

MJERNA LINIJA NA BAZI
TROKOMPONENTNOG KVARCNOG PRETVARAČA SILE

D. Dukić, Zavod za hidrotehniku
Gradjevinskog fakulteta, Sarajevo

REZIME

U radu je prikazan realizovan uređaj koji omogućava istovremeno mjerenje i registrovanje tri fizikalne veličine. Ovakvo rješenje uslovljeno je zahtjevom da se pri mjerenju tri komponente sile uzorkuju istovremeno kako vremensko kašnjenje ne bi utjecalo na konačan rezultat mjerenja.

MEASURING EQUIPMENT BASED ON THREE COMPONENT TORCE
TRAUSDUCER

In this report is described one realized device for measuring and recording three natural magnitudes at the same time - this solution is due to demand that three components of force are sampling simultaneously so delay between taking samples of force components not influence end result of measuring.

KLJUČNE RIJEČI: mjerenje sile, kvarcni pretvarač sile, elektrostatsko pojačalo.

1. UVOD

Osnovni preduslov da bi se mogao primjeniti neki od savremenih metoda obrade je da se za mjerenje posmatrane fizičke veličine koristi senzor koji je pretvara u električnu veličinu. Savremena praksa nameće potrebu da se pored osrednjenih vrijednosti izučavanih fizičkih veličina i njihove promjene kroz vrijeme analiziraju i dinamičke karakteristike tih veličina. Za analiziranje ovih veličina potrebno je koristiti brze registratora (optički pisači) za analogno registrovanje signala ili računarske konfiguracije uz korištenje savremenih elektronskih komponenti.

Realizovana struktura je rezultat potrebe da se uz skromnu podršku elektronskih komponenti izvrši mjerenje sile (tri komponente) te omogući računarska obrada dobivenih rezultata.

2. PRINCIPI MJERENJA SILE

Za mjerenje sile potrebno je u osnovi vršiti mjerenje deformacije. U cilju dobivanja što boljeg odziva potrebno je dobiti i što veću deformaciju. Otpornom metodom uz upotrebu referentne opruge čija je sila istezanja definirana sa:

$$F = K \cdot \Delta X \quad (1)$$

moguće je mjeriti srednju vrijednost sile pri čemu preciznost mjerenja ovisi od preciznosti potenciometra kao i napona napajanja uz kvalitetnu referentnu oprugu. Ograničavajući faktor ovakve metode je frekvencija jer je cijeli sistem inertan te jako utiče na samo mjerenje.

Upotrebom induktivne metode povećavaju se frekventni opseg i preciznost ali cjelokupna metoda još uvijek ima utjecaja i vrši upliv na mjerenje. Maksimalne vrijednosti izlaznih signala, ako se uzme kao jedinica dužine mikrostrain za induktivne pretvarače je oko $1.5 \text{ mV}/\mu\epsilon$.

Kapacitivni mjerači pomaka imaju veći naponski signal od oko $5 \text{ mV}/\mu\epsilon$ ali su zato dosta komplikovani za realizaciju i korištenje.

Korištenje strain gage traka kao mjerača deformacije daje bolju sliku o mjerenoj sili ali su maksimalni izlazni signali oko $150 \mu\text{V}/\mu\epsilon$ a frekvencija mjenog signala ovisi o realizaciji konstrukcije mjerača i načina ljepljenja trake za konstrukciju.

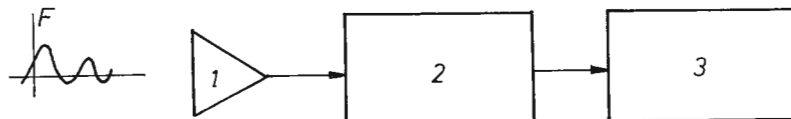
Piezoelektrični pretvarači omogućavaju mjerenje deformacije bez pomjerenja te na taj način praktično ne utiče na uzročnika deformacije a izlazni signali mogu biti i do $1.5 \text{ V}/\mu\epsilon$. Za potrebe mehaničkih mjerenja frekventna karakteristika od oko 50 KHz je zadovoljavajuća.

