

UDK 528.51
Pregledni rad

SENZORI ZA ODREĐIVANJE LINEARNIH POMAKA

Radovan MARJANOVIĆ*

Potreba za kontinuiranim praćenjem dinamičkih procesa inicirala je razvoj senzora, koji uz primjenu kompjutera mogu samostalno takve procese mjeriti. Ograničivši se na mjerenja dimenzije i promjene dimenzije postavljaju se zadaci mjerenja: dužine, širine, visine, promjena debljine, ali i položaja, nagiba, kuta, zaobljenosti, termičkog istezanja, vibracija i dr. Za ova mjerenja postoji čitav niz različitih, pogodnih senzora. Principi mjerenja ovim sensorima vrlo se razlikuju. Svim sensorima zajedničko je međutim svojstvo da se u njima vrši konverzija mehaničkih** veličina u električne. Mehaničke veličine se konvertiraju na principu: promjene otpornosti, induktiviteta, kapaciteta, intenziteta svjetla, ili interferometrijski, holografski, magnetski, generiranjem signala i dr.

Za pripremu i obradu signala najčešće se koristi Wheatstoneov most, fazno zavisni detektor, brojač frekvencija i sl. Izlazna jedinica je analogna ili digitalna registracija uključivši i a/d konvertor, mikroprocesore ili kompjutere [13].

Pri izboru senzora potrebno je obratiti pažnju na nekoliko parametara kojima su oni specificirani od strane proizvođača ili na osnovu prethodno učinjenih laboratorijskih ispitivanja. To su:

- 1) Dinamičko područje (engl. dynamic range) koje se definira kao odnos najmanjeg i najvećeg pomaka koji senzor može svladati, a izražava se najčešće u dB.***
- 2) Linearno mjerno područje je dio čitavog mjernog područja senzora, u kojem je linearitet u granicama koje specificira proizvođač. Linearitet je pokazatelj koji označuje maksimalno odstupanje izlaznog napona od pravca (računatog najčešće po teoriji najmanjih kvadrata). Linearitet se zadaje u postocima mjernog područja, (najčešće čitavog).

* Adresa autora: Dr Radovan Marjanović, dipl. inž. RGN fakultet 410000 Zagreb, Pierottijeva 6

** Kod nekih postupaka konverzije mehaničkih veličina u električne, primjenjuje se konverzija mehaničkih veličina u optičke ili druge signale a zatim u električne.

*** dB — (deci Bell) mjera za odnos dvaju napona (struje) ili snage, a izražava se u logaritamskoj formi kao:

$$A = 20 \log (U_1/U_2) \text{ dB, za napon i}$$

$$N = 10 \log (N_1/N_2) \text{ dB, za snagu}$$

- 3) Osjetljivost je definirana kao najmanja vrijednost koju senzor razlučuje.
- 4) Svojstvo reprodukcije podrazumjeva odstupanje mjernog izlaznog signala nastalog u istim uvjetima ali u nekom drugom vremenu. Ovaj parametar ovisan je uglavnom od mehaničke konstrukcije i veze s mjernim objektom.
- 5) Dugoperiodična stabilnost opisuje promjenu mjernog signala pri nepromjenjenom mjernom položaju kroz zadani duži vremenski interval.
- 6) Osjetljivost senzora na:
 - a) promjene temperature,
 - b) promjene zračnog pritiska,
 - c) promjene vlažnosti,
 - d) magnetska i električna polja.
- 7) Povratni utjecaji senzora na mjerni objekt se manifestiraju u:
 - a) termičkim efektima (ugrijavanje),
 - b) magnetskom ili električnom polju (indukcija),
 - c) težini (prevelikoj),
 - d) dimenziji (prevelikoj).
- 8) Moguća udaljenost od senzora do uređaja za obradu signala odnosno registraciju.
- 9) Frekventna karakteristika (donja i gornja granična frekvencija).
- 10) Sila potrebna da se aktivira senzor i otpor koji senzor pruža pri promjeni položaja.

