

UDK 528.481+528.482
Pregledni rad

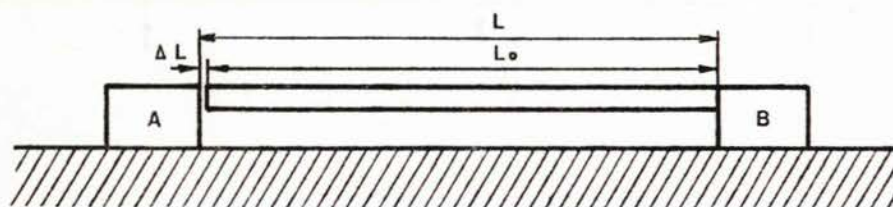
MJERENJE DEFORMACIJA EKSTENZOMETRIMA I TILTMETRIMA

Radovan MARJANOVIĆ — Zagreb*

Uz klasične geodetske metode određivanja deformacija mjerenjem prava-
ca, udaljenosti i visinskih razlika, potrebno je u novije vrijeme spomenuti i
mjerenje promjena udaljenosti (ekstenzometri) i mjerenje promjena nagiba
(tiltmetri ili klinometri). U ovom radu bit će prikazana osnovna problematika
u primjeni ove vrste instrumenata i opisana neka rješenja.

Za razliku od klasičnih geodetskih metoda kod kojih se mjeri na diskret-
nim točkama u velikim vremenskim intervalima, moguće je upotrebom elek-
tronskih pretvarača s odgovarajućim uređajem za registraciju i obradu poda-
taka uspostaviti sistem sposoban da samostalno registrira kontinuirana mje-
renja ili mjeri u odabranim vremenskim intervalima. Podatak mjerenja
ekstenzometrom odnosi se uvijek na promjenu udaljenosti između dvije točke,
pri čemu nije strogo određeno koja točka je pri tome pretrpjela pomak. Zbog
toga je potrebno odabrati jednu točku ekstenzometra tamo gdje se deformacije
ne dešavaju ili mjeriti samo relativne pomake odabranih točaka.

Princip mjerenja ekstenzometrom je taj da se mjerna duljina L između
točaka A i B uspoređuje se unaprijed određenim normalom duljine L_0 , sl. 1.



Sl. 1: Princip mjerenja ekstenzometrom

Pri tome vrijedi izraz:

$$e = \frac{\Delta(L - L_0)}{L}$$

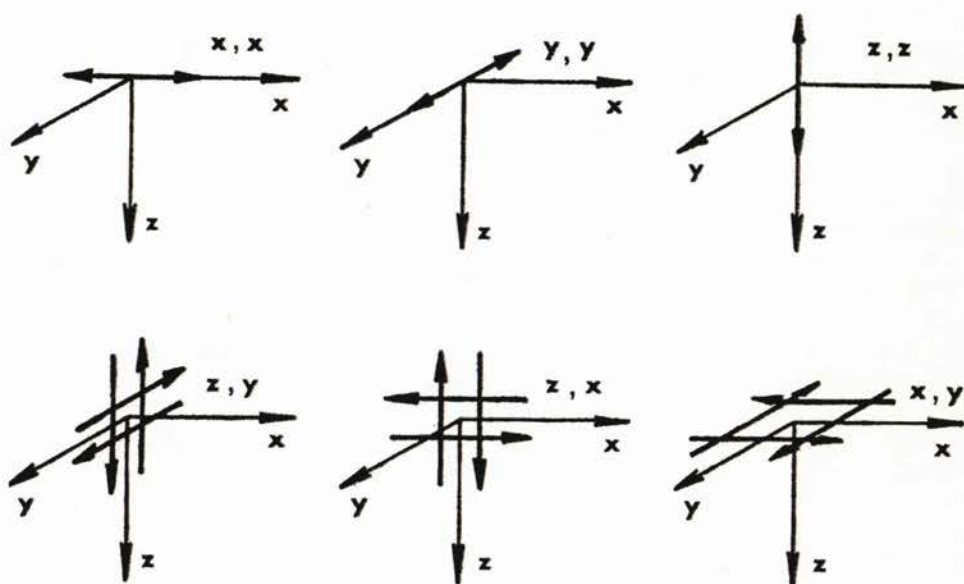
* Adresa autora: Dr Radovan Marjanović, dipl. inž., RGN fakultet, 41000 Za-
greb, Pierottijeva 6

