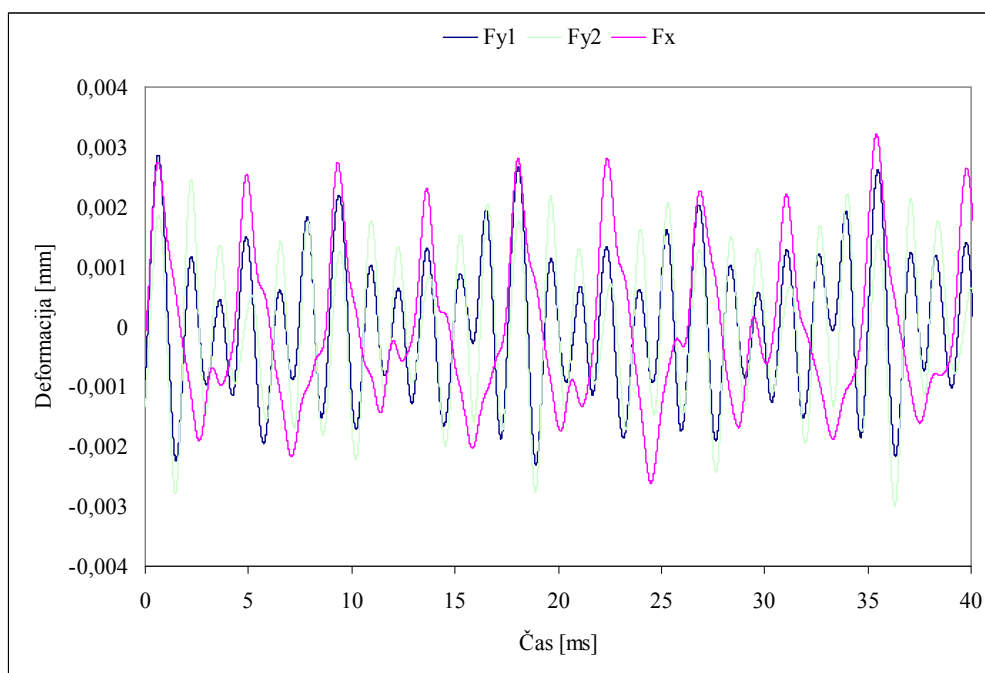
Izmerjene deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri ortogonalnem krožnem odrezovanju bukovine, njeni ravnovesni vlažnosti 12 % in podajalni hitrosti 6 m/min.



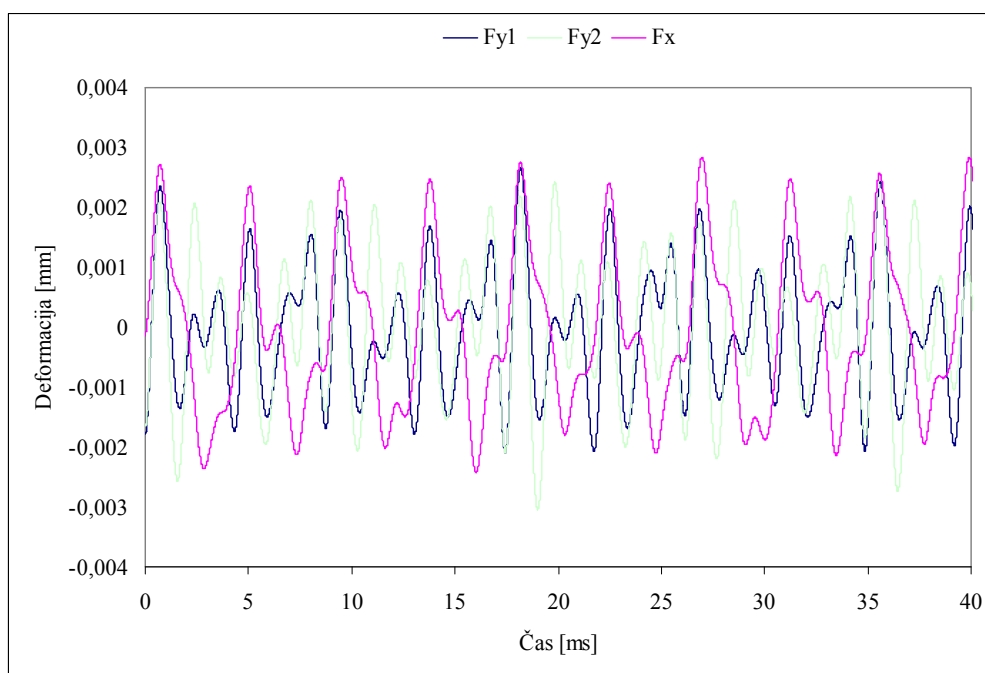
Slika B1-1 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 2 mm



Slika B1-2 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 4 mm



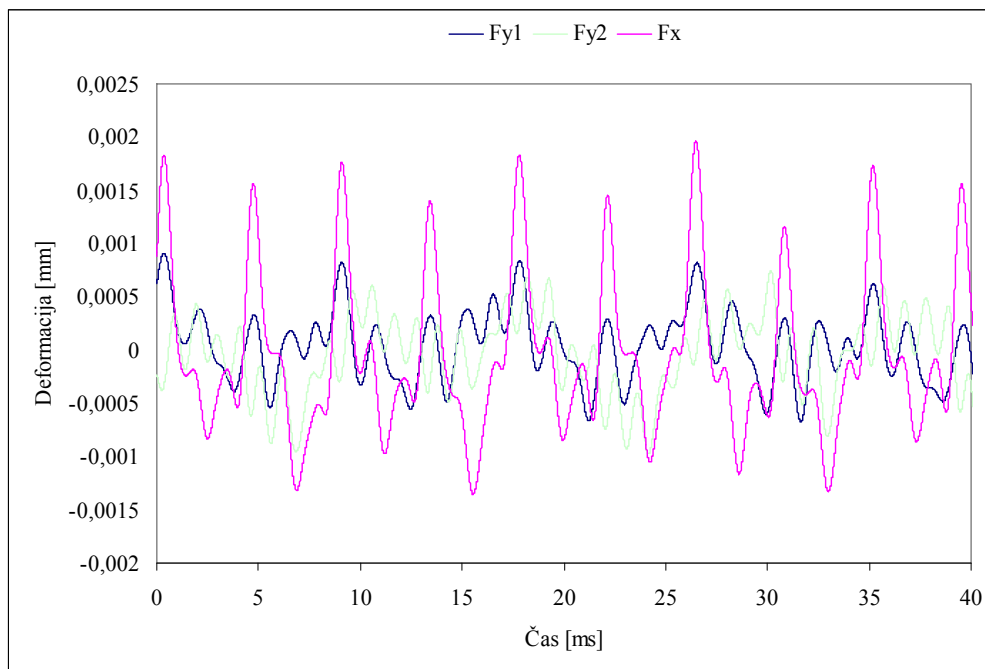
Slika B1-3 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 6 mm



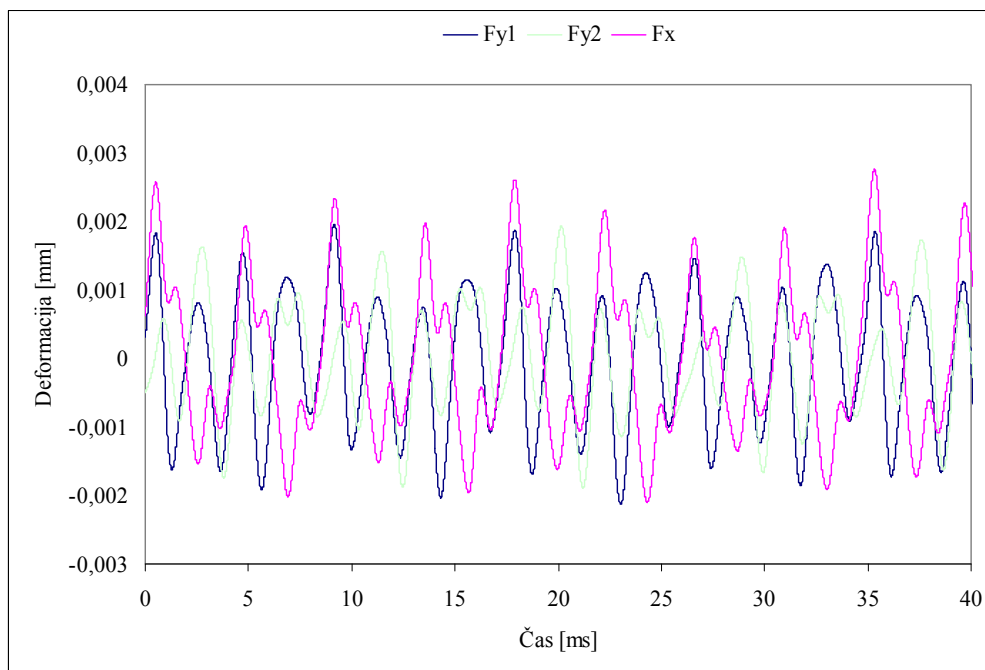
Slika B1-4 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 8 mm

PRILOGA B2

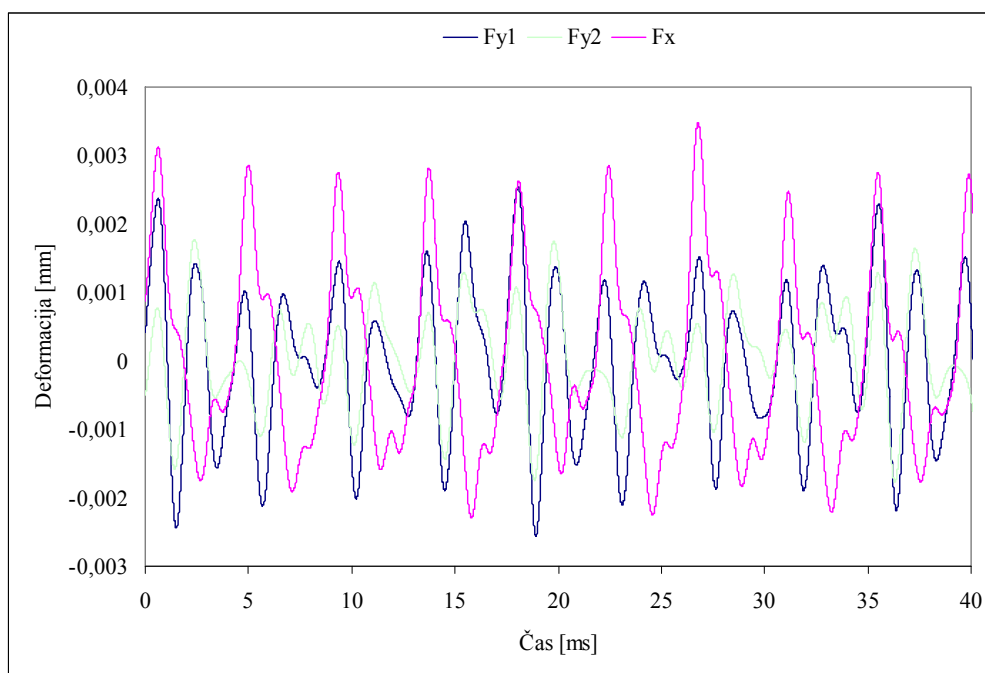
Izmerjene deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri ortogonalnem krožnem odrezovanju bukovine, njeni ravnovesni vlažnosti 12 % in podajalni hitrosti 8 m/min.



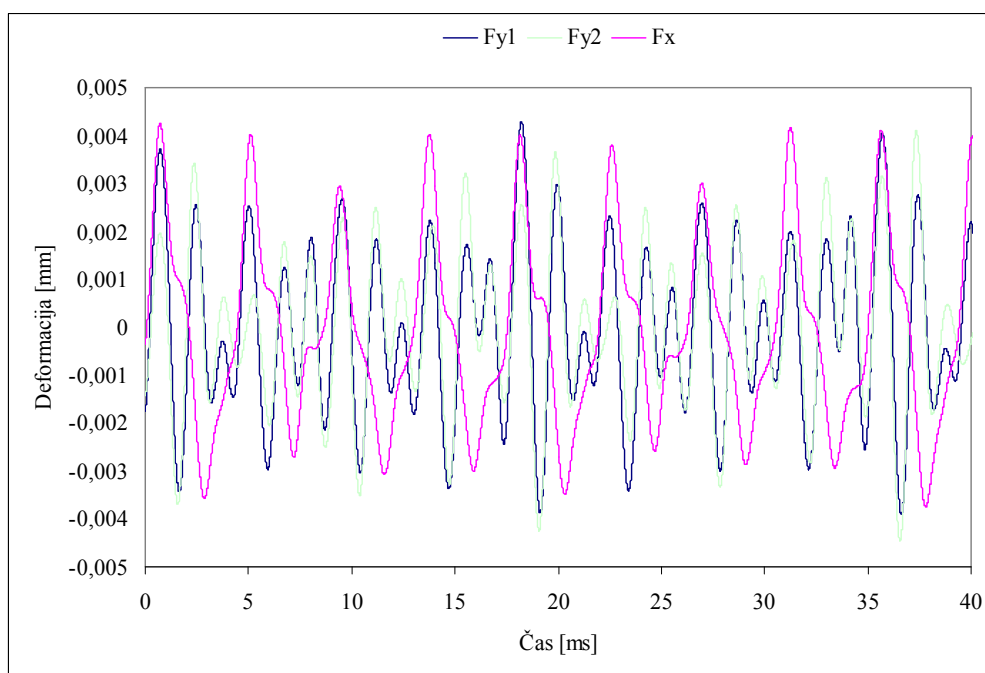
Slika B2-1 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 2 mm