Navedeni principi mjerenja deformacija omogućavaju statička i dinamička mjerenja osim piezoelektričnih pretvarača. Za piezoelektrične pretvarače se može reći da mogu vršiti kvazistatična mjerenja. Razvojem elektrostatskih pojačala kao i spojnih kablova sa velikim unutarnjim otporom gubitak potencijala formiranog u pretvaraču je mali tako da je moguće i kvazi statičko mjerenje.

3. REALIZACIJA LINIJE ZA MJERENJE SILE

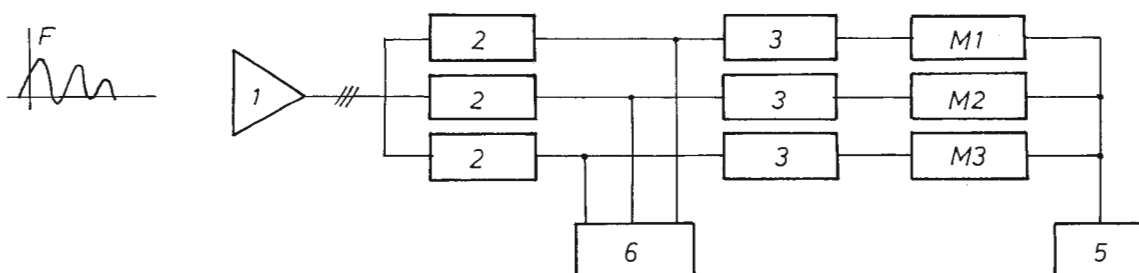
Mjerna linija koja bi omogućila mjerenje sile prikazana je na sl.1. Iz blok strukture slijedi da su glavni elementi:

1. Pretvarač sile u napon
2. Prilagodno pojačalo
3. Registrirajući element



Slika 1. Blok šema mjerne linije

Ovako zamišljena linija bi dala analogno zapisanu mjerenu veličinu sile koju je potrebno naknadno kvantizirati za računarsku analizu. Iz razloga da se sve veći broj analiza obavlja računski to smo se odlučili da navedenu blok šemu modificiramo tako da je realizovana linija za mjerenje tri komponente sile prikazana na sl.2.



Slika 2. Blok šema uređaja za mjerenje tri komponente sile

Prijemni dio je pretvarač sile (1). Dobiveni električni signal se prilagodjava preko pojačala (2). Tako dobiveni standardni naponski signal moguće je vizuelizirati na pisaču (6) ili višekanalnom osciloskopu. Istovremeno se vrši analogno/digitalna konverzija A/D (3). Pretvoreni analogni naponski signal u binarni broj se registrira u memorijskom bloku M_i $i = 1, 2, 3$. Po završenom mjerenju preko mikroprocesorske konfiguracije (5) vrši se prikupljanje registrovanih mjerenja te formira baza podataka za dalju obradu.

3.1. Piezoelektrični pretvarač sile

Namjena trokomponentnog pretvarača sile je da izvrši dekompoziciju sile koja djeluje u bilo kojem smjeru na tri ortogonalne komponente. Na svakom izlazu biti će proporcionalan potencijal primjenjene komponente sile. U slučaju da je potrebno mjeriti u smjeru z ose i razvlačenje a ne samo sabijanje to je ovakav pretvarač prije mjerenja potrebno opteretiti. Tehničke karakteristike pretvarača date su u tabeli 1.

