

Vaja V:

PIEZO SENZORJI

Merjenje rezalnih sil pri struženju



Kazalo

1	Namen.....	3
2	Definicija naloge	3
3	Merilni sistem	4
3.1	Troosni senzor Kistler	4
3.2	Merilni sistem na stružnici.....	5
4	Potek vaje	7
4.1	Prvi del vaje	7
4.2	Drugi del vaje	9
5	Meritev 3	12
6	Meritev 4	13
7	Meritev 5	14
8	Meritev 6	15
8.1	Histogram	16
9	Meritev 7	16
10	Meritev 8	17
11	Meritev 9	18
12	Meritev 10	19
13	Zaključek.....	20
14	Literatura.....	21
15	Priloga I - Oblika preračuna v Excelu.....	22

1 Namen

Namen vaje je spoznati lastnosti piezo senzorjev in njihovo uporabo pri merjenju sil.

2 Definicija naloge

Pri spremembi mehanskega napetostnega stanja v določenih materialih se spremenijo njihove električne lastnosti. Generira se količina elektrenine in obratno, pri priklopu električne napetosti se material deformira. Pri tej vaji spoznamo tovrsten material in sicer PIEZO SENZOR, s katerim moramo izmeriti rezalne sile pri struženju.

- **Kalibracija piezoelektričnega merilnega sistema**

Piezoelektrični merilni sistem moramo skalibrirati tako, da bo izhodna napetost proporcionalna mehanski obremenitvi na piezoelektričnem senzorju. Uporabiti moramo znano obremenitev in nastaviti občutljivost nabojnega ojačevalnika. Odčitati nastavljeni faktor K_q !

- **Meritve časovne konstante piezoelektričnega merilnega sistema**

Določi, kakšna je časovna konstanta piezoelektričnega merilnega sistema pri treh nastavitvah ojačevalnika (long, medium, short). Rezultate meritev vpiši v tabelo!

- **Meritve linearnosti piezoelektričnega merilnega sistema**

Določi linearnost kalibriranega piezoelektričnega sistema. Piezoelektrični senzor obremeni z znanimi obremenitvami in rezultate vpiši v tabelo. Ponovi test za razbremenjevanje. Določi regresijsko premico in korelacijske koeficiente povezave mehanskih in električnih veličin.

- **Meritve lastnih frekvenc držala stružnega noža**

Določi lastno frekvenco stružnega noža v odvisnosti od vpetja.

- **Analiza meritev rezalnih sil pri struženju**

Določi statično in dinamično komponento (srednja vrednost in standardna deviacija) časovnega poteka rezalnih sil v 'N', za izmerjene vzorce. Za enega od filtriranih signalov pokažite razporeditev vzorcev v histogramu. Izmerjene vzorce rezalnih sil prikažite tudi v grafični obliki, enote ordinate naj bodo 'N', enote abscise pa 'ms'. Za določitev enot uporabite podatke iz tabele 1 in podatke o nastavitvah merilne verige med izvajanjem eksperimentov.