Slika B2-2 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 4 mm



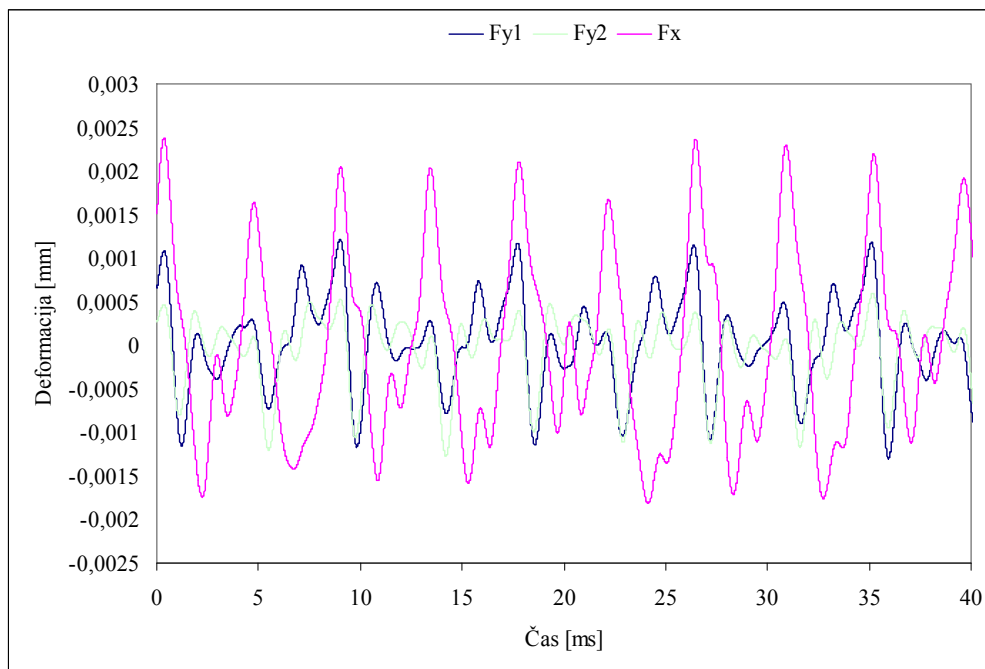
Slika B2-3 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 6 mm



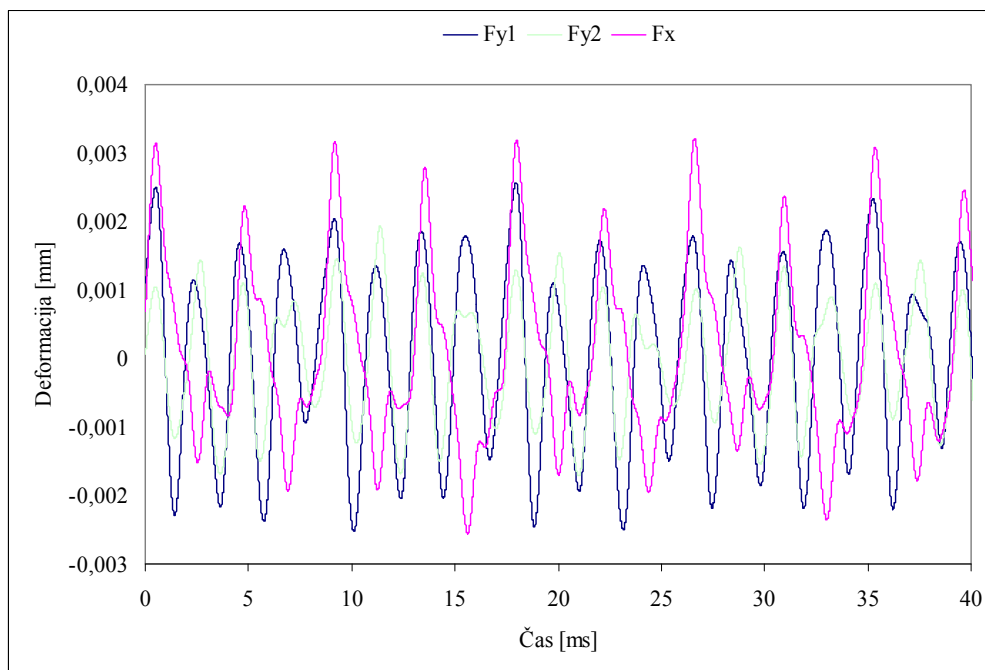
Slika B2-4 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 8 mm

PRILOGA B3

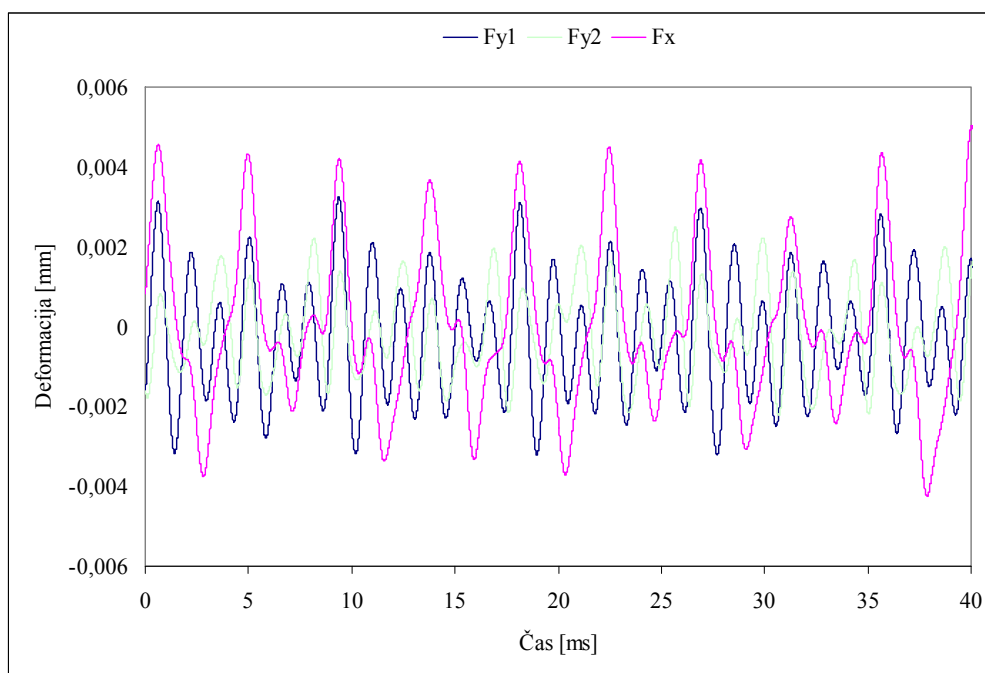
Izmerjene deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri ortogonalnem krožnem odrezovanju bukovine, njeni ravnovesni vlažnosti 12 % in podajalni hitrosti 10 m/min.



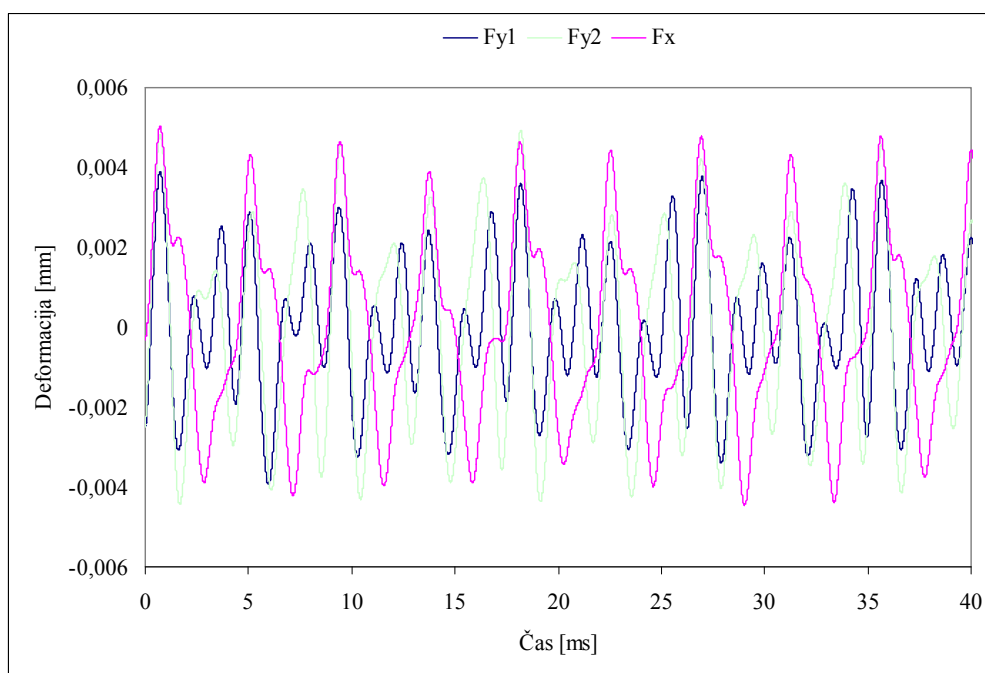
Slika B3-1 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 2 mm



Slika B3-2 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 4 mm



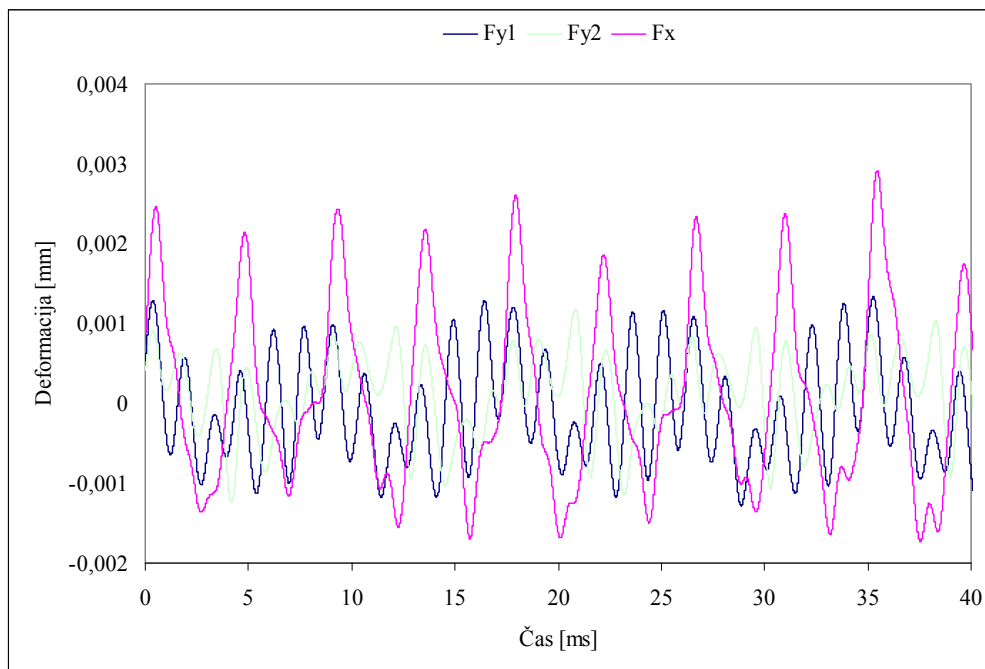
Slika B3-3 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 6 mm



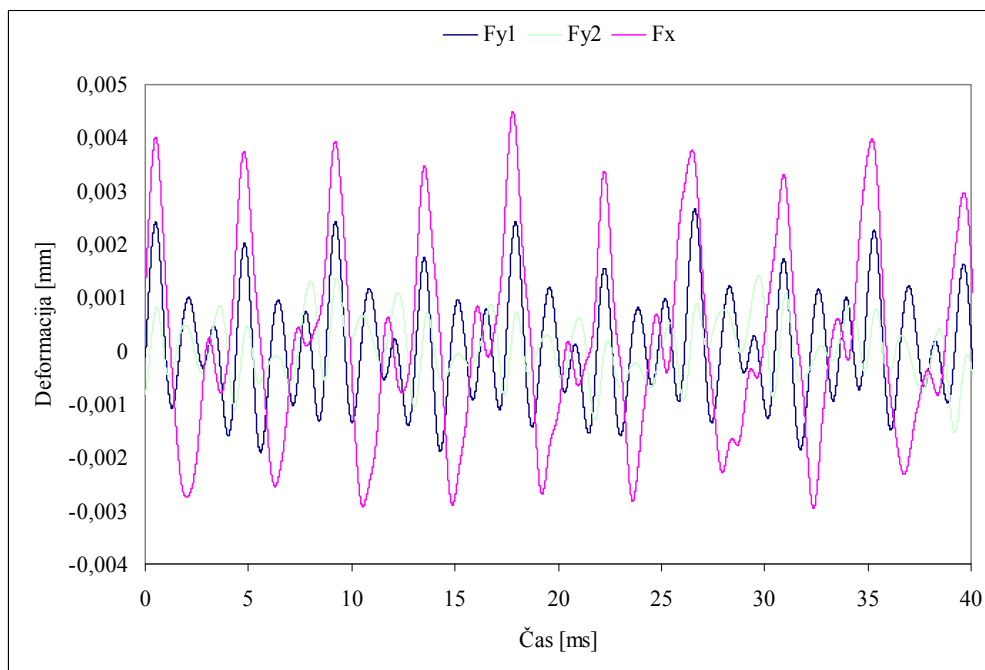
Slika B3-4 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 8 mm

PRILOGA B4

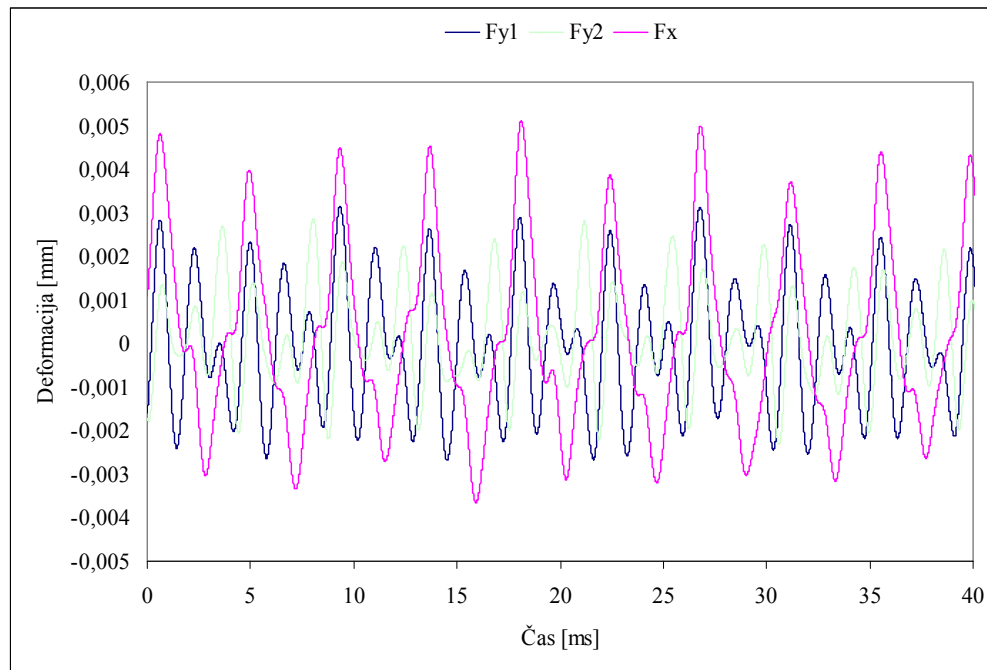
Izmerjene deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri ortogonalnem krožnem odrezovanju bukovine, njeni ravnovesni vlažnosti 12 % in podajalni hitrosti 12 m/min.