3.1.1. Princip funkcioniranja

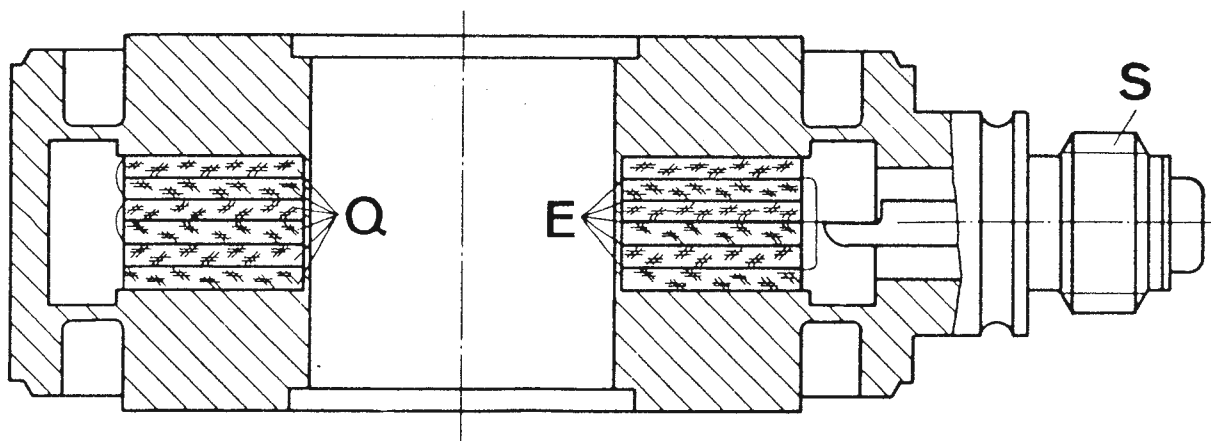
Na sl.3. prikazan je presjek kroz pretvarač sile na bazi kristala. Mjerenje sile se obavlja istovremeno pomoću šest kvarcnih pločica Q. Mehaničko opterećenje, unutar kvarcne pločice, generira elektrostatski naboj koji je proporcionalan primjenjenoj sili i ne ovisi od veličine kristalne pločice. Po dvije pločice kristala definiraju određeni smjer djelovanja sile, tj. osjetljivost kristalne pločice je najveća za definirani smjer djelovanja sile. Rezultirajući potencijal se prikuplja pomoću elektroda E i odvodi na priključnicu S. Ovisno od djelovanja sile potencijal na priključnici S može biti pozitivan ili

Tabela 1
Tehničke karakteristike pretvarača

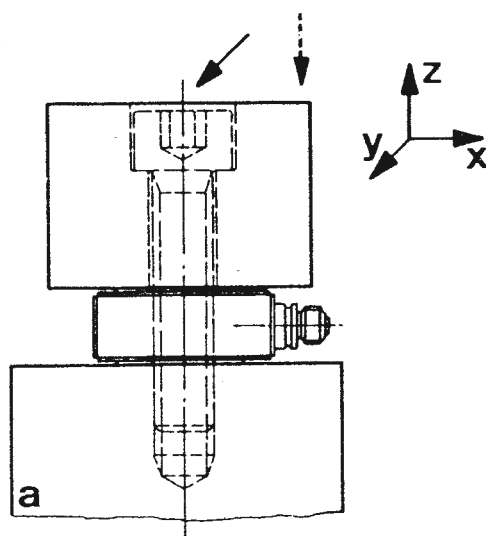
Mjerni opseg sa vanjskim opterećenjem od
25 KN

opterećenje (+Fz); rasterećenje (-Fz)	N	\pm 5000
tangencijalne komponente \pm Fx i \pm Fy	N	\pm 2500
rezolucija	N	0.01
preopterećenje	%	20
ostjetljivost:		
Fz	pC/N	- 4.1
Fx, Fy	pC/N	- 7.5
čvrstoća (z-smjer)	N/ μ m	1000
čvrstoća (x i y-smjer)	N/ μ m	300
rezonantna frekvencija u z-smjeru sa opterećenjem od 400 g	kHz	8
linearnost	%	< \pm 1
medjuuticaj	%	< 5
otpor izolacije	Ω	> $5 \cdot 10^{13}$
kapacitet	pF	30
temperaturni koeficijent	%/ $^{\circ}$ C	0.02
radna temperatura	$^{\circ}$ C	-60 - +150
težina	g	32
dimenzije	mm	24x24x10

negativan. Montaža pretvarača prikazana je na sl.4. Kako je rezultirajuće djelovanje sile na pretvarač potencijal to je moguće jednostavnim spajanjem više pretvarača formirati mjernu platformu kako je prikazano na sl.5.