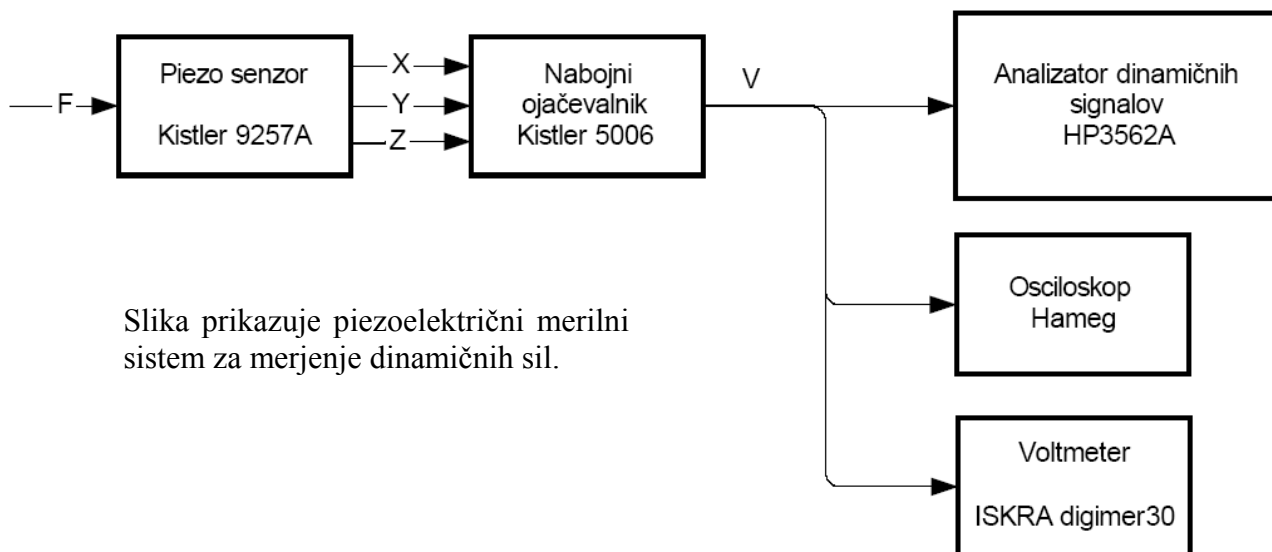
Grafično prikažite tudi enega od močnostnih spektrov zajetih signalov in ga na kratko komentirajte. Enota na abscisi je frekvenca v 'Hz', ordinata naj bo prikazana v logaritmični skali.

- **Poročilo**

Poleg navedenih zahtev naj bodo v poročilu zajete meritve in opis meritev, blokovna shema z nastavitvami komponent merilnega sistema, grafični prikaz rezultatov, srednje vrednosti in standardne deviacije ter spekter moči.

3 Merilni sistem

3.1 Troosni senzor Kistler



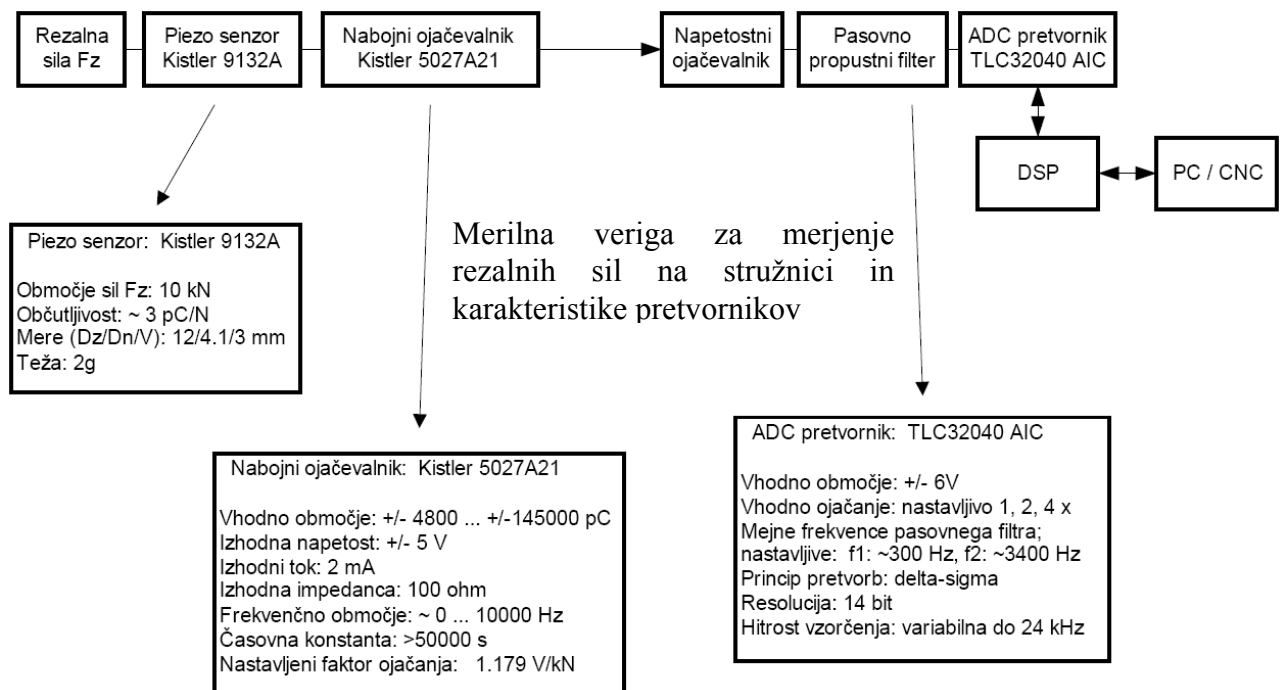
Slika prikazuje piezoelektrični merilni sistem za merjenje dinamičnih sil.