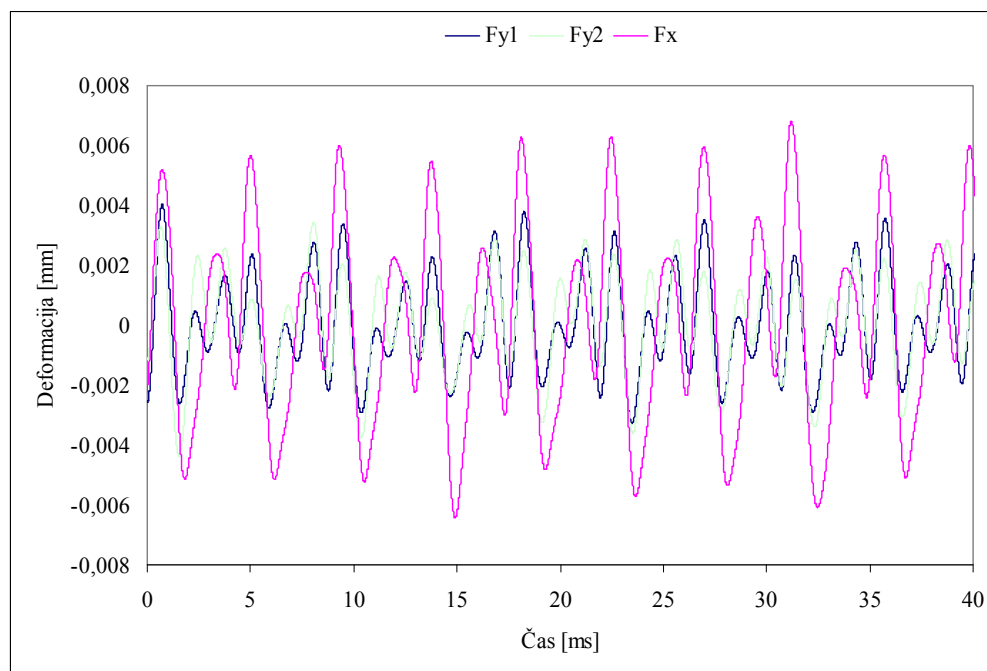
Slika B4-1 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 2 mm



Slika B4-2 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 4 mm



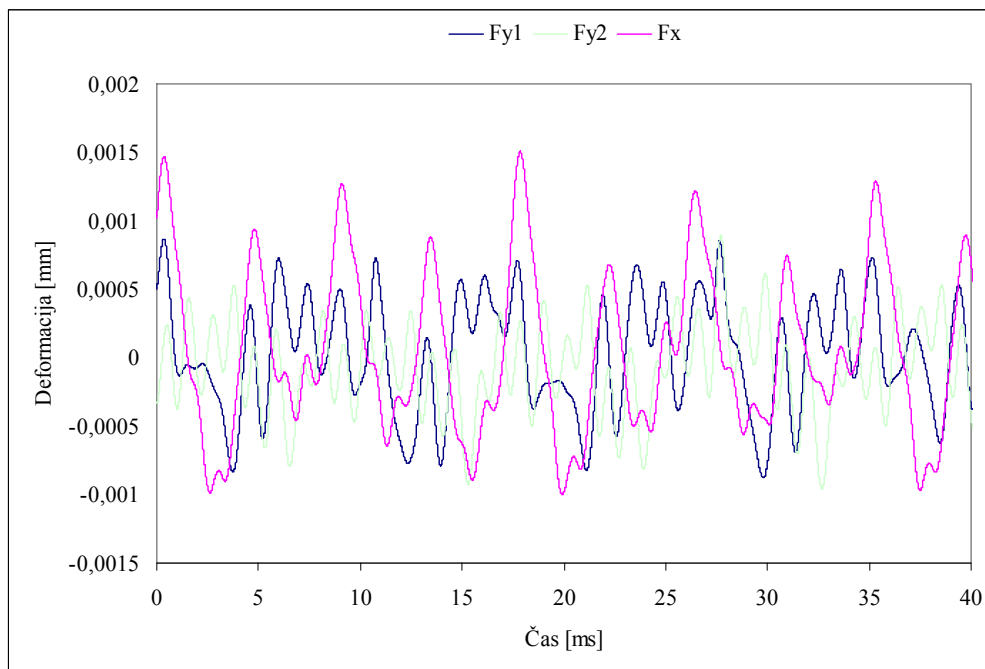
Slika B4-3 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 6 mm



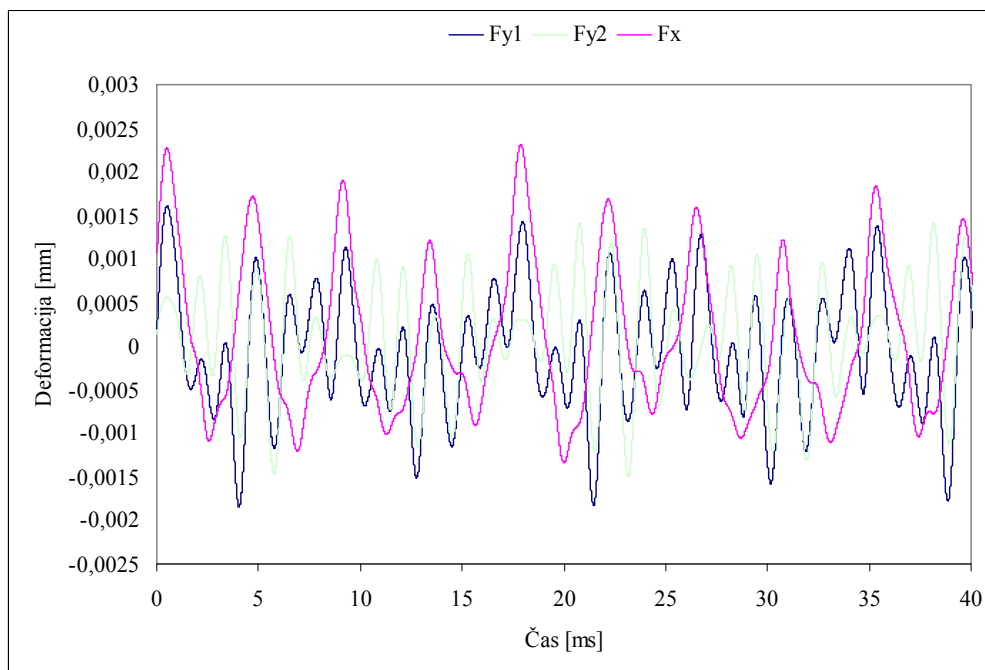
Slika B4-4 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 8 mm

PRILOGA C1

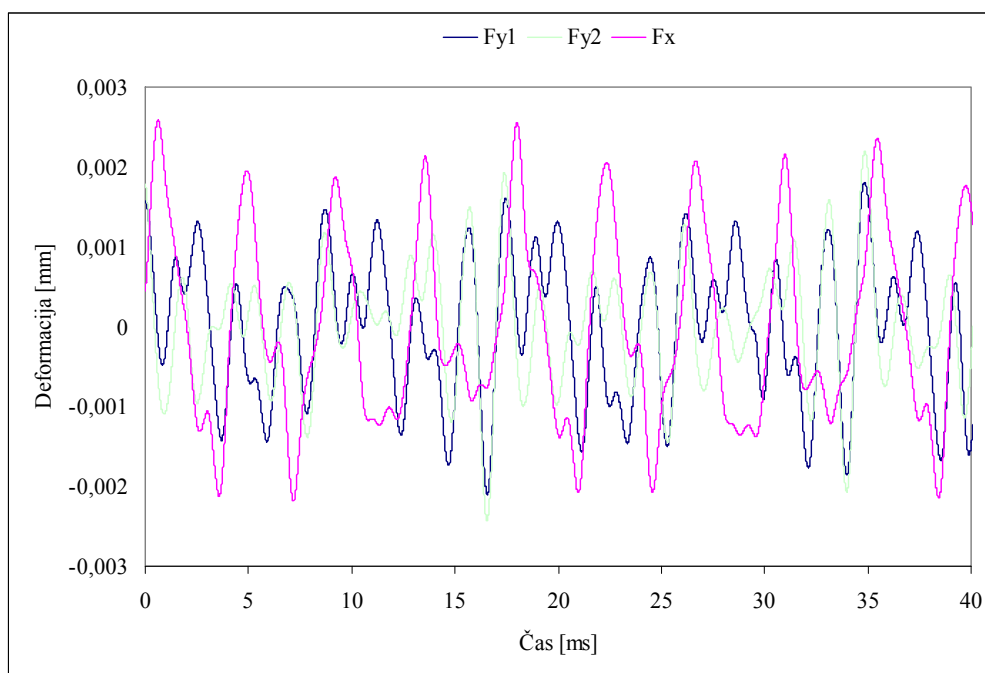
Izmerjene deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri ortogonalnem krožnem odrezovanju bukovine, njeni ravnovesni vlažnosti 18 % in podajalni hitrosti 6 m/min.



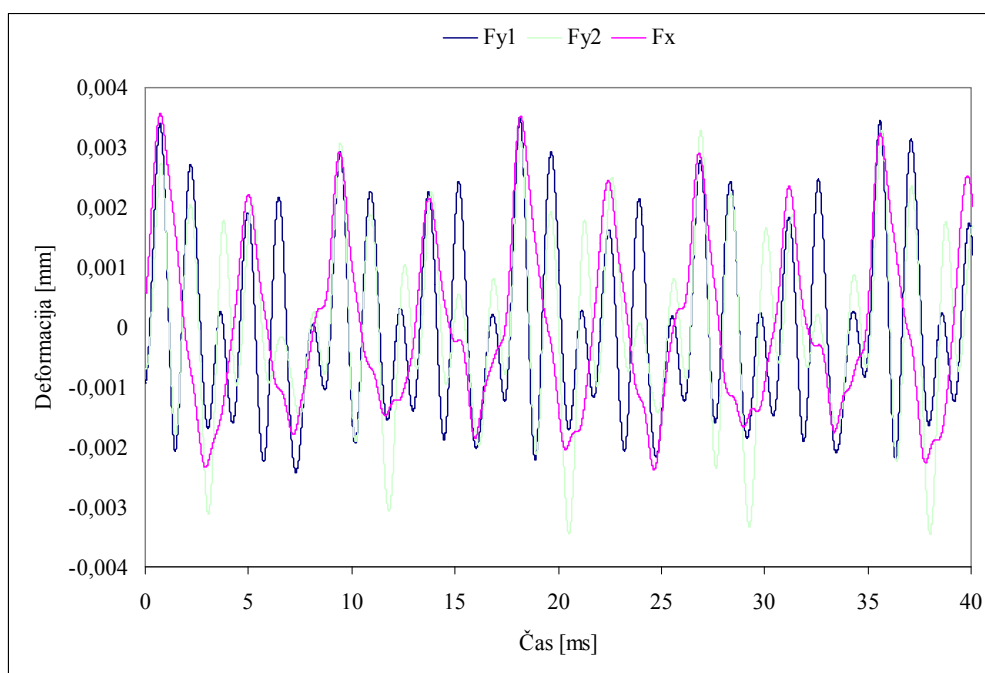
Slika C1-1 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 2 mm



Slika C1-2 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 4 mm



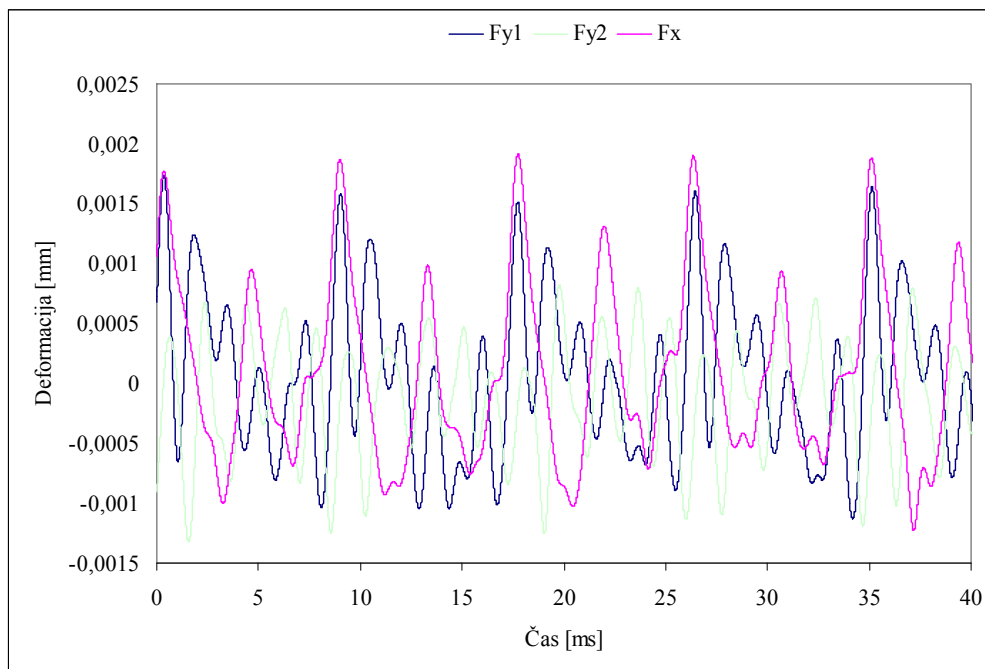
Slika C1-3 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 6 mm