Ograničivši se na mjerno područje ≤ 10 mm najčešće se primjenjuju senzori na principu promjene otpornosti, induktivnog i kapacitivnog tipa [15], te posebna grupa senzora na principu interferometrijskog mjerenja (koji se ovdje neće obrađivati).

Senzori na principu mjerenja promjena otpornosti su ili elektrootporni tenzometri EOT (Strain gauge) koji su u obliku folije ili pak potenciometarski senzori raznih konstrukcija. Konstrukcija EOT senzora temelji se na principu kojeg je 1843. god. pronašao Wheatstone, a 1856. god. Thomson (Lord Kelvin) sistematski proučio [9]. Princip im je taj što se otpor električnog vodiča u odnosu $\Delta R/R_0$ mijenja kada se mijenja dimenzija (duljina) vodiča za $e = \Delta l/l_0$.

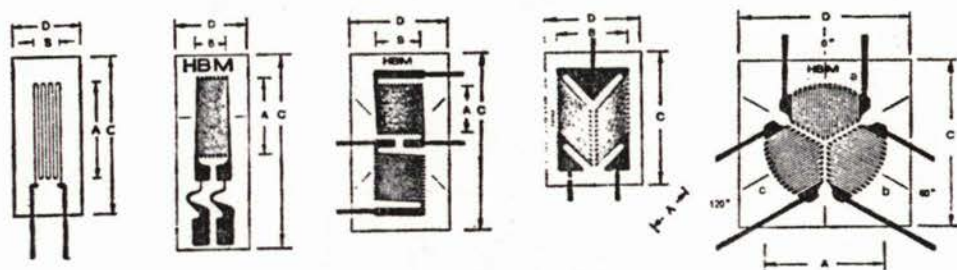
Zahtjev pri primjeni EOT da promjena otpornosti bude linearna funkcija vodiča vrlo dobro je ispunjen ako je kao vodič korišten konstantan (legura Cu i Ni), pa vrijedi jednostavan odnos*:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = e \cdot k; \quad e = \frac{\Delta R/R_0}{k}$$

Industrijski se danas izrađuju, uglavnom dva tipa ovih EOT, žičani EOT i EOT dobiven kemijskim izjedanjem tankih folija (postupak vrlo sličan postupku izrade štampanih veza),

* U zadacima gdje linearitet nije bitan, a osjetljivost presudan zahtjev, mogu se koristiti poluvodički EOT koji počivaju na piezoeffektu poluvodiča, kojeg je 1954. god. pronašao Smith.

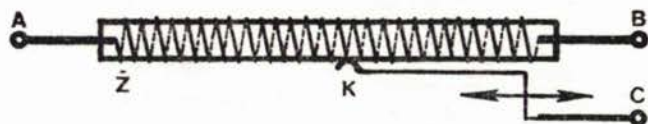
Prednost žičanih EOT su kod primjene u uvjetima visokih temperatura i izrade EOT dimenzije ≥ 20 mm. EOT s folijom je tehnološki jednostavnije proizvesti, stoga je jeftiniji, a prednosti su kod izrade EOT malih dimenzija i kompliciranih oblika rešetaka [1], [8], sl. 1.



Sl. 1. Žičani EOT, razni tipovi EOT s folijom (prema HBM [8])