Merilni sistem sestavljajo:

- Troosni piezoelektrični dinamometer Kistler 9257A
- Tije nabojni ojačevalniki Kistler 5006
- Analizator dinamičnih signalov HP 3526A
- Osciloskop Hameg
- Univerzalni digitalni voltmeter Iskra digimeter 30



3.2 Merilni sistem na stružnici



Merilni sistem sestavljajo:

- enosni piezoelektrični senzor Kistler 9132A
- nabojni ojačevalnik Kistler 5027A
- A/D pretvornik Texas Instruments TLC32040
- DSP procesor Texas Instruments TMS320 c31
- PC računalnik

Rezalno orodje in senzor rezalnih sil



Stružnica



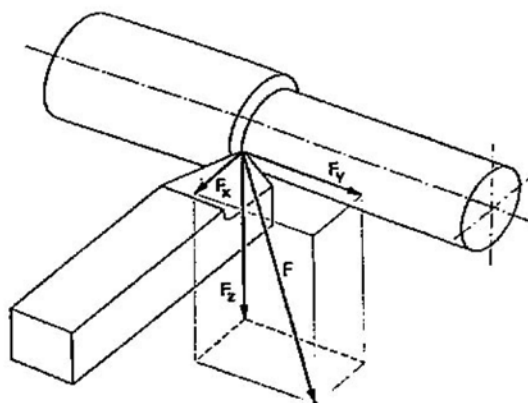
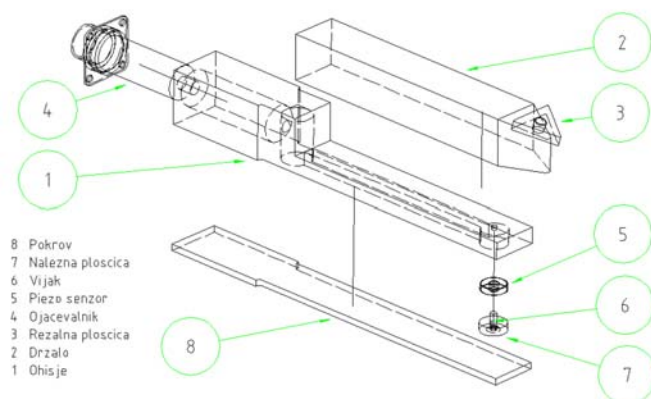
Ojačevalnik naboja Kistler



Tabela kalibracijskih podatkov za senzor rezalnih sil:

Sila [N]	Meritev [V]
0	0,000
50	0,056
100	0,118
150	0,176
100	0,118
50	0,056
0	0,000

Senzor za merjenje rezalnih sil – sestav komponent



Podatki o eksperimentu na stružnici:

- Material obdelovanca : avtomatno jeklo W.NR. 1.0737, DIN 9SMnPb36
- Mere obdelovanca: obdelovanec $\Phi 80 \times 500$ mm
- Material orodja: Sandvik Coromant TNMG22 04 08 – PM 4025
- Držalo: Sandvik: MTGNL 2525 22M1
- Priporočeni rezalni parametri:
 - Rezalna globina $a=0,5 - 6$ mm
 - Rezalna hitrost $v=265 - 405$ m/min
 - Podajna hitrost $f= 0,15 - 0,50$ mm/vrt

4 Potek vaje

Vaja zajema več točk, ki so navedene v definiciji naloge. V grobem bi vajo lahko razdelil v dva dela in sicer v teoretični del in bolj praktični del. Teoretični del obsega kalibracijo piezoelektričnega merilnega sistema, meritev časovne konstante, meritev linearnosti in meritev lastnih frekvenc držala stružnega noža. Drugi del vaje pa zajema merjenje rezalnih sil pri struženju v delavnici.