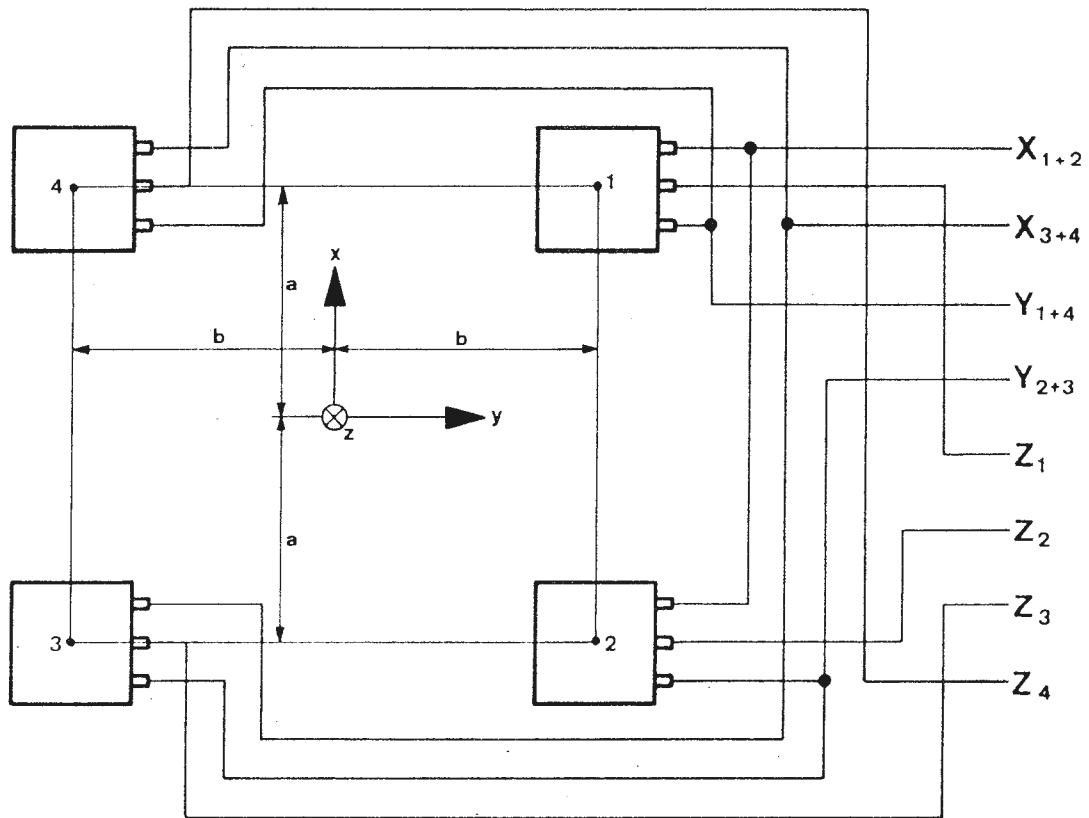


Slika 3. Presjek trokomponentnog pretvarača sile

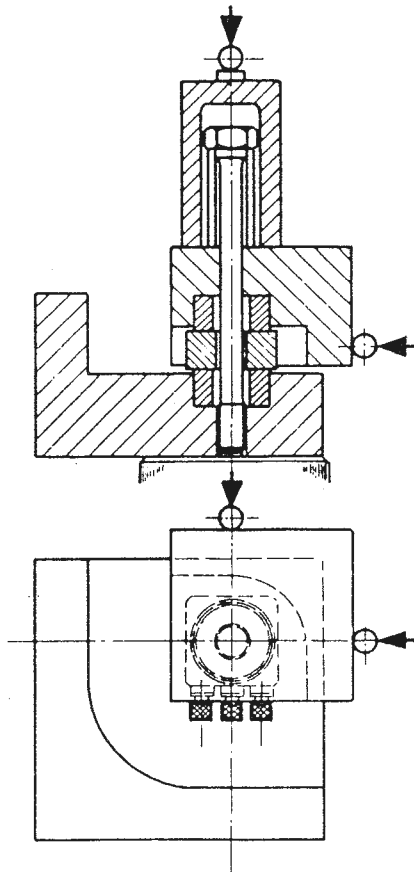


Slika 4. Montaža pretvarača sile

U ovom slučaju mjernu platformu formiraju četiri istovjetna pretvarača a moguće je mjeriti tri komponente sile kao i tri komponente momenta. Baždarenje pretvarača se vrši pomoću uređaja prikazanog na sl.6.