Uz pretpostavku da je L_0 nepromjenjiv vrijedi:

$$e = \frac{\Delta L}{L}$$

Normiranjem navedenog izraza u odnosu na normal duljine L_0 dobivamo bezdimenzionalnu mjeru koja se u anglo saksonskom jezičnom području naziva strain (čitaj: strein). Time je omogućena usporedba mjerenih podataka dobivenih različitim ekstenzometrima.

Mjerenja jednim ekstenzometrom predstavljaju jednu komponentu tenzora deformacije E , koji ima 6 komponentata (u homogenom elastičnom mediju). Od toga su tri komponente translacijske, a tri rotacijske, sl. 2.



Sl. 2: 6 komponenti (strain-tenzora) tenzora deformacije u kartezijevom sistemu (prema [18])

Kod ekstenzometara koji se upotrebljavaju u mjernom području relativnih pomaka $\leq 10^{-6}$ u primjeni su dva sistema:

- 1) LASER*-ski ekstenzometri i
- 2) mehanički ekstenzometri.

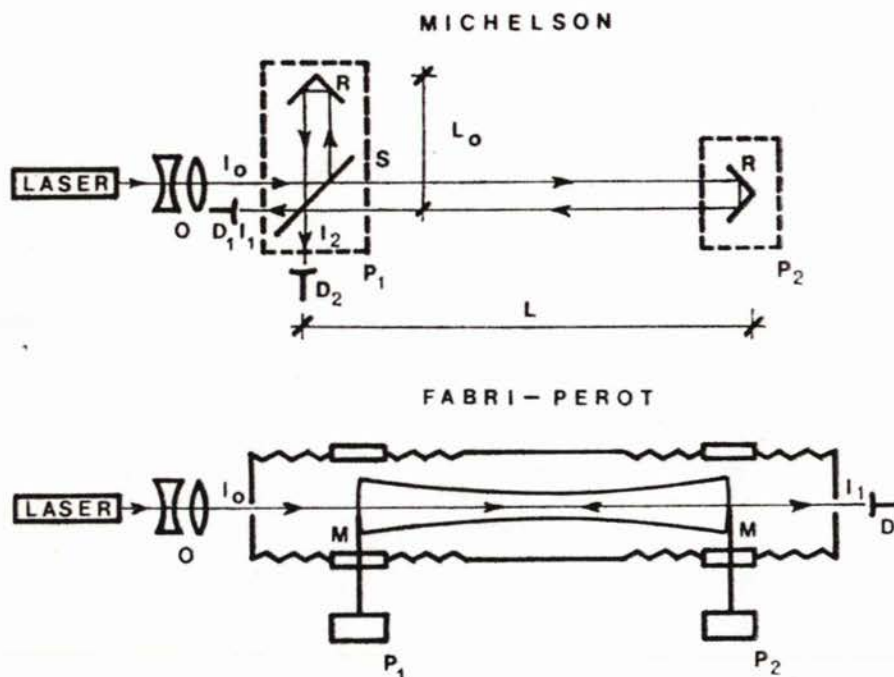
Oba sistema posjeduju dobre ali i neke nepovoljne osobine. Zbog toga je potrebno upoznati svojstva oba sistema te prema potrebi primijeniti onaj koji je za dati slučaj povoljniji.

* LASER — Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, pojačanje svijetla stimuliranom emisijom radijacije.

Kod LASER-skih ekstenzometara koriste se uglavnom dva principa:

- za veće udaljenosti — Michelsonov princip
- za manje udaljenosti — Fabri-Perot princip.