Iako je primjena EOT senzora vrlo raširena u strojarstvu i građevinarstvu jer je metoda prije svega jeftina, a podaci pouzdani, direktni pokazatelj stanja deformacije mjerene površine, za mjerenje većih deformacija i za premoštenje većih razmaka između mjernih točaka, EOT senzori se zamjenjuju drugim sensorima i metodama mjerenja. Detaljna objašnjenja svojstva EOT senzora i njihove raznolike primjene moguće je dobiti iz prospekata proizvođača i stručne literature (na pr. [1], [8]). Kao potenciometrijski senzori mogu poslužiti kružni potenciometri na čiju se osnovu postavlja zupčanik a zupčasta letva se povezuje s mjernim objektom. Takvo je mjerenje opterećeno dodatnim trenjem, manje je točnosti ali velikog izlaznog signala. Preciznija konstrukcija potenciometrijskih senzora čine štap-potenciometar pri čemu je otporno tijelo oblika štapa ili pločice iz otpornog materijala ili izolatora na kojeg je namotana otporna žica (ž). Preko otpornog tijela pomiče se klizač (k) koji predstavlja srednji izvod (c) razdjelnika napona. Osjetljivost ovih tipova senzora ograničena je površinom klizne plohe klizača odnosno debljinom otporne žice (2×10^{-2} mm), sl. 2.

Linearitet, svojstvo reprodukcije i dugoperiodična stabilnost otpornih senzora su uslijed temperaturnih efekata smanjeni (zagrijavanje žice pri prolazu el. struje). Zbog dodatnog trenja i gore navedenih loših osobina, ovi senzori se rijede primjenjuju za mala mjerna područja i visokotočna mjerenja.



Sl. 2. Potenciometrijski senzor

Elektrootporni senzori su gotovo uvijek priključeni na Wheatstoneov mjerne most. Napajanje mosta može biti izmjeničnim ili istosmjernim naponom. Najčešće se međutim koristi istosmjerni napon.

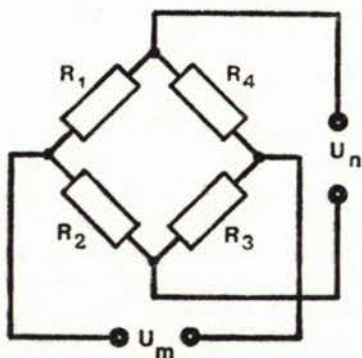
Nominalne vrijednosti otpora u mostu trebaju sve biti jednake, odnosno $R_1 = R_2$ i $R_3 = R_4$, da bi most bio u ravnoteži. Ako s U_n obilježimo napon napajanja, a s U_m mjerni napon, možemo prema sl. 3 pisati:

$$\frac{U_m}{U_n} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$

ako je

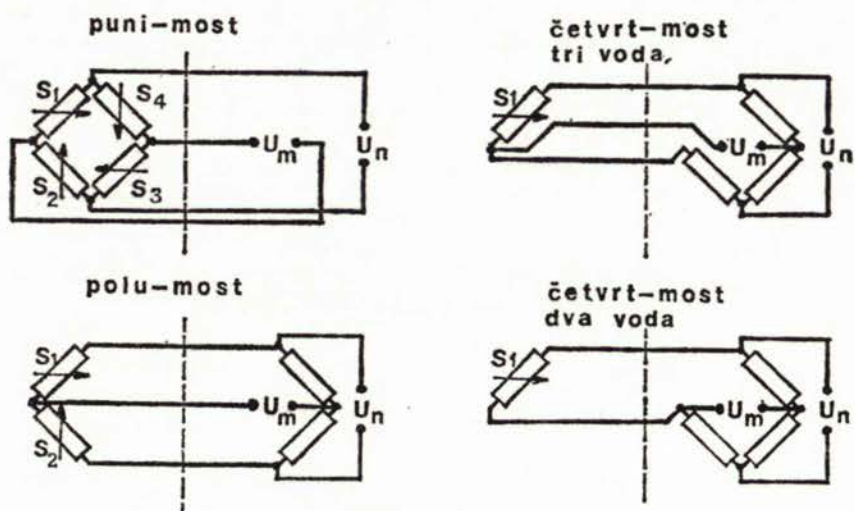
$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = \frac{U_m}{U_n} = 0$$

ili $R_1 : R_2 = R_4 : R_3$



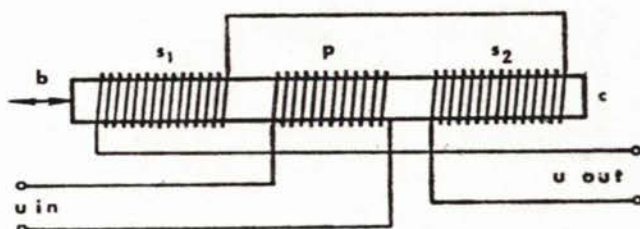
Sl. 3. Otpori u Wheatstoneovom mostu.