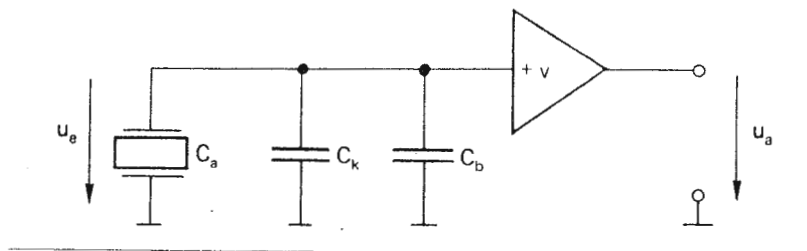
Slika 5. Formiranje mjerne platforme sa četiri pretvarača sile



Slika 6. Uredjaj za kalibraciju pretvarača sile

3.2. Elektrostatsko pojačalo

Zadatak elektrostatskog pojačala je da pretvori potencijal iz piezoelektričnog pretvarača sile u napon. Principijelna šema elektrostatskog pojačala prikazana je na sl.7.



Slika 7. Principijelna šema elektrostatskog pojačala

gdje su:

- c_a - kapacitet pretvarača
- c_k - kapacitet kabla
- c_b - kapacitet ulaza pojačala

Kako je

$$U = \frac{Q}{C} \quad (2)$$

gdje su:

- U - napon
- Q - potencijal
- C - kapacitet

to se na osnovu šeme date na sl.7. može napisati da je

$$U_e = \frac{Q}{c_a + c_k + c_b} \quad (3)$$

odnosno da je

$$U_a = V \cdot U_e \quad (4)$$

gdje je:

- V - pojačanje pojačala

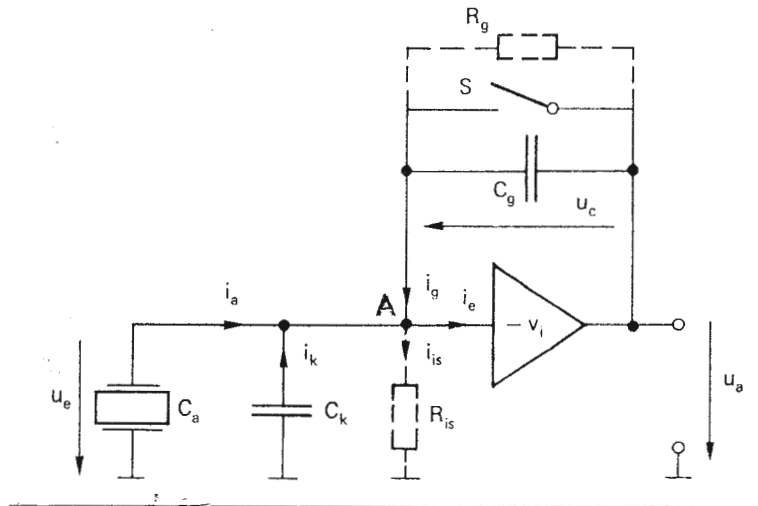
$$U_a = V \cdot \frac{Q}{c_a + c_k + c_b} \quad (5)$$

Realno elektrostatsko pojačalo prikazano je na sl.8. Pretpostavljajući da je pojačanje pojačala invertirajuće (mijenja se polaritet izlaznog signala) moguće je napisati da je

$$U_a = -V \cdot U_e \quad (6)$$

gdje je:

- U_a - izlazni napon
- V - pojačanje pojačala
- U_e - napon piezoelektričnog davača



Slika 8. Realno elektrostatsko pojačalo

Iz šeme na sl.8. slijedi da je:

$$U_c = U_a - U_e \quad (7)$$

Koristeći relaciju (3) slijedi

$$U_c = U_a - \left(-\frac{U_a}{V}\right) = U_a \left(1 + \frac{1}{V}\right) \quad (8)$$

Istovremeno suma struja u tački A za realno pojačalo treba biti jednaka nuli te slijedi:

$$i_e + i_k + i_g - i_s = 0 \quad (9)$$

Zanemarujući struju i_s , tj. offset struju pojačala, a moguće je to učiniti samo u slučaju da je ulazni otpor pojačala jako velik relacija (9) glasi:

$$i_e + i_k + i_g = 0 \quad (10)$$

Veličina struje koju generira piezoelektrični davač data je relacijom (11) dok je struja povratne sprege pojačala definisana relacijom (12).