4.1 Prvi del vaje

Prvi del vaje je potekal v laboratoriju, kjer smo najprej kalibrirali piezoelektrični merilni sistem. S kalibracijo smo želeli doseči, da bo izhodna napetost proporcionalna mehanski obremenitvi na piezoelektričnem senzorju.

Najprej smo na mizo postavili piezoelektrični senzor, ter nastavili nabojni ojačevalnik na 3,76. Ta nastavitveni faktor bi moral ustrezati obremenitvi 100N ali 10 kg, multimeter pa bi naj kazal 1V. Izvedli smo test, tako da smo obremenili senzor z 100N (10kg), pri čemer smo ugotovili da kalibracijski faktor naveden od proizvajalca senzorja ne drži. Zaradi tega smo določili nov faktor tako, da smo prilagajali občutljivost nabojnega ojačevalnika dokler nismo za 100N na multimetru dosegli želene vrednosti 1V.

Odčitani faktor oziroma nastavljen občutljivost nabojnega ojačevalnika: $K_q=2,65$

Nato smo merili časovne konstante piezoelektričnega merilnega sistema. Senzor smo obremenili z znano maso in spremljali čas in napetost. Meritve smo opravljali pri različnih nastavitvah nabojnega ojačevalnika in sicer za nastavitvev long, medium in short. Razultate sem zapisal v naslednjo tabelo:

Meritev	Ojač. faktor [N/V]	Časovna konst. ojačevalnika	Sila [N]	U_1 [V]	t_1 [s]	U_2 [V]	t_2 [s]
1	100	long	100	1,005	0	0,994	120
2	100	medium	100	1,005	0	0,529	60
3	100	short	100	1,005	0	0,1	2,5

Časovno konstanto piezoelektričnega merilnega sistema izračunam po enačbi: $\tau = \frac{t_2 - t_1}{\ln U_1 - \ln U_2}$

Sledi:

$$\tau_{long} = \frac{120 - 0}{\ln 1,005 - \ln 0,994} = 10903,526$$

$$\tau_{medium} = \frac{60 - 0}{\ln 1,005 - \ln 0,529} = 93,494$$

$$\tau_{short} = \frac{2,5 - 0}{\ln 1,005 - \ln 0,1} = 1,083$$

V prvem delu vaje smo določili tudi linearnost piezoelektričnega merilnega sistema. To smo izvedli tako, da smo piezoelektrični senzor obremenjevali in razbremenjevali z različnimi utežmi, katerih mase smo poznali. Za vsako spremembo obremenitve smo zapisali tudi napetost na multimetru in vse podatke zapisali v tabelo:

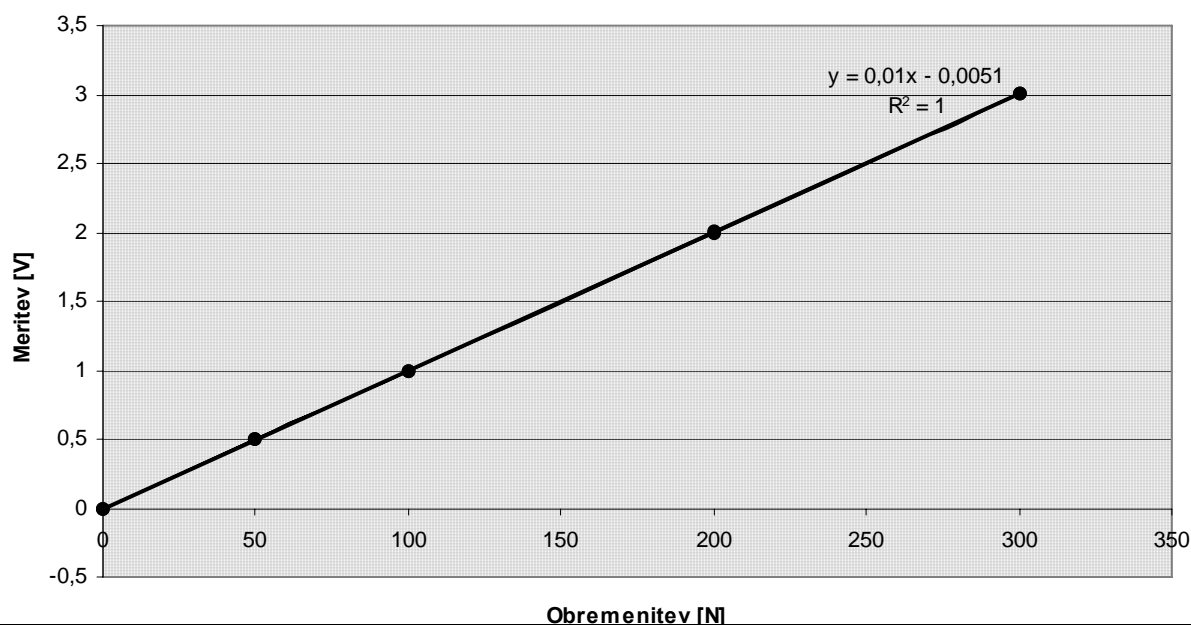
Občutljivost K_q [pC/V]: 2,65

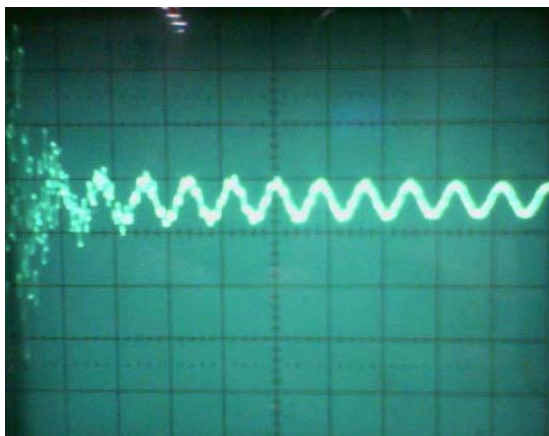
Ojačitev [meh. Enote/V]: 100

Meritev	Obremenitev [V]	Meritev [V]
1	0	0,000
2	50	0,496
3	100	0,995
4	200	2,000
5	300	3,004
6	300 + ročno	3,005
7	200	2,003
8	100	0,998
9	50	0,494
10	0	-0,006

Glede na podatke v tabeli lahko narišemo graf in odčitamo enačbo in korelacijo. To sem storil s pomočjo programa Excel, kjer sem uporabil funkcijo linearne trendne črte in izpis enačbe premice z korelacijskim koeficientom. Dobil sem naslednji graf s pomočjo katerega sem ugotovil, da ima premica enačbo $y=0,01x - 0,0051$, korelacijski koeficient pa znaša $R^2=1$. Korelacijski koeficient nam predstavlja determinističnost funkcijske zveze oziroma natančnost in ponovljivost merilnega sistema.

Linearnost piezoelektričnega merilnega sistema





Kot že zapisano v definiciji naloge moramo določiti še lastno frekvenco držala stružnega noža v odvisnosti od vpetja. Stružni nož je lahko različno vpet (privijačen) v piezoelektrični senzor zato moramo za vsako vpetje izračunano točno določeno značilno frekvenco. Le to smo dobili tako, da smo vzbujali stružni nož z vsiljeno zunanjo silo (kladivo, roka...) in opazovali odziv (nihanje) na osciloskopu. Gre za vsiljeno dušeno nihanje zaradi vpetja držala v senzor, nihanje na osciloskopu pa predstavlja slika levo:

Opravili smo po dve meritvi, rezultate pa sem zapisal v tabelo, kjer sem izračunal frekvenco s pomočjo križnega računa:

$$\begin{aligned}
 45ms &\sim 15,6 \text{ nihajev} \\
 1000ms &\sim k \text{ nihajev} \\
 k &= \frac{1000 \cdot 15,6}{45} = 346Hz \\
 45ms &\sim 10,125 \text{ nihajev} \\
 1000ms &\sim k \text{ nihajev} \\
 k &= \frac{1000 \cdot 10,125}{45} = 225Hz
 \end{aligned}$$

Meritev	vpetje	Čas [ms]	Nihajev	Frekvenca [Hz]
1	3 luknje previsa	45	15,6	346
2	5 lukenj previsa	45	10,125	225

4.2 Drugi del vaje

Drugi del vaje je potekal v delavnici, kjer smo preizkusili postopek struženja na stružnici CNC INDEX GU 1000. V stužnico smo vpeli obdelovanec, nastavili zahtevane parametre (globino reza, hitrost rezanja, podajanje) ter postružili majhno razdaljo. Na tam mestu lahko omenim, da pri struženju nismo zajeli nobenih meritev, saj je postopek po navodilih asistenta preobsežen in dolgotrajen. Zaradi tega smo po dogovoru privzeli lanske meritve opravljene 23.12.2004.

Opomba: V nadaljevanju bom privzel, kot da smo tudi na naši vaji pridobili meritve.

Opravili smo po štiri meritve pri različnih rezalnih pogojih:

- globina rezanja: 5mm
- hitrost rezanja: 300, 400 mm/min
- podajanje: 0,15 ; 0,5 mm/vrt

Vsako meritev smo ponovili dvakrat; enkrat z nefiltriranim signalom (izmerili smo celotno silo) in enkrat s filtriranim signalom (izmerili smo le dinamično komponento sile).

Glede na opravljene meritve smo dobili naslednjo tabelo:

Datum: 23.12.2004 ; 8 meritev

Orodje: Sandvik TNMG 22 04 08-PM 4025

Material obdelovanca: DIN 9SMnPb36 - premer obdelovanca 66 mm; dolžina 500 mm

rec	time	r	Z	ap	S	F	v	f	Ft_m	Ft_std	Filter
03	16:09:57	28.0	-81.0	5.0	1705	256	300.0	0.15	1345,06	78,93	Off
04	16:10:02	28.0	-86.0	5.0	1705	256	300.0	0.15	59,83	19,05	On
05	16:10:06	28.0	-101.0	5.0	1705	853	300.0	0.50	5980,94	187,35	Off
06	16:10:11	28.0	-116.0	5.0	1705	853	300.0	0.50	59,58	111,41	On
07	16:10:16	28.0	-122.0	5.0	2274	341	400.1	0.15	1583,92	89,02	Off
08	16:10:20	28.0	-128.0	5.0	2274	341	400.1	0.15	59,96	17,02	On
09	16:10:25	28.0	-147.0	5.0	2274	1137	400.1	0.50	5958,33	237,48	Off
10	16:10:29	28.0	-166.0	5.0	2274	1137	400.1	0.50	59,84	131,55	On

Legenda:

rec - številka zapisa

time - čas zapisa

r - polmer obdelave [mm]

Z - začetna točka obdelave v smeri Z [mm]

ap - globina obdelave [mm]

S - hitrost vrtenja obdelovanca [vrt/min]

F - hitrost podajanja [mm/min]

v - hitrost vrtenja pred orodjem [mm/min]

f - hitrost podajanja [mm/vrt]

Ft_m - srednja vrednost rezalne sile $F_z(t)$

Ft_std - standardna deviacija rezalne sile $F_z(t)$

filter - filtriranje signala pod 300Hz in nad 3400Hz

(off-izključeno, on-vključeno)