Svaka promjena otpornosti jednog od otpornika u mostu rezultira promjenom napona koji se mjeri. Kao mjerni spoj može poslužiti puni-most, polu-most i četvrt-most (sa dva odnosno tri mjerna voda) sl. 4. [9] i [11].



Sl. 4. Spojevi mjernog mosta

Otpor i promjena otpora priključnih mjernih vodova su uzroci pogrešaka mjerenja mjernim mostom. Zbog toga se četvrt-most primijenjuje samo iznimno (onda kada su vrlo stabilni vanjski uvjeti) odnosno u spoju s tri vodiča i EOT sensorima s temperaturnom kompenzacijom. Pretpostavka da se mjerni vodovi nalaze u istim uvjetima te da imaju iste otpornosti tako da se na njima izazvane promjene međusobno kompenziraju mora biti ispunjena. Zato ćemo često kod polu-mosta i punog-mosta naći dva odnosno četiri EOT, a potencio-metarski senzori biti će priključeni kao razdjelnik napona.



Sl. 5. Princip LVDT senzora

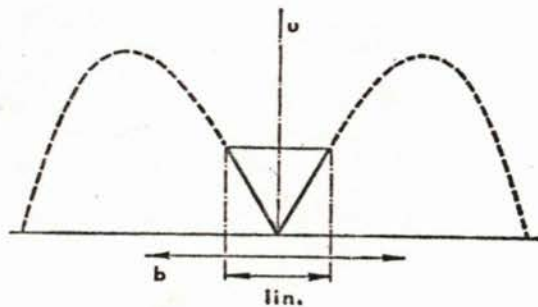
Izmjenični napon (frekvencije najčešće iznad 1 kHz) (u_{in}) dovodi se na primarni namotaj (p) LVDT senzora koji je namotan oko pomične željezne jezgre (c). U dva protufazno i u seriju spojena sekundarna namotaja (s_1 i s_2) inducira se napon ovisan o položaju jezgre u odnosu na namotaje. U srednjem položaju jezgre naponi obih sekundara su jednaki ali suprotne faze (suprotnog predznaka) tako da je rezultirajući napon (u_{out}) jednak nuli. Pomicanjem jezgre na jednu ili drugu stranu (b) rezultirajući napon raste do svog maksimuma, sl. 6. Ispravljanjem izlaznog napona u ovisnosti o fazi ulaznog napona rezultirajući napon postaje istosmjerni čiji se predznak i amplituda mijenjaju po funkciji položaja jezgre. Za ograničeno područje pomaka jezgre izlazni napon je linearno proporcionalan i predstavlja mjerno područje LVDT senzora (koje specifikira proizvođač, sl. 6).

Iako u principu potpuno različit, DCDT senzori imaju izvjesne sličnosti s LVDT sensorima. Osnov DCDT senzora su kondenzatori građeni iz tri ploče. Na vanjske ploče (n i o) dovodi se izmjenični napon (u_{in}). Vanjske ploče čine zajedno sa srednjom pločom (m) dva kondenzatora (C_1 i C_2) čiji se kapacitet mijenja ovisno o razmaku srednje i vanjskih ploča, sl. 7.