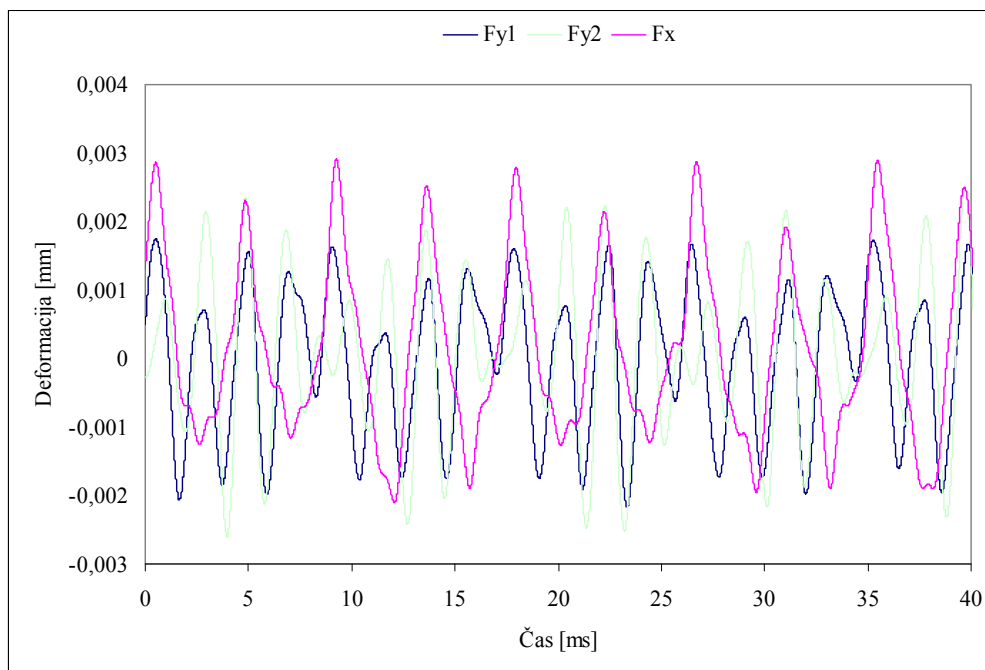
Slika C1-4 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 8 mm

PRILOGA C2

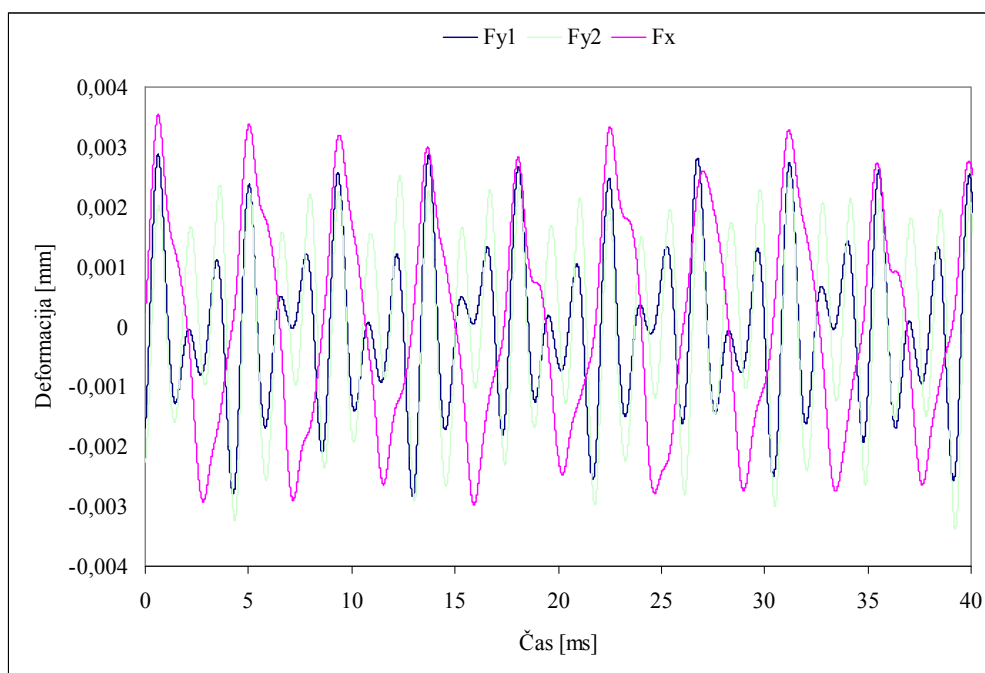
Izmerjene deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri ortogonalnem krožnem odrezovanju bukovine, njeni ravnovesni vlažnosti 18 % in podajalni hitrosti 8 m/min.



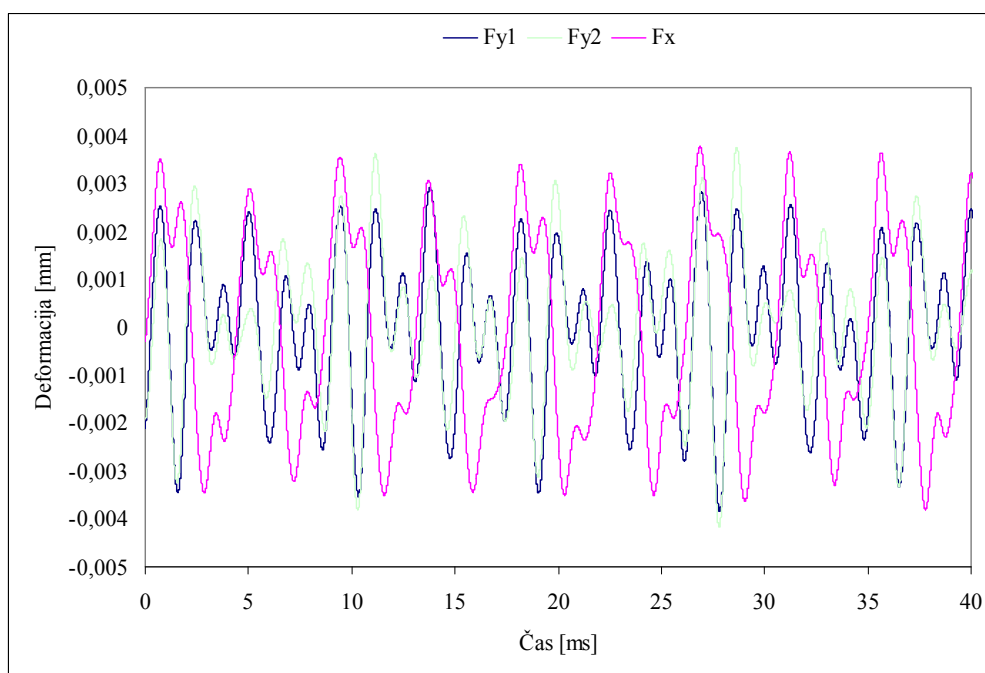
Slika C2-1 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 2 mm



Slika C2-2 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 4 mm



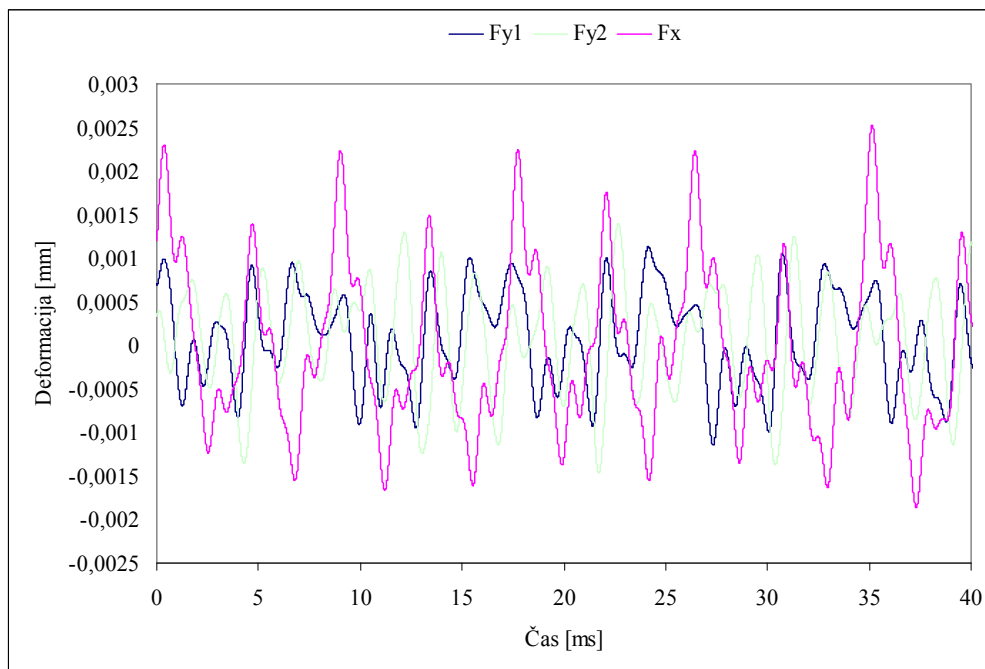
Slika C2-3 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 6 mm



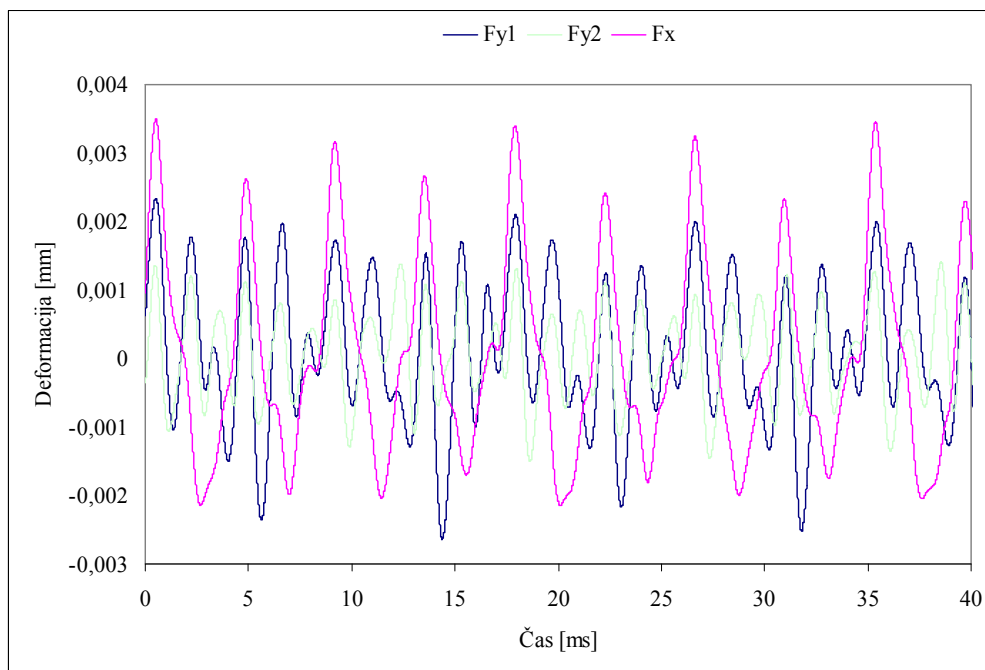
Slika C2-4 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 8 mm

PRILOGA C3

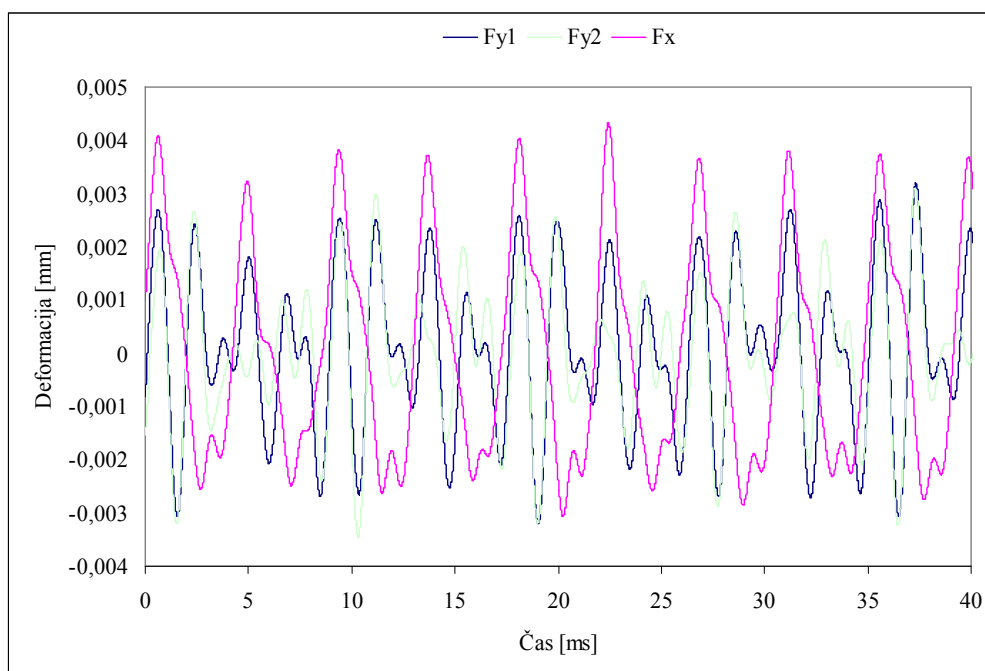
Izmerjene deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri ortogonalnem krožnem odrezovanju bukovine, njeni ravnovesni vlažnosti 18 % in podajalni hitrosti 10 m/min.