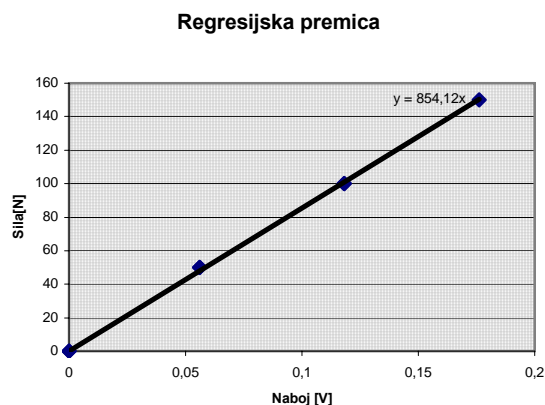
Rezultati meritev so datoteke z zapisi časovnega poteka rezalne sile $F_z(t)$ in močnostnega spektra rezalne sile $F_z(t)$:

- recNN.txt časovni potek rezalne sile $F_z(t)$

- msNN.txt močnostni spekter rezalne sile Fz(t)

Signal, ki smo ga zajeli je prišel od nabojnega ojačevalnika Kistler 5027A21. V kolikor želimo prejeti signal pretvoriti v silo, moramo poznati nastavitveni faktor ojačanja. Le tega določimo s pomočjo korelacijske tabele in regresijske premice, katere presečišče nastavimo na 0:

Sila [N]	Meritev [N]	Korelacija [N]
0	0,000	0,000
50	0,056	892,8571
100	0,118	847,4576
150	0,176	852,2727
100	0,118	847,4576
50	0,056	892,8571
0	0,000	0,000



Z zgornjega grafa oziroma enačbe premice sem določil faktor ojačanja, ki znaša 854,12 N/V. Z drugimi besedami to pomeni, da napetost 1V predstavlja 854,12N.

Pri vsaki meritvi smo zapisali 2048 vrednosti signala. Najprej moramo dobljeni signal (iz datotek recNN.txt.) oziroma časovni potek rezalne sile spremeniti v V. To storimo tako, da meritev pomnožimo z 3 in delomo z 8192. Tovrstna pretvorba je posledica 14 bitnega A/D pretvornika z vhodnim območjem (+/-8192) kar ustreza (+/-3V). Dobljeno napetost v V sedaj pretvorimo v N tako, da jo pomnožimo z faktorjem ojačanja (1V ustreza 854,12N).

Narišemo diagram poteka sile v odvisnosti od časovne osi. To os izračunamo po enačbi: $t = N_i \cdot 1/23764,242\text{Hz}$, kjer predstavlja N_i zaporedno številko meritve. Končni čas na časovni osi znaša 86ms.

Narisati moramo še diagram močnostnega spektra v odvisnosti od frekvenčne osi. Močnostni spekter imamo že podan in ga odčitamo iz datoteke msNN.txt, frekvenčno os pa določimo iz podatka o frekvenci vzorčenja in dolžini signala po enačbi: $F_0 = N_i \cdot \frac{23764,242}{2048}$, kjer predstavlja

N_i zaporedno številko meritve.

Glede na podana navodila izračunam še srednje vrednosti sil (samo za nefiltrirani signal) in standardno deviacijo sil (samo za filtriran signal). Za izračun srednje vrednosti sem v Excelu uporabil funkcijo AVERAGE, za izračun standardne deviacije pa STDEV.

Za enega od filtriranih signalov sem izrisal tudi histogram. Izbral sem si meritev 6. Z ukazoma MINA in MAXA sem odčital minimalno in maksimalno vrednost rezalne sile. Obe vrednosti sem seštel in delil z 11, kar pomeni da bom imel v histogramu 12 delitvenih razredov. Zračunam še frekvence razredov z ukazom FREQUENCY in narišem histogram. Na x os nanašam število elementov v posameznem razredu, na y os pa pripadajoče razrede.