$$i_e = \frac{dQ}{dt} \quad (11)$$

$$i_g = C_g \cdot \frac{dU_c}{dt} \quad (12)$$

Struja gubitaka kroz kabl definisana je relacijom (13)

$$i_k = C_k \cdot \frac{dU_e}{dt} \quad (13)$$

$$i_k = -C_k \cdot \frac{1}{V} \cdot \frac{dU_a}{dt} \quad (14)$$

Uvrštavajući u relaciju (10) relacije (8), (11), (12) i (14) slijedi:

$$\frac{dQ}{dt} + \left(1 + \frac{1}{V}\right) \cdot C_g \cdot \frac{dU_a}{dt} + \frac{C_k}{V} \cdot \frac{dU_a}{dt} = 0 \quad (15)$$

Integrirajući relaciju (15) slijedi:

$$U_a = - \frac{Q}{C_g} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{V} + \frac{1}{V} \cdot \frac{C_k}{C_g}} \quad (16)$$

Pod pretpostavkom da je pojačanje pojačala V oko 100.000 puta a da je odnos $C_k/C_g \approx 100$ to zanemarivanjem članova, gdje figurira pojačanje V , učinjena greška je reda veličine 0.1% te se može napisati da je:

$$U_a = - \frac{Q}{C_g} \quad (17)$$

Iz dobivene relacije slijedi da je izlazni napon iz pojačala ovisan od veličine kondenzatora C_g u povratnoj sprezi pojačala. Ovako dobiveni napon sa ulaznog pojačala se obradi u slijedećem stepenu tako da izlazni napon odgovara jednom od naponskih standarda. Ovakav napon je već moguće registrovati optičkim pisačem. Tehnički podaci elektrostatskog pojačala dati su u tabeli 2.

Tabela 2

Tehnički podaci elektrostatskog pojačala

Mjerni opseg ($z_o \pm 10$ V izlazni signal)	pC	$\mp 10 \dots 11 \cdot 10^6$
Kapacitet za mjerni opseg	pF	$10 \dots 10^5$
Izlazni napon (zaštita od kratkog spoja)	V	± 10
Izlazna struja	mA	$< \pm 5$
Izlazna impedanca	Ω	10
Trenutna maksimalna vrijednost ulaznog napona	V	± 125
Ulazna vrijednost otpora	T	100
Frekventni opseg	kHz	$0 \dots 10$
Vremenska konstanta	s	$10^3 \dots 10^5$
Pouzdanost	%	$< \pm 1$
Šum (na izlazu)	mV _{rms}	< 2
Šum po kablu	pC _{rms} /pF	$3 \cdot 10^{-5}$
Drift	pC/s	$< \pm 0.03$
Pomjeraj nule izlaza	mV	$< \pm 5$
Temperaturni pomjeraj nule	mV/°C	< 0.5
Odstupanje nule od napona	mV/%	< 1
Osjetljivost ulaza	mV/V	4

3.3. Analogno/digitalni pretvarač

Zadatak analogno digitalnog pretvarača je da analogni signal ili napon koji se mijenja unutar zadatog opsega pretvori u digitalni signal. Uopšteno govoreći cijena A/D pretvarača raste za zahtjevima po brzini i tačnosti pretvaranja. U realizovanoj strukturi upotrebljen je 8 bitni A/D pretvarač čije su karakteristike date u tabeli 3.