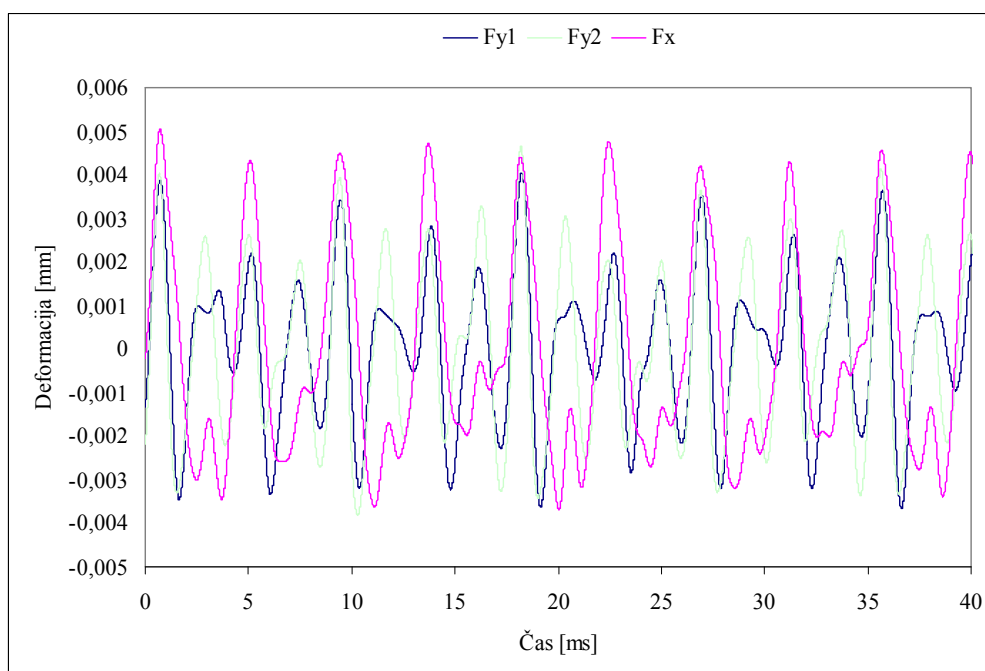
Slika C3-1 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 2 mm



Slika C3-2 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 4 mm



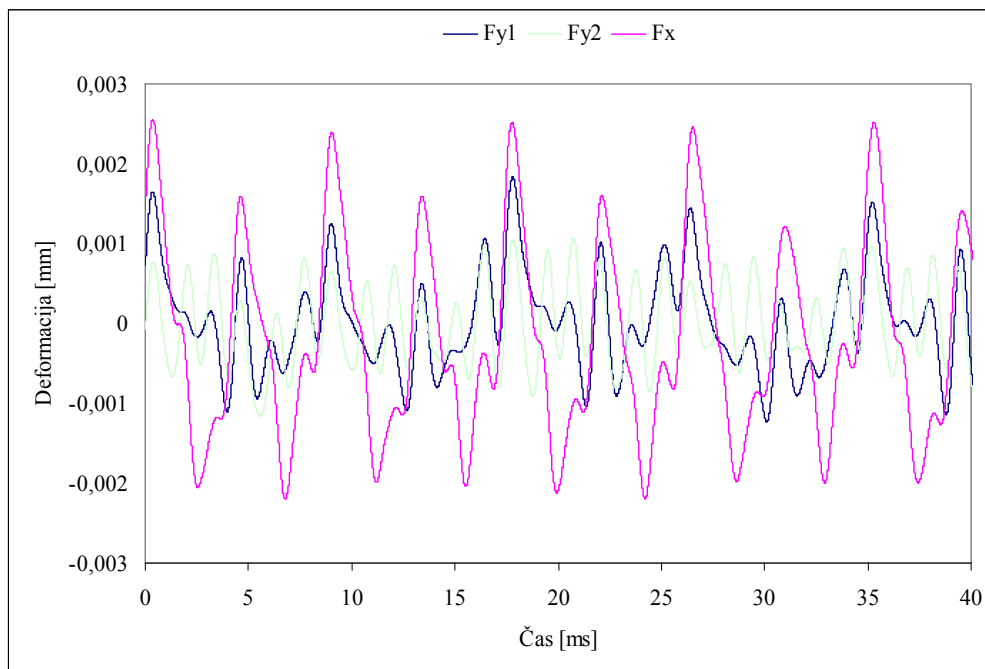
Slika C3-3 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 6 mm



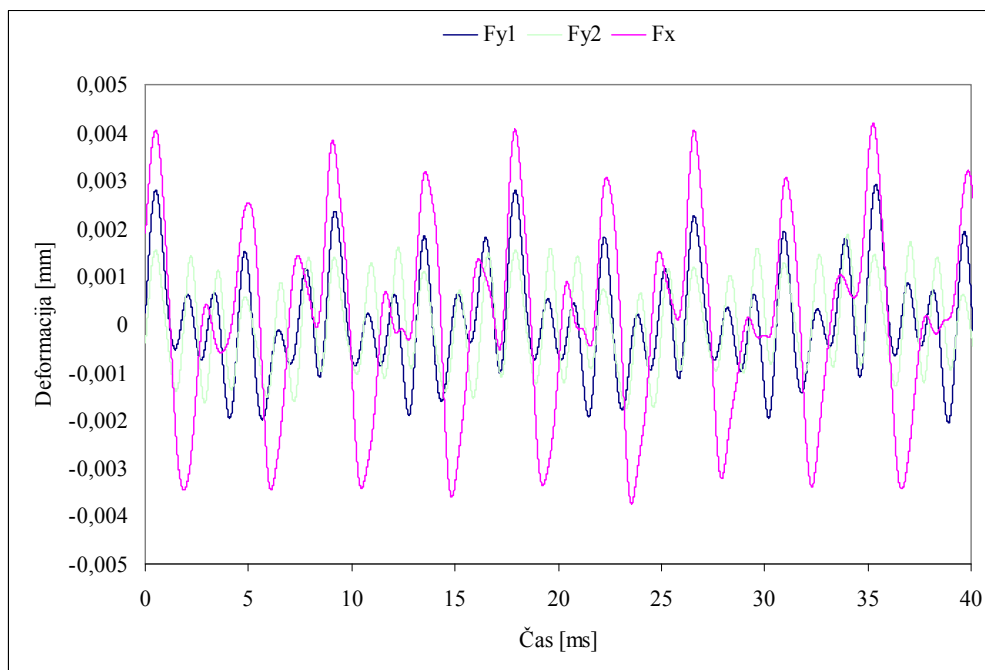
Slika C3-4 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 8 mm

PRILOGA C4

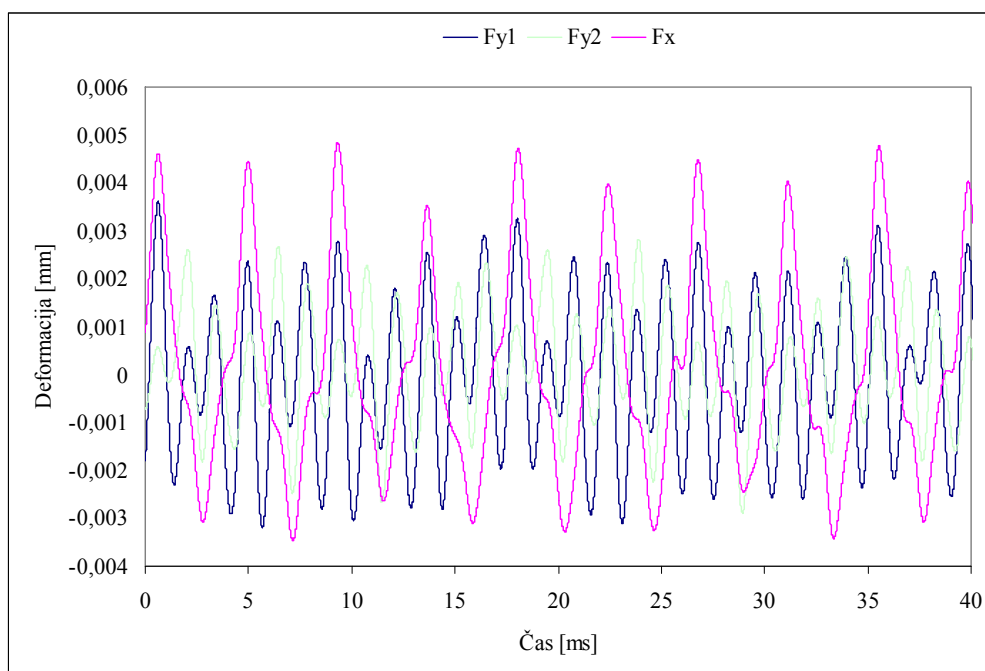
Izmerjene deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri ortogonalnem krožnem odrezovanju bukovine, njeni ravnovesni vlažnosti 18 % in podajalni hitrosti 12 m/min.



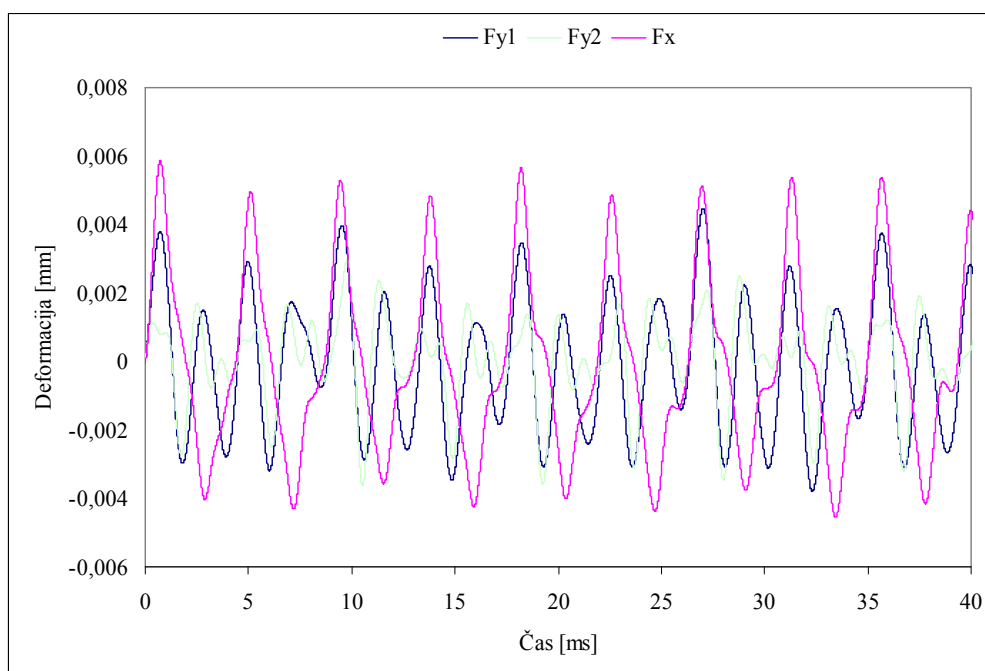
Slika C4-1 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 2 mm



Slika C4-2 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 4 mm



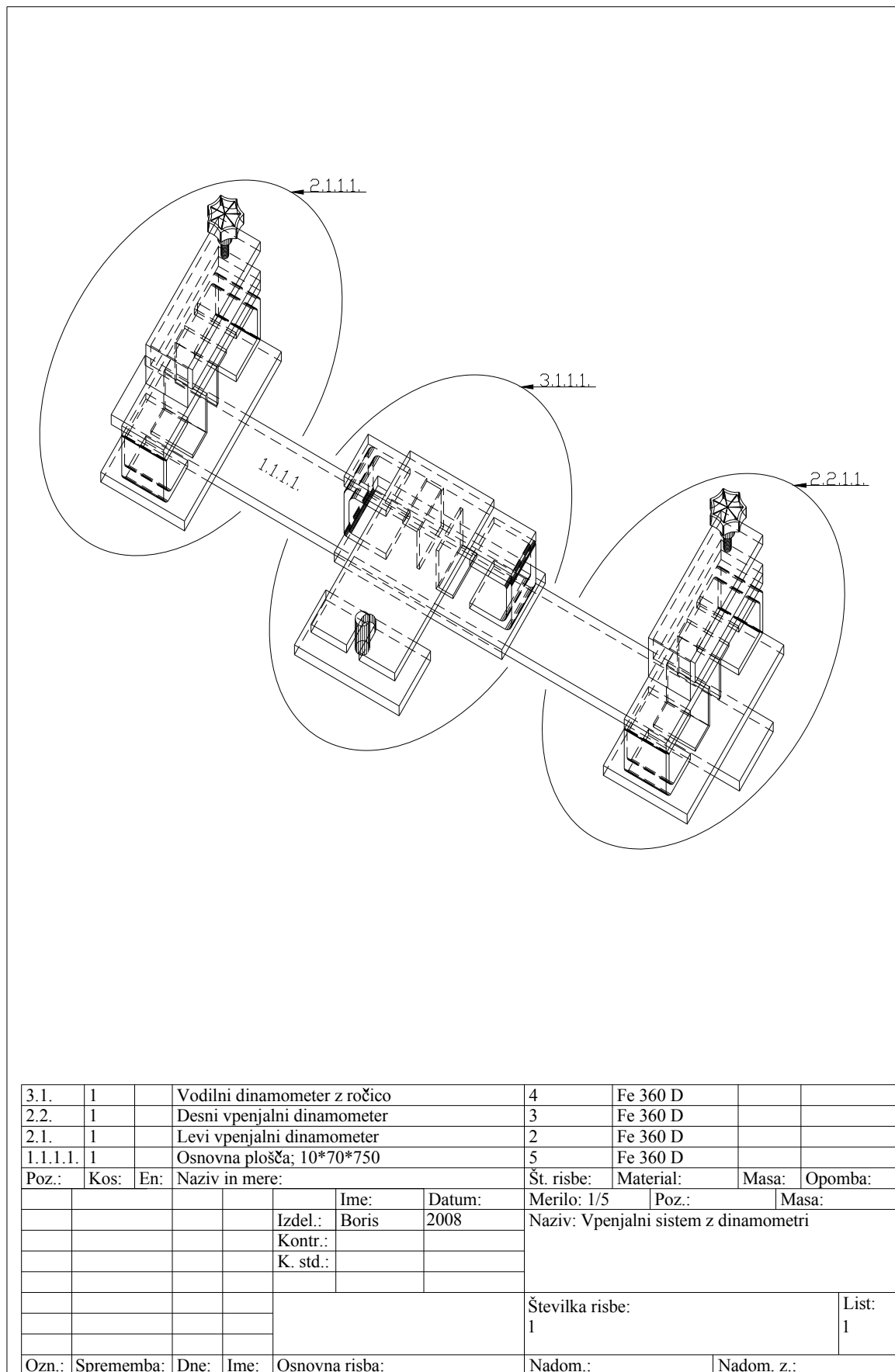
Slika C4-3 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 4 mm