Oba principa mjerenja promjena udaljenosti prikazana su na sl. 3, prema [12], pri čemu su R_i — reflektori ($i = 1, 2$), L_0 — standard duljine, D_i — detektori, S — polupropusno zrcalo, I_i — intenzitet i -te zrake, O — optika.

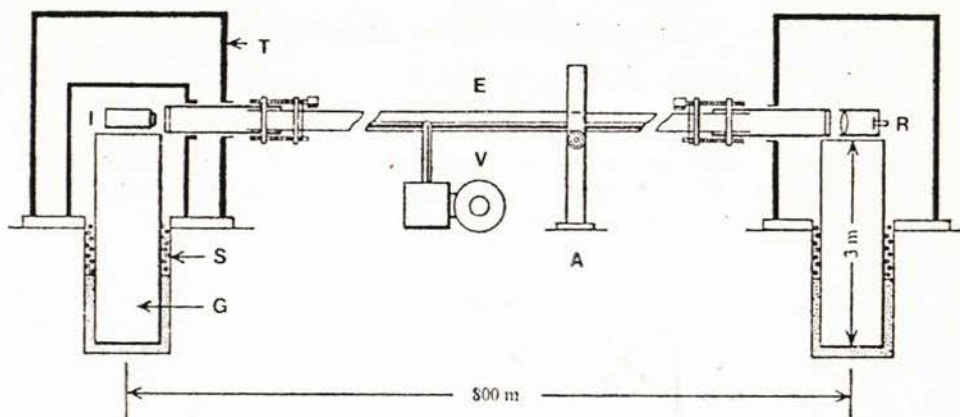


Sl. 3: LASER-ski ekstenzometri po principu Michelson i Fabry-Perot prema [12])

Promjena udaljenosti je tada $\Delta L(t)$, baze $L = P_1 P_2$ na mjernim točkama P_1 i P_2 definirane ogledalima M kod Fabri-Perot principa, odnosno retroreflektorima R kod Michelsonovog principa.

Kod Fabri-Perot principa radiusi zakrivljenosti ogledala M ograničavaju duljinu baze na $L \leq 50$ m. Kod Michelsonovog interferometra pomoćni standard dužine (L_0) ograničava točnost i poskupljuje izvedbu jer se zahtijeva ekstremna stabilnost temperature i pritiska medija, koja se postiže jedino uspostavljanjem vakuma, sl. 4. Oznake predstavljaju: I — interferometar, R — retroreflektor, E — evakuirana cijev, A — postolja (u obliku slova A), V — vakuum pumpa, G — granitni stup, T — termostatzirana komora, S — stiropor izolacija.

Nabavne cijene LASER-skih uređaja i cijene njihovog održavanja su vrlo visoke. Problemi nastaju prilikom montaže jer je vezu s mjerenim objek-



Sl. 4: LASER-ski ekstenzometar duljine 800 m izveden po Michelsonovom principu (prema [3])

tom teško uspostaviti zbog glomaznosti samih uređaja. Prednost pred mehaničkim ekstenzometrima je u tome što etalon nije tako dug kao razmak između točaka čija se varijacija mjeri (što je slučaj kod mehaničkih ekstenzometara). Ujedno je to i razlog što mehanički ekstenzometri nisu pogodni za mjerenje promjena velikih udaljenosti.