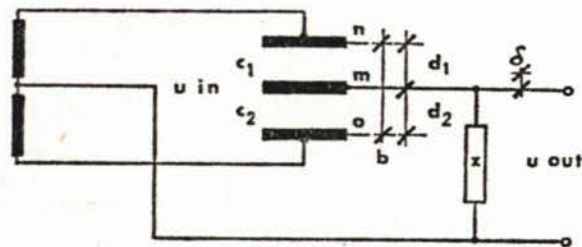
Napon na srednjoj ploči (u_{out}) je stoga jednak razlici napona na kondenzatorima. U srednjem položaju srednje ploče je napon na oba kondenzatora jednak, ali suprotne faze tako da je rezultirajući napon jednak nuli. Uz

* LVDT — Linear Variable Differential Transducer, linearni promjenjivi diferencijalni senzor (pretvarač).

** DCDT — Differential Capacitance Displacement Transducer, diferencijalni kapacitivni senzor pomaka.

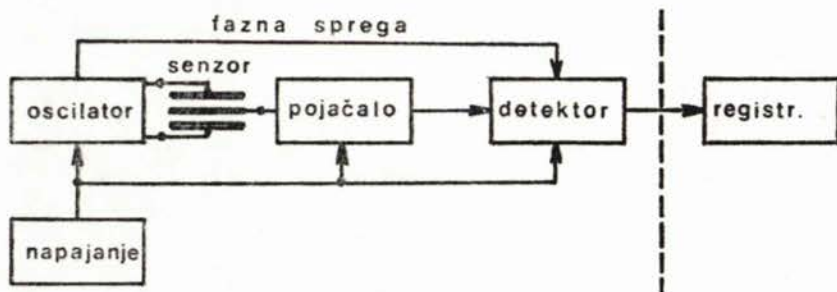


Sl. 6. Mjerno područje (linearno) LVDT i DCDT senzora



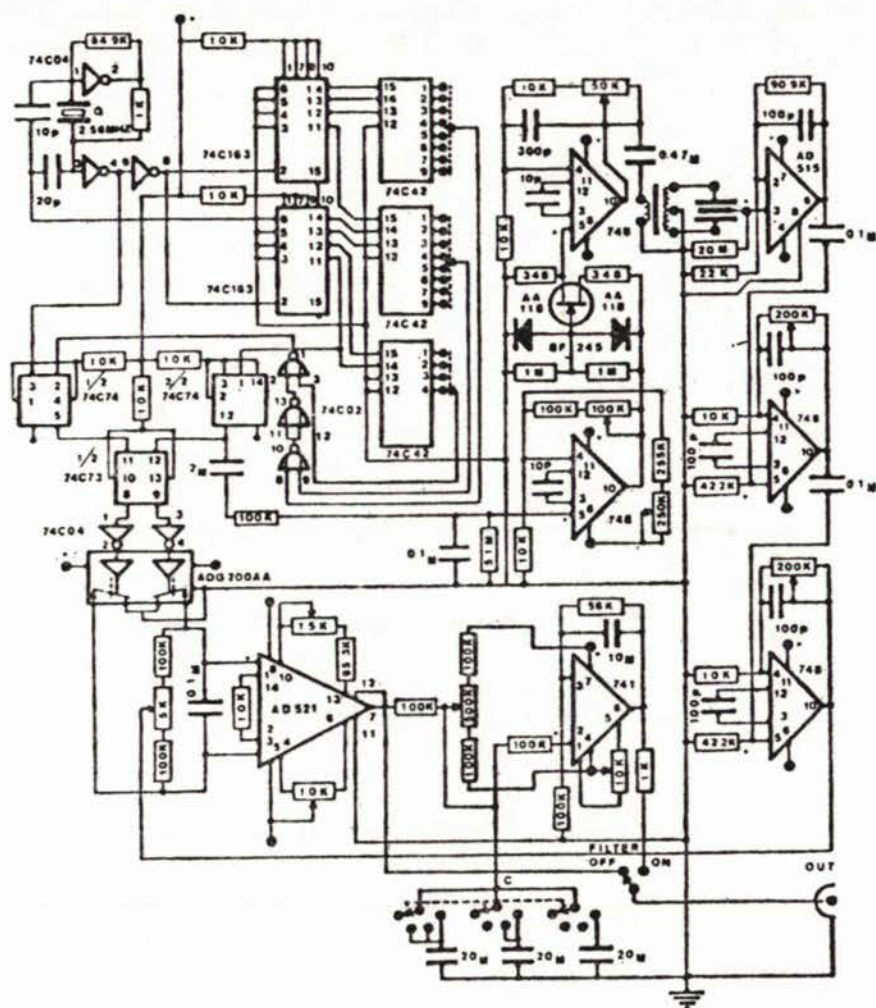
Sl. 7. Princip DCDT senzora