V nadaljevanju sem izrisal zahtevane grafe:

5 Meritev 3

6 Meritev 4

7 Meritev 5

8 Meritev 6

8.1 Histogram

9 Meritev 7

10 Meritev 8

11 Meritev 9

12 Meritev 10

13 Zaključek

Izračunal sem štiri standardne deviacije (samo za filtrirani signal) in štiri srednje vrednosti (samo za nefiltrirani signal). Rezultate sem prikazal v naslednji tabeli:

Zapis	Standardna deviacija
3	423,53
5	1870,77
7	495,43
9	1863,694

Zapis	Srednja vrednost
4	5,96
6	34,85
8	5,33
10	41,15

Na vaji smo dobro spoznali lastnosti in uporabo piezo senzorjev pri merjenju različnih sil. V prvem delu vaje, ki je potekal v laboratoriju smo skalibrirali piezoelektrični senzor s čimer smo dosegli, da je bila izhodna napetost proporcionalna mehanski obremenitvi. Določili smo nov kalibracijski faktor, saj smo ugotovili da privzeta vrednost ne drži. Nov faktor ima vrednost 2,65. Določili smo tudi časovne konstante piezoelektričnega senzorja in sicer za nastavitve long, medium in short.

Pri merjenju linearnosti piezoelektričnega merilnega sistema smo dobili zelo dobre rezultate. Določil sem regresijsko premico, ki ponazarja ujemanje točk s premico. V našem primeru je ujemanje zelo dobro, saj se točke s premico v celoti prekrijejo. Korelacijski faktor, ki je mera natančnosti oziroma determinističnosti funkcijske zveze in znaša 1, kar pomeni, da je predpostavljen sistem izredno točen in ponovljiv. Glede na naše opravljene meritve ugotavljam, da ima piezoelektrični sistem linearno karakteristiko z enačbo $y=0,01x - 0,0051$. V kolikor bi se obremenitve zelo spremenile, bi bilo pametno ponovno preveriti linearnost oziroma korelacijo, saj bi bilo možno da bi se funkcijska zveza spremenila.

Pri merjenju lastnih frekvenc stružnega noža zaključujem, da se lastne frekvence spreminjajo odvisno od previsa oziroma vpetja stružnega noža. Daljši ko je previs, bolj stružni nož niha. Nihanje je dušeno, dušilko pa predstavlja kar samo vpetje stružnega noža.

Drugi del vaje smo opravili na CNC stružnici, kjer smo preizkusno postružili obdelovanec. Meritev nismo zapisovali, vendar smo se po dogovoru z asistentom domenili, da jih privzamemo od lani. Kljub temu, da tega dela nismo opravili lahko zapišem nekatere ugotovitve.

Merili smo sile, ki se pojavijo na stružnem nožu pri različnih pogojih obratovanja.

Velike razlike se pojavijo med filtriranimi in nefiltriranimi vrednostmi. Razlike so najbolj vidne z diagramov. Ugotavljam, da so bolj natančni oziroma točni filtrirani podatki, saj ne vključujejo napak zaradi vplivov okolice. Za filtrirano meritev 6 sem narisal tudi histogram v katerem sem podatke razvrstil v dvanajst razredov. Histogram jasno kaže, da imamo Gaussovo porazdelitev vrednosti.

Na meritve vplivajo nastavitve rezalnih pogojev. Tako lahko zapišem, da se pri večji podajni hitrosti največja statistična komponenta sile oziroma srednja vrednost pojavi pri nižji rezalni hitrosti. Analogno lahko sklepam tudi obratno in sicer najnižja statična komponenta za višjo rezalno hitrost se pojavi pri nižji podajni hitrosti. Dinamična komponenta oziroma standardna deviacija sile se v odvisnosti od obratovalnih pogojev občutno ne spreminja in je podobna.

Zrisani spektri moči nam ponazarjajo odvisnosti spektra od frekvenčne osi. Iz njih lahko razberemo napake, ki se jih vidi v obliki "skokov ali šic".

Vsi rezultati vaje se mi zdijo v skladu z našimi pričakovanji, meritve pa bi verjetno lahko nekoliko izboljšali, če bi jih ponovili večkrat.

14 Literatura

- [1] Laboratorij za tehnično kibernetiko, obdelovalne sisteme in računalniško tehnologijo & Laboratorij za proizvodnjo kibernetiko in eksperimentalne metode, Predloga za vaje 2005/2006, Ljubljana, Fakulteta za Strojništvo.

15 Priloga I - Oblika preračuna v Excelu