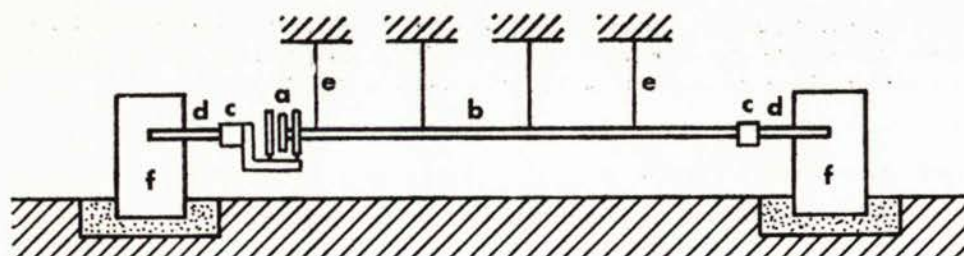
Za mjerenja mehaničkim ekstenzometrima standardne dužine od cca 10^2 m čiji normal dužine ima koeficijent istezanja α od $5 \times 10^{-7}/K$ (kvarc) za postizanje točnosti od 10^{-10} potrebno je temperaturu uzduž normala poznavati ili držati konstantnom točnošću od 2×10^{-4} K, [3]. Tako veliku točnost teško je ispuniti čak i ugradnjom ekstenzometara u duboke rudnike i osiguranjem sličnom kao kod LASER-skih ekstenzometara. Zbog toga se za mjerenja većih točnosti teško može dati prednost jednom od navedenih sistema.

Za mjerno područje $\geq 10^{-6}$ moguće je s uspjehom koristiti male LASER-ske doplerinterferometre ili jednostavne mehaničke ekstenzometre. Zbog mogućnosti bezkontaktnog mjerenja s doplerinterferometrima moguće je baždarenje mehaničkih ekstenzometara i kad su ugrađeni (in situ). U tu svrhu moguće je koristiti npr. Hewlett-Packard 5526A [14]. Stabilnost obje vrste instrumenata je podjednaka uz primjenu istih sredstava kojima se to osigurava (termička izolacija i izolacija od promjena barometrijskog pritiska). Zbog bitno više cijene LASER-skih uređaja prednost dajemo mehaničkim rješenjima.

Dijelovi mehaničkih ekstenzometara su prema sl. 5:

- a) senzori i pretvarači mehaničkih veličina u električne signale
- b) etalon — normal duljine
- c), d), e), f): naprave za pričvršćenje i povezivanje s mjernim objektom.

a) Senzori mehaničkih ekstenzometra su najčešće induktivnog ili kapacitivnog tipa. Pri tome se zbog visokog stupnja lineariteta [11], velikog mjer-



Sl. 5: Dijelovi mehaničkih ekstenzometara

nog područja, velike osjetljivosti i stabilnosti primjenjuju LVDT* i DCDT** senzori. Senzori se sastoje od mehaničkog i elektroničkog dijela. Minijaturizacijom i integracijom elektroničkih komponenti već je danas moguće elektronički dio izraditi bitno manjih dimenzija od mehaničkog, čime se u velikoj mjeri pridonosi stabilnosti čitavog sistema.

b) Za etalon mehaničkih ekstenzometara primjenjuju se različiti materijali koji moraju imati koeficijent istezanja α što manji. Izbor ovih materijala nije velik. To su: topljeni kvarc (Homosil, Cer-Vit, Zerodur, ULE), invar (64% Fe i 35% Ni), super invar (63,5% Fe, 31,0% Ni, 5,5% Co), Carbon-Fibre (Grafil), [5], [13].

$$\alpha \text{ kvarc} = + 0,5 \times 10^{-6}/\text{K}$$

$$\alpha \text{ invar} = + 1,3 \times 10^{-6}/\text{K}$$

$$\alpha \text{ grafil} = - 1,0 \times 10^{-6}/\text{K}$$

Etalon ekstenzometara može biti u obliku cijevi [2], [8], [19], štapa [1], [16], žice [6], [7], [9], [16], [20], lanaca [21], pa su i konstrukcije podređene materijalu i obliku etalona.

Princip ekstenzometra temelji se na činjenici da etalon prilikom mjerenja ne mijenja svoju dimenziju. Taj je uvjet, međutim, samo djelomično moguće ispuniti primjenjujući materijale s malim termičkim koeficijentom istezanja, uz održavanje termičkih i drugih utjecaja konstantnim. Primjenjujući materijale s poznatim negativnim i materijale s poznatim pozitivnim koeficijentima istezanja, moguće je izraditi konstrukcije koje će same kompenzirati utjecaje promjena temperature. Nedostaci ovakvih konstrukcija su različita toplinska vodljivost primijenjenih materijala i neravnomjerno mijenjanje temperature uzduž ekstenzometara.