Tabela 3
Tehnički podaci A/D pretvarača

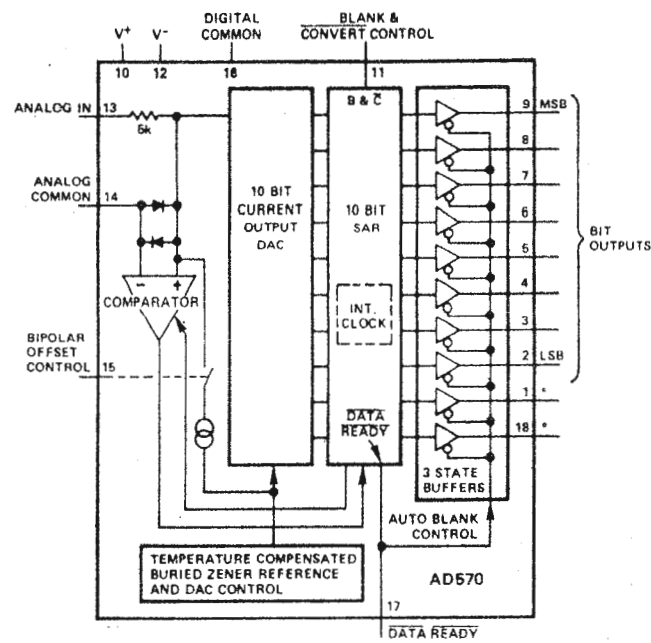
Rezolucija	8 bita
Relativna pouzdanost	$\pm 1/2$ bita
Kalibracija na punom opsegu	± 2 bita
Pomjeraj u odnosu na kratko spojeni ulaz	$\pm 1/2$ bita
Temperaturni opseg	0°C do 70°C
Temperaturni koeficijent	± 1 bit (80 ppm/°C)
Potiskivanje napona napajanja	± 2 bita
Vrijednosti ulaznog otpora	5 K Ω
Opseg analognih ulaza	
Unipolarni	0-10 V
Bipolarni	-5 - +5V
Izlazni kod	pozitivni binarni kod
Vrijeme konverzije	25 μ S

Osnovno o A/D pretvaraču koji je ujedno i limitirajući faktor svake strukture kod ovako zamišljenog mjernog uređaja:

- brzina pretvaranja 25 μ S
- temperaturni uslovi od 273 K - 343 K
- kompletan sklop sa referentnim naponom i oscilatorom.

Blok dijagram A/D pretvarača prikazan je na sl.9.

Nakon pojave signala $\overline{\text{CONVERT}}$ izlazni sklop sa oznakom SAR (registar sukcesivne aproksimacije) vrši poredjenje DAC (digitalno-analognog pretvarača) sa naponom formiranim na internom otporniku od 5K Ω unutar A/D pretvarača. Uporedjivanje se vrši od bita sa najvećim težinskim faktorom ka vrijednostima sa najmanjim težinskim faktorom. Na osnovu rezultata iz COMPARATOR-a SAR odredjuje vrijednost izlaznog bita. Nakon završene procedure nad svim bitovima SAR aktivira signal $\overline{\text{DATA READY}}$ pri čemu izlazni pinovi izlaze iz stanja visoke impedance u aktivno stanje. Ponovnom pojavom signala $\overline{\text{CONVERT}}$ procedura se aktivira za slijedeći ciklus konverzije. Za vrijeme konverzije signal $\overline{\text{DATA READY}}$ na logičkom jedan (+5V) označava da se A/D pretvarač nalazi u stanju pretvaranja analognog signala.



Slika 9. Blok dijagram A/D pretvarača

Uz tri navedena A/D pretvarača istovremeno se u realizovanoj strukturi vrši pretvaranje sve tri komponente sile iz pojačala. Izborom vremenske konstante sa vanjske strane uređaja moguće je upravljati frekvencijom pojave signala CONVERT. U realizovanom uređaju zadovoljili smo se da maksimalna brzina uzimanja uzoraka odnosno najveći broj uzoraka u jednoj sekundi bude 4000.

4. MEMORIJSKI BLOK M1, M2 i M3

Pretvoreni analogni signal iz A/D pretvarača vodi se na tri istovjetna memorijska bloka. Uz zahtjev da se izvrši istovremeno mjerenje tri analogne veličine sile izradjene su tri memorijske jedinice koje istovremeno vrše registrovanje mjerenih podataka. Memorijski blokovi su izgrađjeni na bazi SRAM (statički RAM) te imaju obezbjedjeno rezervno napajanje koje omogućava čuvanje snimljenih podataka do godinu dana. Ovako realizovani memorijski blok omogućava da struktura radi sa maksimalno dozvoljenom brzinom rada A/D pretvarača bez obzira na mikroprocesorsku podršku ili tip računara.

Realizovani memorijski blokovi su veličine od 4 K byte-a. Dogradnjom većeg broja SRAM-a moguće je memorijske blokove izvesti do 128 K po kanalu.