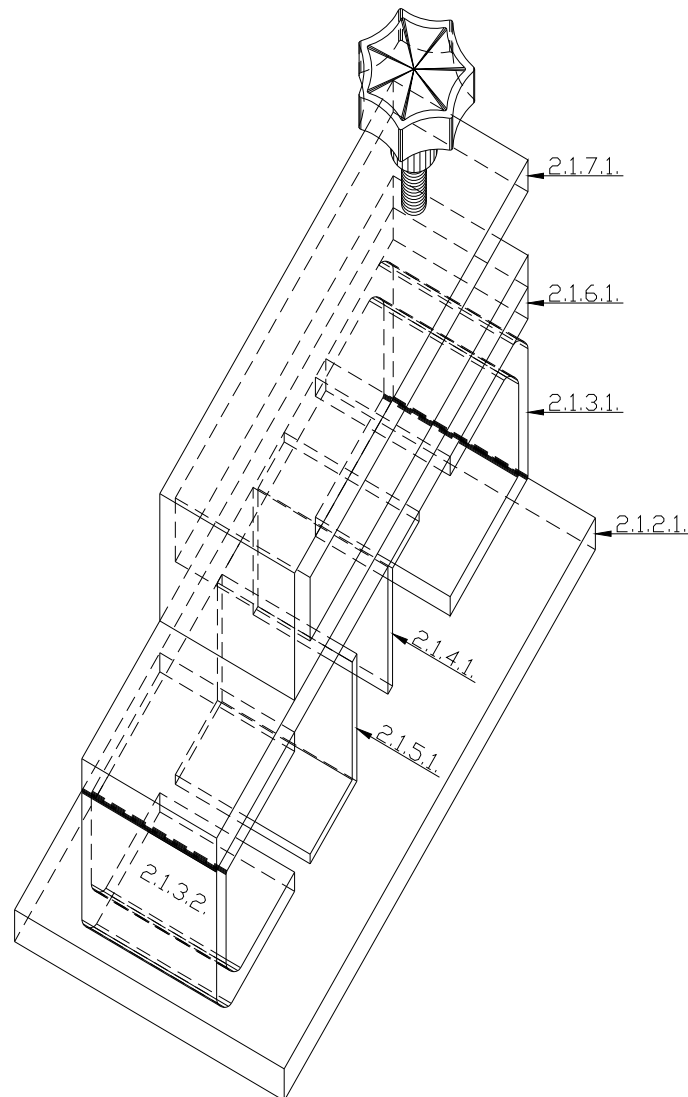


Slika C4-4 Deformacije dinamometrov F_{y1} , F_{y2} in F_x pri globini odrezovanja 8 mm

PRILOGA D4

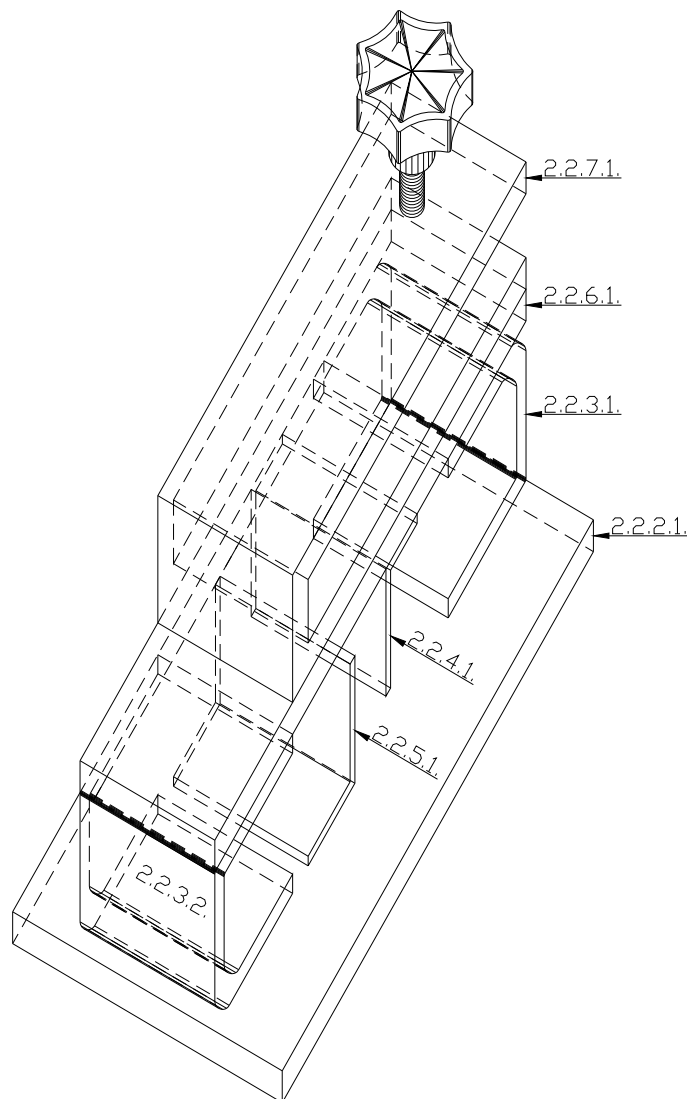
Načrt vpenjalnega sistema z dinamometri





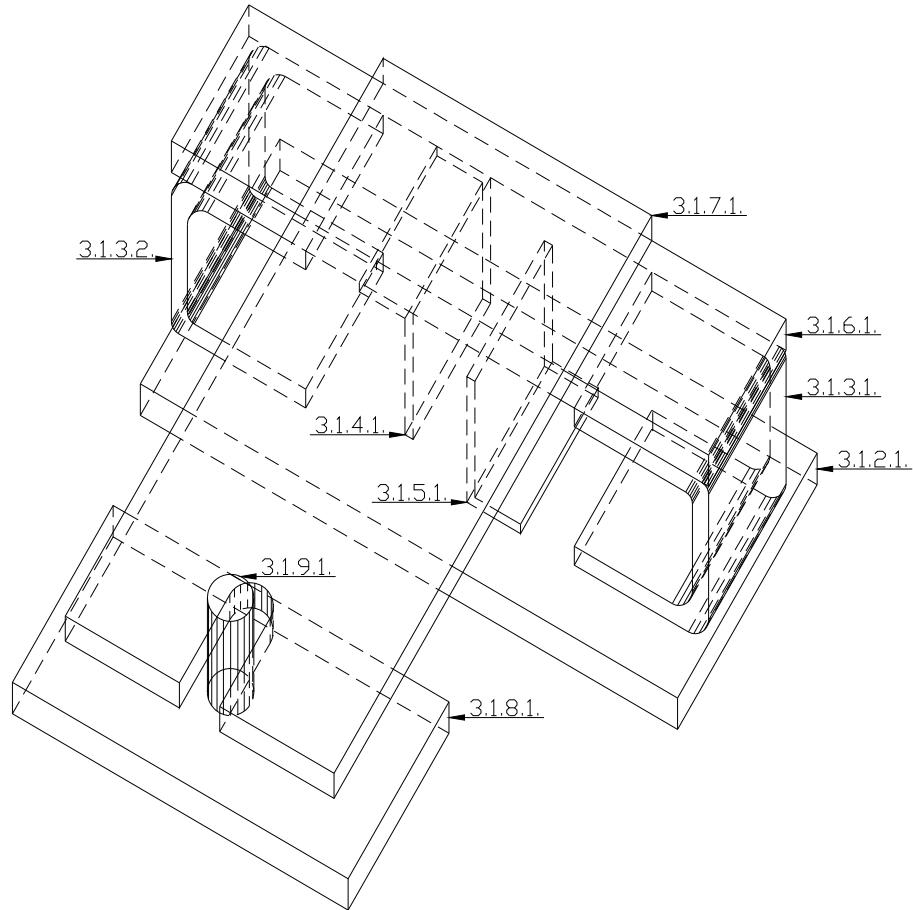
2.1.7.	1		Vpenjalo; 40*50*150	14	Fe 360 D		
2.1.6.	1		Zgornja plošča; 10*50*200	12	Fe 360 D		
2.1.5.	1		Nosilec induktivnega senzorja; 30*50*40	10	Fe 360 D		
2.1.4.	1		Tarča induktivnega senzorja; 20*50*40	9	Fe 360 D		
2.1.3.	2		Ukrivljani nosilec; 50*50*50	8	Fe 360 D		
2.1.2.	1		Spodnja plošča; 10*100*200	6	Fe 360 D		
Poz.:	Kos:	En:	Naziv in mere:	Št. risbe:	Material:	Masa:	Opomba:
			Ime:	Datum:	Merilo: 1/2	Masa:	
			Izdel.:	Boris	2008	Naziv: Levi vpenjalni dinamometer (Fy1)	
			Kontr.:				
			K. std.:				
Ozn.:	Sprememba:	Dne:	Ime:	Osnovna risba:	Nadom.:	Nadom. z.:	

Številka risbe:
2List:
2

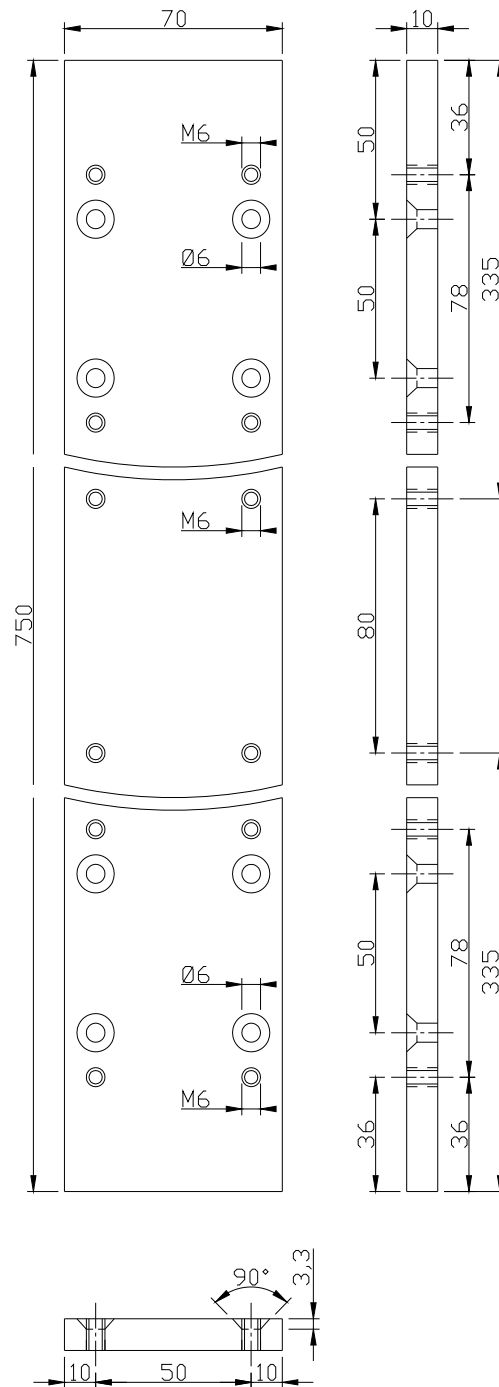


2.2.7.	1		Vpenjalo; 40*50*150	14	Fe 360 D		
2.2.6.	1		Zgornja plošča; 10*50*200	12	Fe 360 D		
2.2.5.	1		Nosilec induktivnega senzorja; 30*50*40	10	Fe 360 D		
2.2.4.	1		Tarča induktivnega senzorja; 20*50*40	9	Fe 360 D		
2.2.3.	2		Ukrivljrni nosilec; 50*50*50	8	Fe 360 D		
2.2.2.	1		Spodnja plošča; 10*100*200	6	Fe 360 D		
Poz.:	Kos:	En:	Naziv in mere:	Št. risbe:	Material:	Masa:	Opomba:
			Ime:	Datum:	Merilo: 1/2	Masa:	
			Izdel.:	Boris	2008	Naziv: Desni vpenjalni dinamometer (Fy2)	
			Kontr.:				
			K. std.:				
Ozn.:	Sprememba:	Dne:	Ime:	Osnovna risba:	Nadom.:	Nadom. z.:	