Bolje rješenje kompenzacijskih ekstenzometara sastoji se u automatskom mjerenju vanjskih uvjeta koristeći veći broj senzora i računanju korekcija za utjecaje smetnji [16]. Korekcije se računaju potpuno automatski koristeći mikrokomputere pa čak i mikroprocesore, ili pak naknadno koristeći registracije podataka.

* LVDT — Linear Variable Differential Transducer; Linearni promjenjivi diferencijalni senzor (pretvarač)

** DCDT — Differential Capacitance Displacement Transducer; Diferencijalni kapacitivni senzor pomaka.

Ekstenzometre je u svrhu mjerenja potrebno povezati s medijem u kojem treba mjeriti deformacije (sl. 5: c, d, e, f) tako da prisustvo ekstenzometara što manje utječe na okolinu. Za tu svrhu moguće je koristiti:

- 1) sidrene klinove
- 2) višekomponentno ljepilo
- 3) direktno postavljanje ekstenzometara na objekt mjerenja.

Način povezivanja ekstenzometara s mjernim objektom odabire se prema očekivanoj amplitudi deformacije i materijalu samog objekta, o čemu ovisi i stabilnost instaliranih uređaja [15]. Dobra iskustva postignuta su i primjenom kamenih postolja postavljenih na kreneni pijesak, međutim utjecaj promjene barometrijskog pritiska na mješavinu pijesak-voda može izazvati znatne pomake kamenih ploča i biti uzrok pogrešaka [16]. Nadalje, ova metoda ograničava primjenu ekstenzometara na mjerenja horizontalnih komponenti.

Primjena i izbor metode pričvršćenja ekstenzometra predmet je iscrpne analize svih štetnih utjecaja koji se direktno manifestiraju u postignutim rezultatima. Signale iz senzora potrebno je dovesti na uređaje za registraciju. Oni mogu biti analogni ili digitalni.

Analogni uređaji za registraciju su jedno- ili više-kanalni pisaci koji bilježe signale na pomičnu papirnu traku.

U digitalnoj registraciji moguće je primijeniti različite nosioce informacije:

- 1) perforirane trake
- 2) magnetske trake
- 3) magnetske ili druge memorije mikro kompjutera i sl.

Pri tome je prije registracije potrebno izvršiti analogno-digitalnu konverziju jer senzori linearnih pomaka daju analogne signale. Analogno-digitalna konverzija vrši se u AD konverterima ili digitalnim voltmetrima.

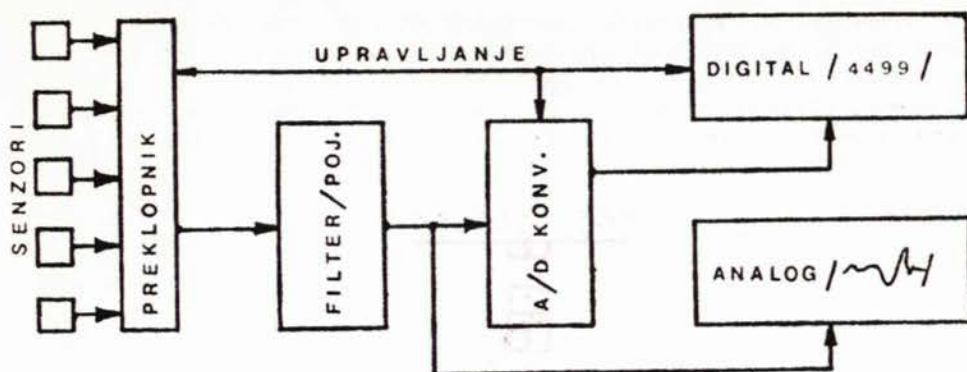
Obrada digitalno registriranih signala bitno je jednostavnija od obrade analogno registriranih signala (koje je potrebno naknadno digitalizirati). Međutim, analogni prikaz pruža neospornu preglednost (iako se i iz digitalnih signala može analogni signal sintetizirati).