ispravljanje u ovisnosti o fazi izlazni napon, pri pomicanju srednje ploče, poprima vrijednosti od maksimalnog negativnog napona preko nule u srednjem položaju do maksimalnog pozitivnog napona. Kod jednog i drugog sistema potreban je oscilator (stabilan izvor izmjeničnog napona i frekvencije), osjetljivo pojačalo napona, s oscilatorom spregnuti detektor, te stabilan izvor napajanja, sl. 8.



Sl. 8. Blok-shema elektronike za LVDT i DCDT senzore.

Poznate su mnoge uspješne konstrukcije LVDT i DCDT senzora kao i elektroničkih sklopova potrebnih za obradu njihovih signala [7], [2], [3], [4], [10], [14], [16].



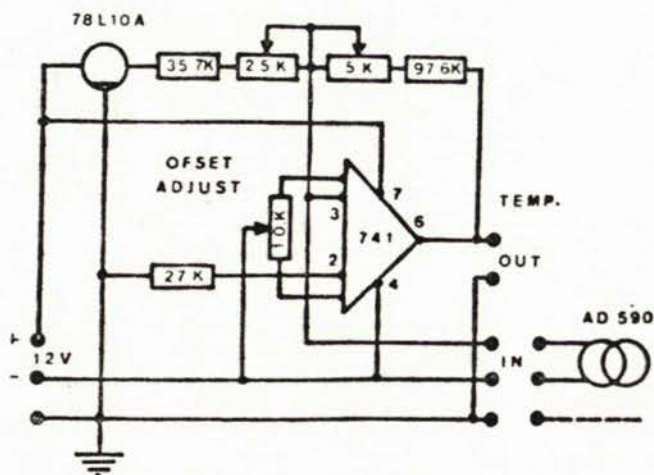
Sl. 9. Detaljna shema elektronskog dijela DCDT senzora.

Na sl. 9 je prikazana detaljna shema DCDT senzora (prema [12]).