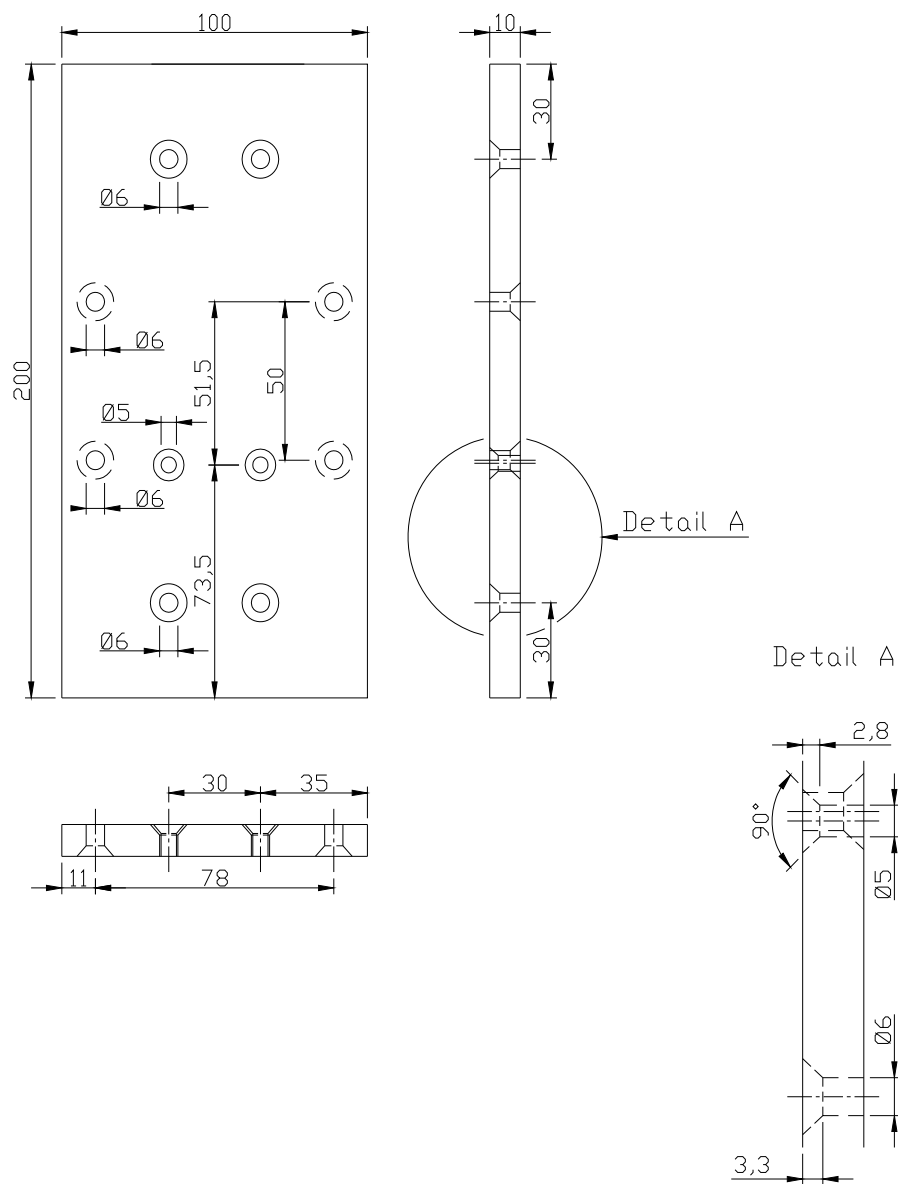
Številka risbe:
3List:
3



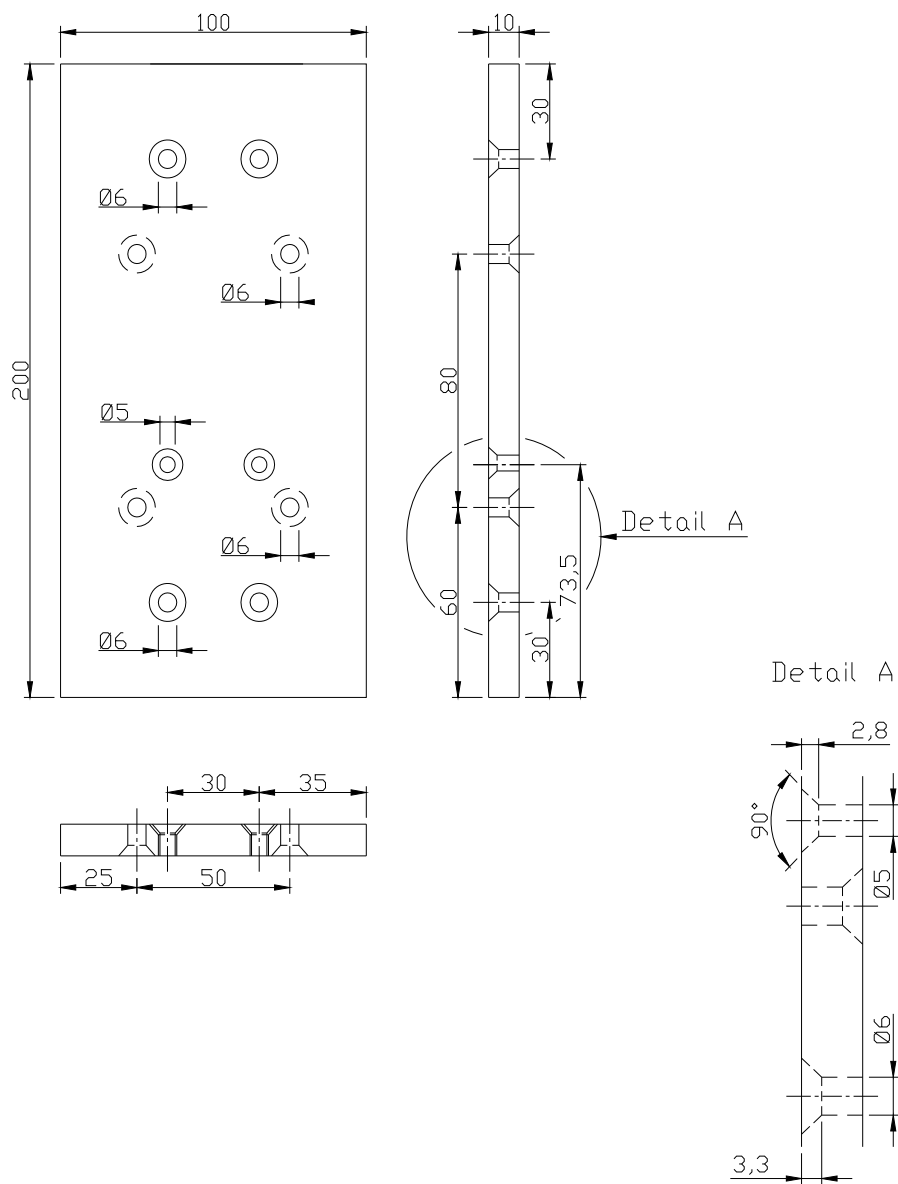
3.1.9.	1		Vodilni čep; O15*40	17	Fe 360 D		
3.1.8.	1		Vlečna plošča; 10*65*125	16	Fe 360 D		
3.1.7.	1		Ročica; 8*100*205	15	Fe 360 D		
3.1.6.	1		Zgornja plošča; 10*50*200	13	Fe 360 D		
3.1.5.	1		Nosilec induktivnega senzorja; 20*50*40	11	Fe 360 D		
3.1.4.	1		Tarča induktivnega senzorja; 20*50*40	9	Fe 360 D		
3.1.3.	2		Ukrivljrni nosilec; 50*50*50	8	Fe 360 D		
3.1.2.	1		Spodnja plošča; 10*100*200	7	Fe 360 D		
Poz.:	Kos:	En:	Naziv in mere:	Št. risbe:	Material:	Masa:	Opomba:
			Ime:	Datum:	Merilo: 1/2	Masa:	
			Izdel.:	Boris	2008	Naziv: Srednji vpenjalni dinamometer (Fx)	
			Kontr.:				
			K. std.:				
						Številka risbe:	
Ozn.:	Sprememba:	Dne:	Ime:	Osnovna risba:	Nadom.:	Nadom. z.:	List:
							4



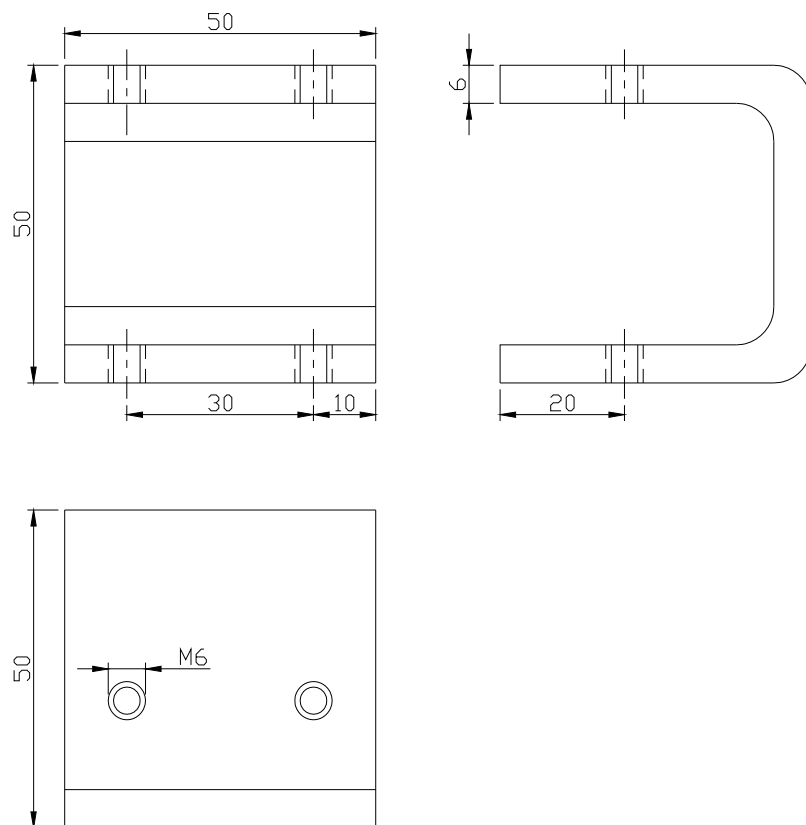
Način proiciranja:		Stanje robov: 90°		Toleranca odprtih mer: +/- 0.1		Površinska hrapavost: 0.005		Merilo: 1/2		Poz.: 1.1.1.		Masa:			
								Material, polizdelek, surovina, model št.: ISO 630 - 1980, 1052 - 1989; Fe 360 D Konstrukcijsko jeklo							
					Ime:	Datum:		Naziv: Osnovna plošča; 10*70*750							
					Izdel.:	Boris									
					Kontr.:										
					K. std.:										
								Številka risbe: 5							
Ozn.:	Sprememba:	Dne:	Ime:	Osnovna risba:				Nadom.:				Nadom. z.:			



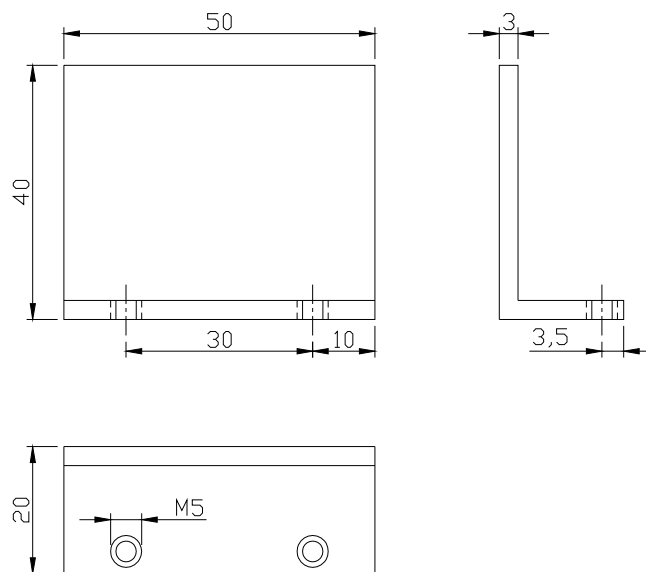
Način proiciranja:		Stanje robov: 90°		Toleranca odprtih mer: +/- 0.1		Površinska hrapavost: 0.005		Merilo: 1/1, 1/2		Poz.: 2.1.2., 2.2.2.		Masa:	
								Material, polizdelek, surovina, model št.: ISO 630 - 1980, 1052 - 1989; Fe 360 D		Konstrukcijsko jeklo			
					Ime:	Datum:		Naziv: Spodnja plošča; 10*100*200					
				Izdel.:	Boris	15.1.2007							
				Kontr.:									
				K. std.:									
								Številka risbe:				List:	
								6				6	
Ozn.:	Sprememba:	Dne:	Ime:	Osnovna risba:				Nadom.:				Nadom. z.:	



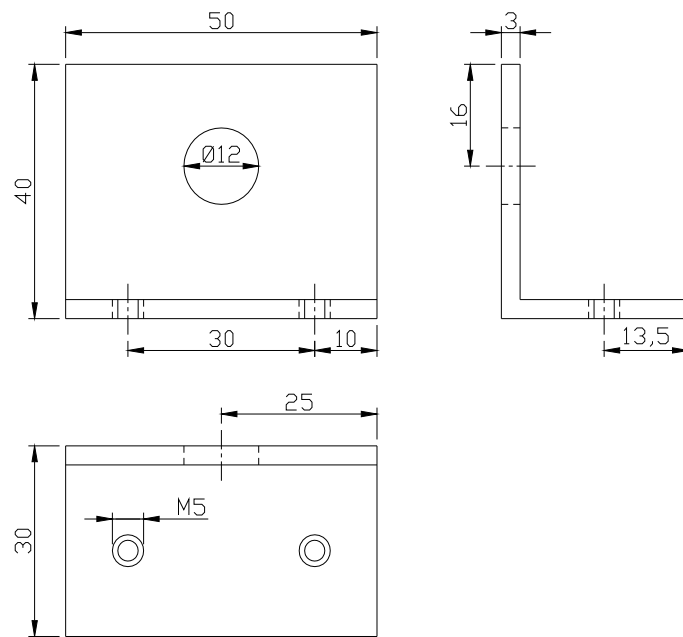
Način proiciranja:	Stanje robov:	Toleranca	Površinska	Merilo: 1/1, 1/2	Poz.: 3.1.2.	Masa:
	90°	odprtih mer:	hrapavost:	Material, polizdelek, surovina, model št.: ISO 630 - 1980, 1052 - 1989; Fe 360 D Konstrukcijsko jeklo		
		+/- 0.1	0.005	Naziv: Spodnja plošča; 10*100*200		
		Ime:	Datum:			
		Izdel.: Boris	15.1.2007			
		Kontr.:				
		K. std.:				
Ozn.:	Sprememba:	Dne:	Ime:	Osnovna risba:	Nadom.:	Nadom. z.:



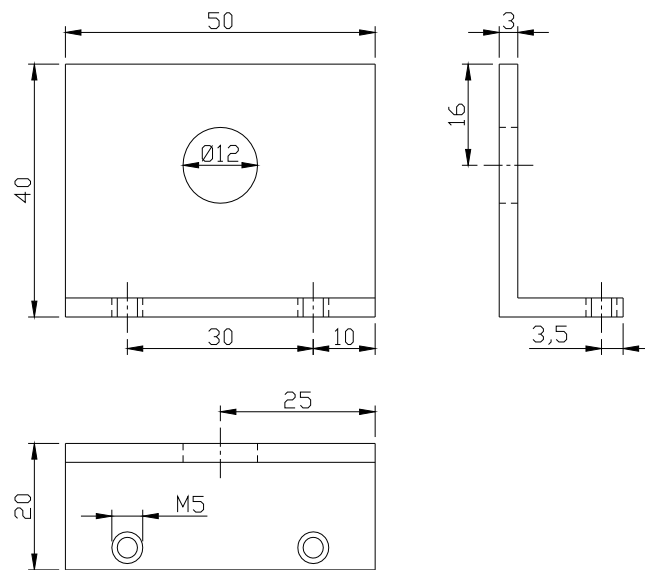
Način proiciranja:		Stanje robov: 90°		Toleranca odprtih mer: +/- 0.1		Površinska hrapavost: 0.005		Merilo: 1/1		Poz.: 2.1.3., 2.2.3., 3.1.3.			Masa:	
										Material, polizdelek, surovina, model št.: ISO 630 - 1980, 1052 - 1989; Fe 360 D Konstrukcijsko jeklo Naziv: Ukrivljeni nosilec; 50*50*50				
					Ime:	Datum:								
					Izdel.:	Boris		2008						
					Kontr.:									
					K. std.:									
Ozn.:	Sprememba:	Dne:	Ime:	Osnovna risba:				Številka risbe: 8			List: 8			
Nadom.:		Nadom. z.:												



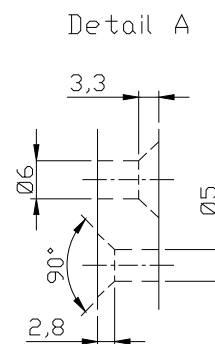
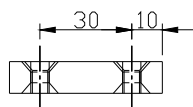
Način proiciranja:		Stanje robov: 90°		Toleranca odprtih mer: +/- 0.1		Površinska hrapavost: 0.005		Merilo: 1/1		Poz.: 2.1.4., 2.2.4., 3.1.4.		Masa:	
								Material, polizdelek, surovina, model št.:		Naziv: Tarča induktivnega senzorja; 20*50*40			
								ISO 630 - 1980, 1052 - 1989; Fe 360 D					
								Konstrukcijsko jeklo					