Kod registracije više kanala preko jednog AD konvertera potrebno je primijeniti dodatni uređaj multiplekser koji omogućava priključivanje određenog broja različitih senzora. Mjerenja elektromagnetskim sensorima moguće je u manjoj ili većoj mjeri automatizirati. U tu svrhu potrebno je uspostaviti lanac mjernih uređaja, sl. 6.

Upravljanje mjernim uređajima moguće je:

- 1) satovima
- 2) mikroprocesorima ili
- 3) mikrokompjuterima.

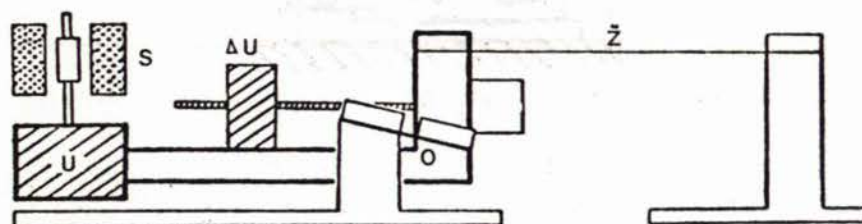
Upravljački uređaji određuju interval mjerenja, broj uzoraka po pojednom kanalu, registriraju, računaju, po jednostavnim ili složenim algoritmima,



Sl. 6: Lanac mjernih uređaja za automatsko mjerenje

te upravljaju najrazličitijim perifernim uređajima [17]. Kompjuteri priključeni na senzore ekstenzometara omogućavaju uz registraciju podataka, digitalnu filtraciju neželjenog frekventnog spektra, eliminaciju trenda pomoću regresivnih funkcija, te harmonijsku (faznu i frekventnu) analizu sadržaja signala (fourier spektar, power spektar).

Visoka osjetljivost LVDT i DCDT senzora omogućava vrlo jednostavne konstrukcije mehaničkih ekstenzometara bez mehaničkog pojačanja (direktna sprega senzor-normal duljine L_0), [8], [16]. Vrlo uspješna konstrukcija ekstenzometra s mehaničkim pojačanjem, prvi put spomenuta 1969. godine [20], koristi mehaničku vagu s krakovima različite duljine, sl. 7. Konstrukcija je u različitim varijantama ponovljena više puta [1], [6], [7], [9]. Mjerna baza ovih ekstenzometara je invarna žica, međutim i kvarcni lanac [21] ili invarna šipka [1].

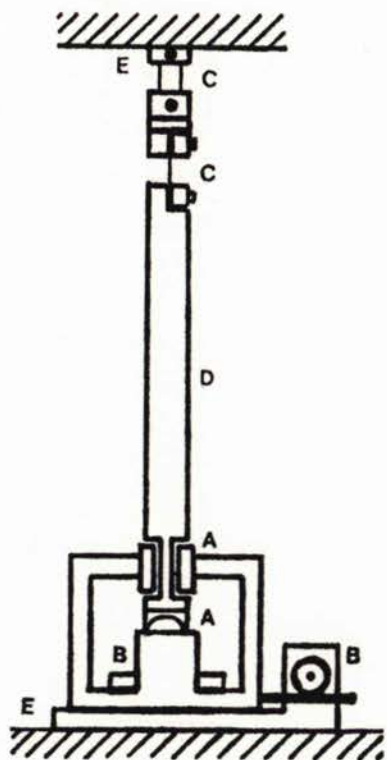


Sl. 7: Ekstenzometar s mehaničkim pojačanjem signala (prema [6])

Simboli označavaju: S — senzor, Ž — invarna žica, O — objesište mehaničke vage, U i ΔU — protuteget i uteg za podešavanje napetosti žice.