5. MIKROPROCESORSKA KONFIGURACIJA μ P

Zadatak mikroprocesorske konfiguracije se sastoji u slijedećem:

- potrebno je izvršiti prikupljanje snimljenih podataka,
- izvršiti njihovo skaliranje (prema zadatom skal faktoru),
- izvršiti dekompoziciju snimljenih podataka (u slučaju da se snimljeni podaci šalju ka većem računaru u bazu podataka),
- izvršiti manje obrade nad snimljenim podacima.

Kao centralni dio mikroprocesorske konfiguracije upotrebljen je mikroracunar Spektrum baziran na mikroprocesoru Z-80. Za njega je izradjen interface kojim se omogućava citanje memorijskih blokova (do 128 K) i asinhrona linija bazirana na RS 232/C standardu sa brzinama od 300 do 1200 banda. Uz priručni magnetofon moguće je formirati manju datoteku na kasetama uz samu konfiguraciju.

Prilikom korištenja programa za citanje memorijskih blokova vrši se skaliranje odnosno pretvaranje binarnog broja u stvarno mjerenu fizikalnu veličinu. Pročitani memorijski blok se privremeno snima na magnetnu kasetu te se na taj način formira datoteka. U slučaju manjih obrada kao npr.: srednja vrijednost, max, min, srednje kvadratno odstupanje moguće je izvršiti i na samoj mikroracunarskoj konfiguraciji. Za vlastite potrebe na mikroracunarskoj konfiguraciji je postavljen program za određivanje koeficijenata Furierovog reda na osnovu snimljenih podataka.

Kada se zahtijeva znatno složenija obrada te je potrebno izvršiti prenos podataka ka većem računaru u sistemu se nalazi asinhrona linija kao i emulator program za terminal VT52 kojeg je moguće priključiti na računare tipa PDP pod operativnim sistemom RSX.

6. VIZUELNA KONTROLA

Kao vizuelna kontrola šta se dešava u sistemu mjerenja upotrebljen je višekalni osciloskop. Prije samog snimanja istraživač može odrediti kako izgleda mjerena veličina te uz storage osciloskop (osciloskop sa memorijom) i registrovati određeni period mjerenja. Uz osciloskop moguće je dodati i pisac (višekalni) koji će se startati samo u periodu snimanja podataka u memorijske blokove M_1 , M_2 i M_3 . Na taj način moguće je izvršiti kontrolu mjerenja i kontrolu dobivenih podataka.

7. REZULTATI UPOTREBE MJERNOG UREDJAJA

Konstruirani uređaj provjeren je u realnim uslovima ispitivanja modela slapišnih ploča i vertikalnih zidova u slapištu /1/ i /2/. Radovi o izvršenim ispitivanjima objavljeni su na XIII kongresu JDVB u Mostaru septembra 1986. U toku ispitivanja i mjerenja izradjena oprema je funkcionirala prema unaprijed datim zahtjevima. Kako je programska podrška bila moguća sa navedene mikroracunarske konfiguracije to nije vršen prenos podataka ka većem računaru. Vrijeme uzorkovanja kojima smo dobivali optimalni rezultat je 64 sekunde.

Sagledavajući sve uradjeno i istestirano sa navedenom izvedenom mjernom strukturom za slijedeća mjerenja bi bilo neophodno izvršiti proširenje broja mjernih pretvarača odnosno omogućiti izgradnju mjerne platforme (mogućnost mjerenja i momenta) te povećati brzinu čitanja registrovanih podataka te pojednostaviti sve operacije oko dobivanja registrovanih podataka u datoteci računara.

8. BIBLIOGRAFIJA

1. Z.Janežič, N.Kovačina, D.Dukić (1986) Hidrodinamička opterećenja slapišnih ploča - modelska istraživanja - XIII kongres JDVB
2. Z.Janežič, N.Kovačina, D.Dukić (1986) Hidrodinamička opterećenja vertikalnih zidova u slapištu - modelska istraživanja - XIII kongres JDVB
3. D.Dukić, Z.Milašinović (1985) Mjerna linija sa trokomponentnim pretvaračem sile, Zavod za hidrotehniku, Sarajevo - interna publikacija