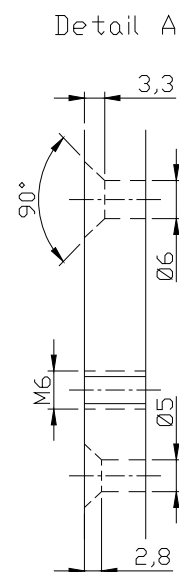
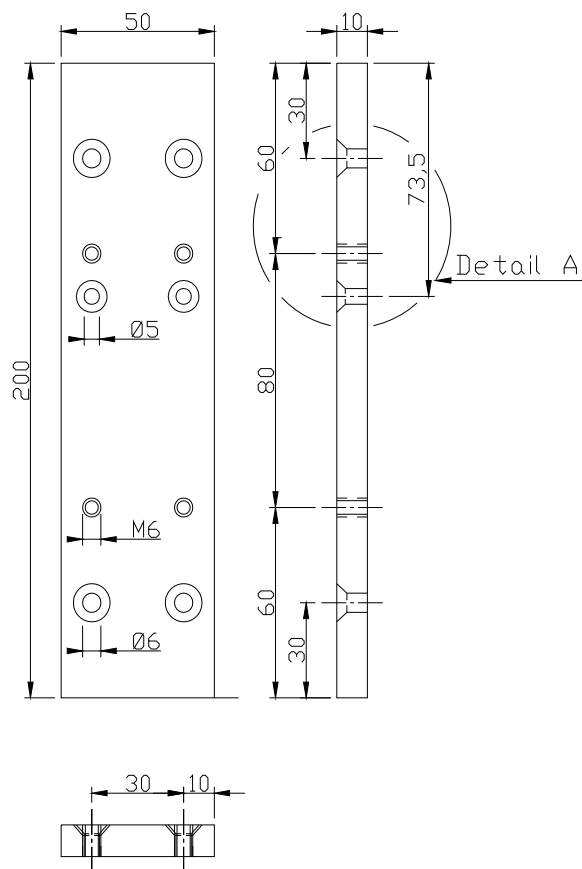
Način proiciranja:		Stanje robov: 90°		Toleranca odprtih mer: +/- 0.1		Površinska hrapavost: 0.005		Merilo: 1/1		Poz.: 2.1.5., 2.2.5.		Masa:			
								Material, polizdelek, surovina, model št.: ISO 630 - 1980, 1052 - 1989; Fe 360 D Konstrukcijsko jeklo							
					Ime:	Datum:		Naziv: Nosilec induktivnega senzorja; 30*50*40							
					Izdel.:	Boris	2008								
					Kontr.:										
					K. std.:										
								Številka risbe: 10						List: 10	
Ozn.:	Sprememba:	Dne:	Ime:	Osnovna risba:				Nadom.:				Nadom. z.:			



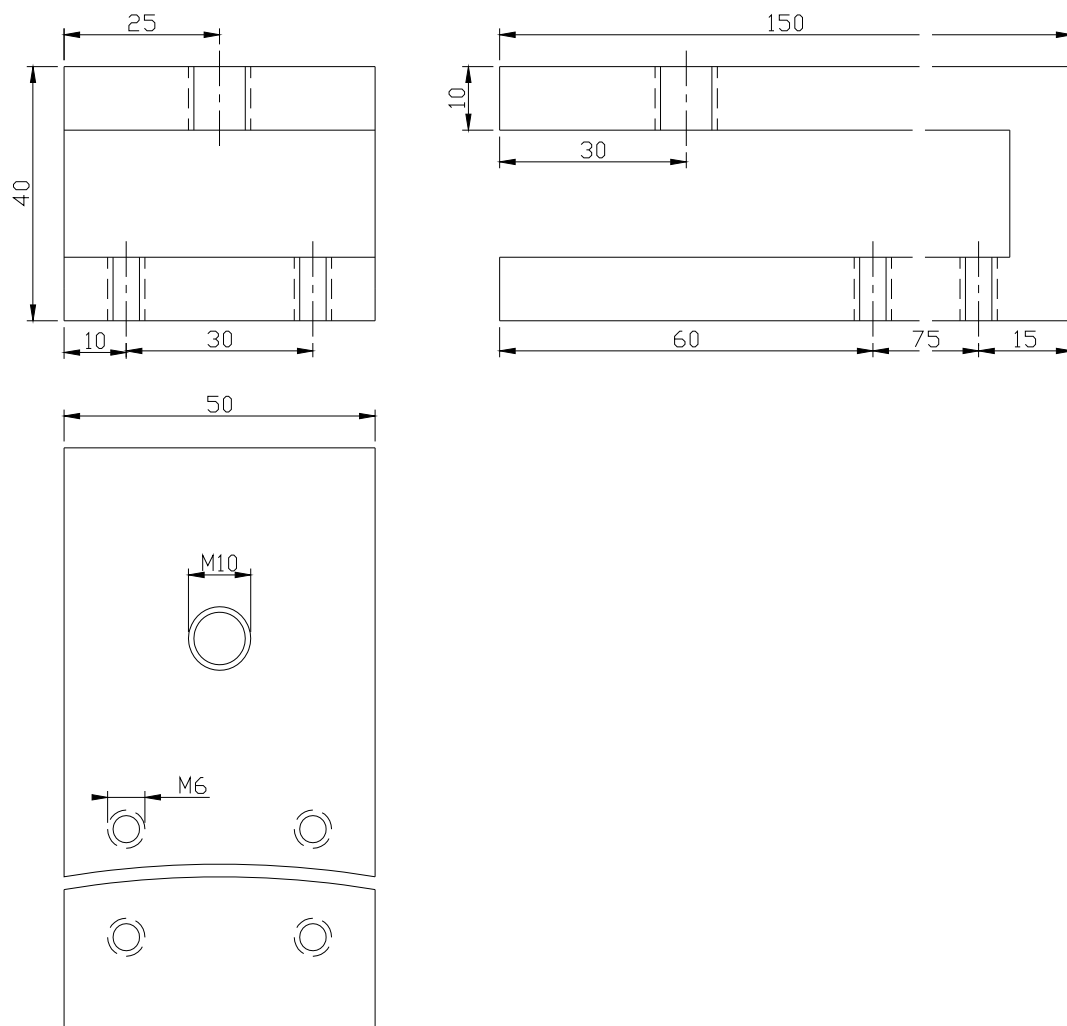
Način proiciranja:		Stanje robov: 90°		Toleranca odprtih mer: +/- 0.1		Površinska hrapavost: 0.005		Merilo: 1/1		Poz.: 3.1.5.		Masa:	



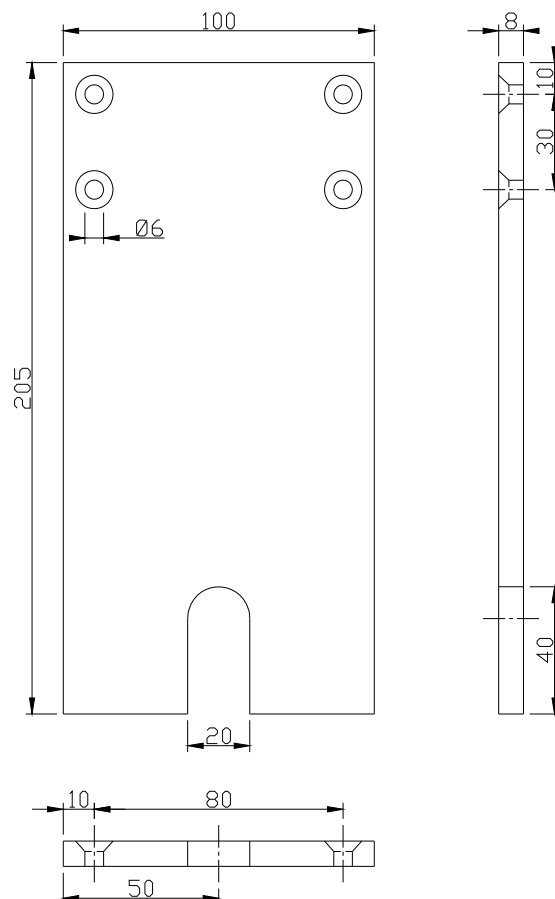
Način proiciranja:		Stanje robov: 90°		Toleranca odprtih mer: +/- 0.1		Površinska hrapavost: 0.005		Merilo: 1/1, 1/2 Poz.: 2.1.6., 2.2.6.		Masa:			
								Material, polizdelek, surovina, model št.: ISO 630 - 1980, 1052 - 1989; Fe 360 D Konstrukcijsko jeklo					
					Ime:	Datum:		Naziv: Zgornja plošča; 10*50*200					
					Izdel.:	Boris						15.1.2007	
					Kontr.:								
					K. std.:								
								Številka risbe:			List: 12		
								12					
Ozn.:	Sprememba:	Dne:	Ime:	Osnovna risba:			Nadom.:			Nadom. z.:			



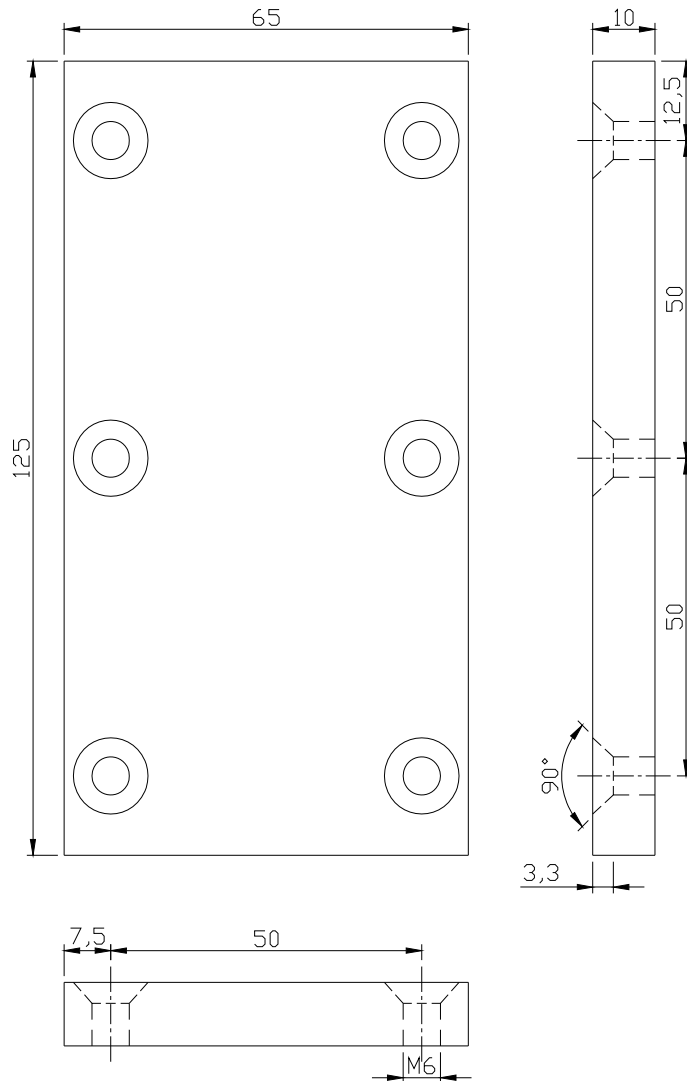
Način proiciranja:	Stanje robov: 90°	Toleranca odprtih mer: +/- 0.1	Površinska hrapavost: 0.005	Merilo: 1/1, 1/2	Poz.: 3.1.6.	Masa:
				Material, polizdelek, surovina, model št.: ISO 630 - 1980, 1052 - 1989; Fe 360 D Konstrukcijsko jeklo		
			Ime:	Datum:	Naziv: Zgornja plošča; 10*50*200	
			Izdel.:	Boris		
			Kontr.:			
			K. std.:			
					Številka risbe: 13	List: 13
Ozn.:	Sprememba:	Dne:	Ime:	Osnovna risba:	Nadom.:	Nadom. z.:



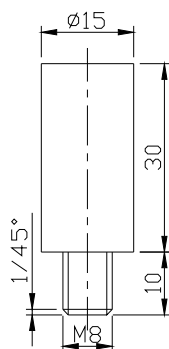
Način proiciranja:		Stanje robov: 90°		Toleranca odprtih mer: +/- 0.1		Površinska hrapavost: 0.005		Merilo: 1/1		Poz.: 2.1.2., 2.2.2.		Masa:	
								Material, polizdelek, surovina, model št.: ISO 630 - 1980, 1052 - 1989; Fe 360 D Konstrukcijsko jeklo					
					Ime:	Datum:		Naziv: Vpenjalo; 40*50*150					
					Izdel.:	2008							
					Kontr.:								
					K. std.:								
					Številka risbe: 14						List: 14		
Ozn.:	Sprememba:	Dne:	Ime:	Osnovna risba:				Nadom.:			Nadom. z.:		



Način proiciranja:		Stanje robov: 90°		Toleranca odprtih mer: +/- 0.1		Površinska hrapavost: 0.005		Merilo: 1/2		Poz.: 3.1.7.		Masa:	
								Material, polizdelek, surovina, model št.: ISO 630 - 1980, 1052 - 1989; Fe 360 D Konstrukcijsko jeklo					
					Ime:	Datum:		Naziv: Ročica; 8*100*205					
				Izdel.:	Boris	2008							
				Kontr.:									
				K. std.:									
					Številka risbe: 15						List: 15		
Ozn.:	Sprememba:	Dne:	Ime:	Osnovna risba:				Nadom.:			Nadom. z.:		



Način proiciranja:		Stanje robov: 90°		Toleranca odprtih mer: +/- 0.1		Površinska hrapavost: 0.005		Merilo: 1/1		Poz.: 3.1.8.		Masa:			
								Material, polizdelek, surovina, model št.: ISO 630 - 1980, 1052 - 1989; Fe 360 D Konstrukcijsko jeklo							
					Ime:	Datum:		Naziv: Vlečna plošča; 10*65*125							
					Izdel.:	Boris								2008	
					Kontr.:										
					K. std.:										
								Številka risbe: 16						List: 16	
Ozn.:	Sprememba:	Dne:	Ime:	Osnovna risba:				Nadom.:				Nadom. z.:			



Način proiciranja:		Stanje robov: 90°		Toleranca odprtih mer: +/- 0.1		Površinska hrapavost: 0.005		Merilo: 1/1		Poz.: 3.1.9.		Masa:			
								Material, polizdelek, surovina, model št.: ISO 630 - 1980, 1052 - 1989; Fe 360 D Konstrukcijsko jeklo							
					Ime:	Datum:		Naziv: Vlečni čep; O15*40							
					Izdel.:	Boris								2008	
					Kontr.:										
					K. std.:										
											Številka risbe:		List: 17		
											17				
Ozn.:	Sprememba:	Dne:	Ime:	Osnovna risba:				Nadom.:			Nadom. z.:				