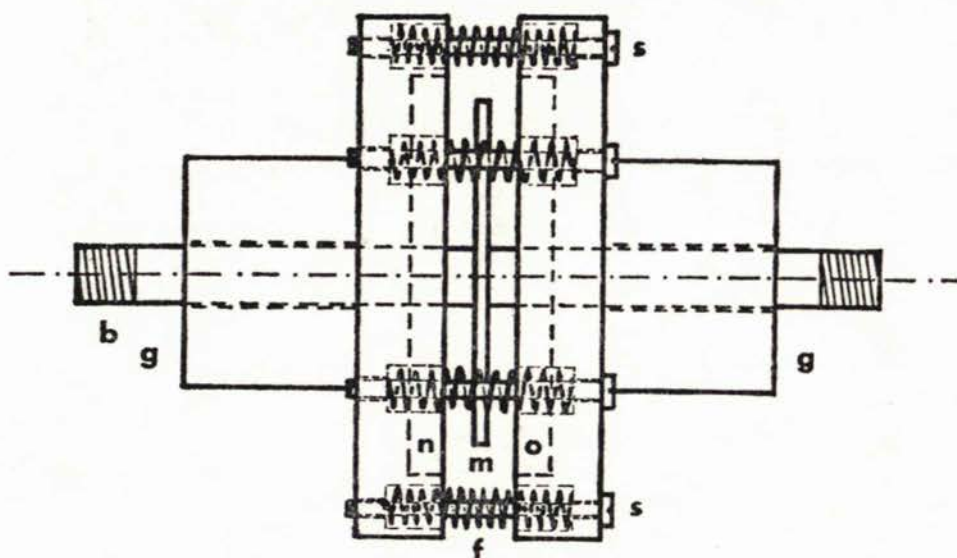
Bez velikih izmjena elektronski dio može poslužiti za DCDT senzore (za što je konstrukcija i primarno bila namijenjena), kao i za LVDT senzore (što je autor eksperimentalno ispitaio). Naročita pogodnost ove konstrukcije su u kućište ugrađeni senzori temperature s kojima je moguće registrirati promjene temperature unutar kućišta (na oscilatoru i na pojačalu) kao i tri vanjska senzora temperature, sl. 10, predviđena da se postave na kondenzator. Ovi senzori temperature treba da posluže prilikom obrade mjernih signala kao izvor podataka za korekciju mjerenja.

Kondenzator je prikazan na sl. 11. Ploče kondenzatora su načinjene od mjedi, a njihove površine polirane i zbog eliminiranja oksidacije pozlaćene

tankim slojem. Vanjske ploče (n) i (o) učvršćene su vijcima u kućište (g) načinjeno iz polistirola (Polypenco). Srednja ploča (m) načinjena je iz istog komada materijala kao i osovine (b).



Sl. 10. Senzor temperature i pripadajuća elektronika



Ss. 11. DCDT senzor — kondenzator s tri ploče.

Razmak vanjskih ploča moguće je pomoću vijaka (s) i opruga (f) podesiti na željenu veličinu. Podešavanje razmaka vanjskih ploča moguće je u granicama ≤ 0.1 mm do ≥ 20 mm. Jednom podešen razmak ploča fiksira se držačima kućišta (nisu prikazani na slici). Promjer vanjskih ploča iznosi 60 mm.

Zbog potpune eliminacije utjecaja trenja prilikom mjerenja, nije predviđeno vođenje osovine i srednje ploče. S vanjske strane kondenzatora korisno je postaviti čelični oklop sa svrhom zaštite od vanjskih utjecaja smetnji, a kondenzator je moguće uroniti u ulje.

Ovako izrađeni senzor bio je podvrgnut detaljnom ispitivanju [12] i mjerenju i pokazao je vrlo dobre rezultate, usprkos upotrebljenih standardnih elektroničkih dijelova. U usporedbi s kupovnim LVDT* senzorima bio je bolji u gotovo svim osobinama osim u dimenziji (na što prilikom konstrukcije nije bila obraćana pažnja).

Ispitivanja sličnih senzora pokazuje također vrlo dobre rezultate naročito u pogledu osjetljivosti i dinamičkog područja [3], [5], te lineariteta [6]. Gladwin i Wolfe navode linearitet sličnog senzora od 0,0003%. Međutim, radi se o ograničenom mjernom području od 0,1 mm.

Po svojim svojstvima LVDT senzori ne zaostaju bitno za DCDT senzorima [5], međutim poznati svjetski proizvođači nude gotove i ispitane LVDT konstrukcije po povoljnim cijenama, što predstavlja veliku prednost.

Za konstrukcije mehaničkih ekstenzometara moguće je koristiti bilo koji od navedenih tipova senzora, koje treba odabrati prema željenim karakteristikama. Konstrukcije ekstenzometara potrebno je prilagoditi tipu senzora i to tako da se maksimalno iskoriste pogodna svojstva, a izbjegnju pogreške i loše osobine primijenjenih tipova.