Kako je ekstenzometre moguće postaviti u sve smjerove (i vertikalno) te koristiti jednu zajedničku točku moguće je u toj točki odrediti sve komponente pomaka [16]. Podatke mjerenja ekstenzometrima moguće je upotpuniti mjerenjima s tiltmetrima [4]. Tiltmetri su uređaji koji mjere promjene nagiba ravnine na kojoj su postavljeni. Redovito je potrebno mjerenje obih komponenti (međusobno u dva okomita smjera).

Tiltmetara ima vrlo mnogo različitih konstrukcija. To mogu biti horizontalna njihala (npr. Verbaandert-Melchior), vertikalna njihala (npr. Askania-Bodenseewerk Borehole Tiltmeter), elektronske libele (npr. Hugh Bubble Tiltmeter) ili hidrostatske vage (npr. ELWAAG). Jednostavna konstrukcija vertikalnog njihala predstavljena je na sl. 8. Simboli predstavljaju: A — ka-



Sl. 8: Tiltmetar na principu vertikalnog njihala s kapacitivnim senzorima

pacitivni senzori postavljeni u dva okomita smjera, B — uređaji za postavljanje senzora u nulti položaj (motori), C — niti ili trake postavljene u dva okomita smjera, D — tijelo njihala konstantne dužine, E — postolja za učvršćenje senzora i objesište njihala.

Ovdje opisani ekstenzometri i tiltmetri mogu poslužiti u najrazličitije svrhe određivanja deformacija mjenenog objekta. Mjerno područje i osjetljivost instrumenata ograničeno je svojstvima primijenjenog senzora i u izvjesnoj mjeri konstrukcijom samih uređaja. Tako se npr. ekstenzometrima mogu mjeriti deformacije zemljine kore koje nastaju kao posljedica zamljinih plimnih valova (tide) ili deformacije zemljine kore prije nastanka zemljotresa [10] kao i deformacije raznih građevinskih objekata (brane, mostovi, tuneli, nuklearne elektrane i sl.) koje nastaju pod utjecajem najrazličitijih faktora. Prilikom postavljanja ekstenzometara i tiltmetara na mjerne točke potrebno je

ocijeniti ili odrediti utjecaje smetnji i osigurati instrumente od tih štetnih utjecaja.

Štetni utjecaji su u prvom redu promjene temperature i promjene pritiska. Dakako štetni faktori imaju najveći utjecaj pri dugotrajnim mjerenjima u malim mjernim područjima, odnosno kod mjerenja signala malih amplituda. Stoga će npr. termička izolacija morati biti neusporedivo bolje izvedena kod ekstenzometara koji služe za mjerenje plimnih valova zemljine kore nego kod instrumenata namijenjenih mjerenju deformacija mostova i sl. Glavna prednost mjerenja ekstenzometrima i tiltmetrima je automatsko kontinuirano mjerenje bez prisutnosti opažача te mjerenje signala ekstremno malih amplituda. Na osnovu takvih mjerenja moguće je zaključivati o pomacima koji još nisu uslijedili, a koji će uslijediti nastupom određenih mjerljivih uvjeta.

LITERATURA:

- [1] Beavan J., Bilham R., Emter D., King G.: Observations of Strain Enhancement across a Fissure, Proceedings of the 8 th International Symposium on Earth Tides, Bonn, West Germany, 1977.
- [2] Benioff H.: A Linear Strain Seismograph, Bulletin of the Seismological Society of America, 1935. Vol. 25. No. 4, 283—309.
- [3] Berger J.: Application of LASER Techniques to Geodesy and Geophysics, Advances in Geophysics, Academic Press, London 1973.
- [4] Berger J., Wyatt F.: Investigations of Tilt Measurements Using Shallow Borehole Tiltmeters, Journal of Geophysical Research, 1974., Vol. 79, No. 8, 4351—4362.
- [5] Berthold J. W. III, Jacobs S. F., Norton M. A.: Dimensional Stability of Fused Silica, Invar and Several Ultralow; Thermal Expansion Materials, Metrologia, 1977., No. 13, 9—16.
- [6] Bilham R., King G.: A Geophysical Wire Strainmeter, Bulletin of the Seismological Society of America, 1976, Vol. 66, No. 6, 2039—2947.
- [7] Daul W., Johnston M. J. S., Jones A. C.: Continuous Strain Measurements During and Preceding Episodic Creep on the San Andreas Fault, Journal of Geophysical Research, 1977., Vol. 82, No. 36, 5683—5691.
- [8] Dratler J. Jr.: Inexpensive linear displacement transducer using a low power lock-in amplifier, Review of Scientific Instruments, 1977., Vol. 48, No. 3, 327—335.
- [9] Gerard V. B.: An Invar wire earth strain meter, Journal of Physics E; Scientific Instruments, 1971. Vol. 4, 689—692.
- [10] Gerard V. B.: Mid New Zealand Earth Strain and Tilt Observations and Precursors of Earthquake, Physics and Engineering Laboratory, Department of Scientific and Industrial Research, Lower Hutt, 1978. (New Zealand).
- [11] Gladwin M. T., Wolfe J.: Linearity of capacitance displacement transducers, Review of Scientific Instruments, 1975, Vo. 46, No. 8, 1099—1100.
- [12] Groten E.: Geodesy and the Earth's Gravity Field, Vol. II, Geodynamics and Advanced Methods, Ferd. Dümmler's Verlag, Bonn, 1979.
- [13] Grafil: Grafil data sheet, Courtaulds Limited Carbon Fibres Unit, Coventry, 1977.
- [14] Hewlett Packard: 5526A LASER measurement system publications, 5301 Stevens Creek Boulevard Santa Clara, California 95050
- [15] Jeffery G. J., Sydenham P. H.: Stability of Strain-Meter Mounts, Geophysical Journal of the Royal astronomical Society, 1973., No. 33, 185—193.
- [16] Marjanović R.: Beiträge zur Deformationsmessung mit mechanischen Extensometern; Dissertation, Darmstadt, 1982.

- [17] Marjanović R.: Automatsko upravljanje na osnovu kontinuiranog mjerenja, V simpozij o rudarskim mjerenjima, Kozara, 1983.
- [18] Press F.: Displacements, Strains and Tilts at Teleseismic Distances, Journal of Geophysical Research, 1965., Vol. 70, No. 10.
- [19] Shopland R. C.: Portable 30-Day unattended System for Recording Earth Strain in a 66-db Range, IEEE Transactions on Geoscience Electronics, 1970., Vol. Ge-8, No. 4.
- [20] Sydenham P. H.: A tensioned-wire strain seismometer, Journal of Scientific Instruments (Journal of Physics E) 1969, Series 2, Vol. 2, 1095-1097.
- [21] Sydenham P. H.: 200 hr Comparison of 10 m Quartz-tube and Quartz-catenary Tidal Strainmeters, Geophysical Journal of the Royal astronomical Society, 1974., No. 38, 377-387.

SAŽETAK

U ovom radu je objašnjen princip mjerenja ekstenzometrima i tiltmetrima. Navedene su, neke postojeće konstrukcije i objašnjenje osobine kao i mogućnosti njihove primjene. Opisani su bitni dijelovi mehaničkih ekstenzometara kao i utjecaji smetnji te mogućnosti njihovog otklanjanja. Navedeni su bitni dijelovi sistema za automatsko mjerenje i upravljanje.

ABSTRACT

In this work the principles of strain and tilt measurement using ekstenzometers and tiltmeters are described. Some present constructions are explained so as the capabilities of their usage. Essential parts of mechanical ekstenzometers, sources of disturbance and the prevention of errors are described. Principal parts of a system for automatic measurement and control are described.

Primljeno: 1983-12-09