LITERATURA

- [1] Ajvaz, V.: Merenje deformacija i naprezanja u strojnim i građevnim konstrukcijama, Tehnička knjiga, Zagreb, 1969.
- [2] Brown, D. E., Morgan, V. T.: A differential — capacitance transducer for measuring small displacements, *Journal of Scientific Instruments (Journal of Physics E)* 1969, Series 2, Vol. 2, 793—795.
- [3] Croskell, C., Little, E. C., Rynn, J. M. W., Stacey, F. D.: Displacement and tilt transducers of 140 dB range, *Journal of Scientific Instruments (Journal of Physics E)* 1969, Series 2, Vol. 2, 945—949.
- [4] Dratler, Jay, Jr.: Inexpensive linear displacement transducer using a low power lock-in amplifier, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 48, No. 3, March 1977.
- [5] Garratt, J. D.: Survey of displacement transducers below 50 mm, *Journal of Physics E, Scientific Instruments*, 1979, Vol. 12.
- [6] Gladwin, M. T., Wolfe, J.: Linearity of capacitance displacement transducers, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 46, No. 8, August 1975.
- [7] Herceg, E. E.: Handbook of Measurement and Control, An authoritative treatise on the theory and application of LVDT, Schaevitz Engineering, Pensauken, New Jersey, 1972.
- [8] Hoffmann, K.: Der Dehnungsmessstrefien (DMS), ein universelles Hilfsmittel der experimentellen Spannungsanalyse, *Hottinger Baldwin Messtechnik*, 1973, VD 73 004.
- [9] Hoffman, K.: Die Anwendung der Wheatstoneschen Brückenschaltung, *Hottinger Baldwin Messtechnik*, 1972, VD 72 001.
- [10] Jones, R. V., Richards, J. C. S.: The design and some applications of sensitive capacitance micrometers, *Journal of Physics E, Scientific Instruments*, 1973, Vol. 6.

* Schaevitz engineering New Jersey, modeli GPD i PCA.

- [11] Kiričenko, A.: Mjerenje deformacija i analiza naprezanja konstrukcija, Društvo građevinskih inženjera i tehničara, Zagreb, 1982.
- [12] Marjanović, R.: Beiträge zur Deformationsmessung mit mechanischen Extensometern, Dissertation, Darmstadt, 1982.
- [13] Marjanović, R.: Mjerenje deformacija ekstenzometrima i tilmetrima, Geodetski list, Zagreb, 1983, 1—3.
- [14] Shopland, R. C.: Portable 30-Day Unattended System for Recording Earth Strain in a 66-dB Range, IEEE Transactions on geoscience electronics, Vol. GE-8, No. 4, October 1970.
- [15] Sydenham, P. H.: Microdisplacement transducers, Journal of Physics E, Scientific Instruments 1972, Vol. 5.
- [16] Wolfendale, P. C. F.: Capacitive displacement transducers with high accuracy and resolution, Journal of Scientific Instruments (Journal of Physics E), 1968, Series 2, Vol. 1.

SAŽETAK

U ovom radu su navedeni senzori koji služe za mjerenje linearnih pomaka. Objašnjeni su principi četiri tipa senzora, najčešće primjenjivanih za mjerenja deformacija. Definirani su parametri po kojima se specificiraju i odabiru senzori. Prikazan je elektronički dio DCDDT senzora i opisana gradnja kondenzatora s tri ploče, koji može poslužiti kao senzor osjetljivog ekstenzometra ili tilmetra.

ABSTRACT

In this work sensors for linear displacement measurement are given. Function principles of four types of sensors mostly in use for deformation measurements are described. Parameters which are used for specifying and choosing the sensors are defined. The electronic of a DCDDT sensor is given, and the construction of a three plate condenser, which could be used as a sensor for sensitive extensometer or tilmeter is described.

Primljeno: 1984 — 01 — 25