
KONTROLA DELOVANJA SEIZMOMETRA

SEISMOMETER PERFORMANCE CONTROL

UDK 550.34.034

Izidor Tasič

mag., Ministrstvo za okolje in prostor, ARSO, Urad za seizmologijo in geologijo, Vojkova 1b, Ljubljana, izidortasic@gov.si

Povzetek

Sodoben seizmometer je naprava, ki pretvori nihanje tal v električni signal. Za pravilno interpretacijo nihanj tal moramo poznati relacijo, ki med seboj poveže obe količini in jo navedejo proizvajalci v spremni dokumentaciji. Zaradi različnih zunanjih dejavnikov pa se lahko dinamične lastnosti vzmetnega nihala v seizmometru, kakor tudi lastnosti vgrajenih magnetov ter drugih elektronskih komponent, sčasoma spremenijo. Zato pravilnost delovanja seizmometra preverjamo na različne načine in v različnih časovnih intervalih. Delovanje seizmometra se natančno preveri z absolutno kalibracijo seizmometra v laboratoriju, ki pa se zaradi različnih pomembnih razlogov pri nas ne izvaja. Seizmometer nadziramo občasno z referenčnim seizmometrom, periodično s testnimi signali ter skoraj vsak dan z odkrivanjem nepravilnosti na zapisih seizmičnih dogodkov, pri čemer si pomagamo s korelacijo in spektri močnostne gostote.

Abstract

The modern seismometer is a device that converts the ground movement into an electrical signal. For the proper interpretation of the ground movement we need to know the relationship that connects both quantities. For each seismometer, this relationship is given by the producer in the accompanying documents. Due to various external factors, the dynamic properties of a spring pendulum as well as the properties of the built-in magnets and other electronic components in a seismometer can change with time. Therefore, the correct functioning of the seismometer is controlled in different ways and at different time intervals. The most accurate control is absolute calibration of the seismometer in the laboratory, but for various important reasons it is not implemented in Slovenia. The seismometer is controlled from time to time with the reference seismometer, periodically with test signals, and almost on a daily basis by detecting anomalies in the seismic records with help of correlation and power spectral density.

Uvod

Seizmograf je naprava za natančno in časovno točno zapisovanje nihanj tal. Te podatke potrebujemo za opredelitev glavnih potresnih parametrov, kot so lokacija žarišča in nadžarišča potresa, velikost potresa in žariščni mehanizem potresa. Število seizmografov in število potresnih opazovalnic nenehno naraščata. Zato je pomemben tudi nenehen nadzor kakovosti njihovih posameznih delov. Glavna sestavna dela seizmografa sta seizmometer, to je senzor za zaznavanje nihanj tal, in enota za ojačitev in beleženje signalov (zajemalna enota). Seizmometri vsebujejo poleg elektronskih sestavnih delov tudi mehanske dele. V vsakem seizmometru so trije senzori, izhod iz seizmometra predstavlja prostorsko nihanje tal v treh med seboj ortogonalnih smereh. Senzorji merijo premikanje tal relativno glede na referenčno točko – utež, ki je prek vzmeti povezana z ohišjem. Premik uteži se kompenzira s povratno električno ustvarjeno silo. Tako ostaja utež v ravnovesni legi, izhodna napetost iz seizmometra pa je sorazmerna hitrosti nihanja tal (Wielandt, 2012). Proizvajalci za vsak seizmometer navedejo relacijo, zapisano v kalibracijskem dokumentu, ki povezuje obe količini, tako da lahko dobimo na podlagi zajetega signala podatke o realnem

nihanju tal. Zaradi različnih zunanjih dejavnikov se lahko dinamične lastnosti vzmeti kakor tudi lastnosti vgrajenih magnetov ter drugih elektronskih komponent sčasoma spremenijo. Zato je treba delovanje seizmometra redno preverjati (Hutt in drugi, 2009).

Kalibracija v laboratoriju (absolutna kalibracija)

Absolutna kalibracija seizmometra je postopek, ko v reguliranih razmerah natančno določimo razmerje med referenčnimi vrednostmi in seizmometrom. Ker merijo seizmometri nihanje tal, mora kalibracija vsebovati relacijo in podatke o tem, kakšen je električni izhod seizmometra glede na stvarno nihanje tal na celotnem frekvenčnem območju seizmometra. Naprave, ki tresejo podlago oziroma ploščo, na kateri stoji merjenec, ter istočasno merijo premike plošče (tresalne mize), so idealna rešitev za absolutno kalibracijo. Ker seizmometri merijo nihanje podlage od nekaj nm/s do nekaj mm/s in na frekvenčnem območju od nekaj tisočink Hertza do nekaj deset Hertzev, so zahteve za tresalno mizo, ki omogoča absolutno kalibracijo seizmometrov, zelo

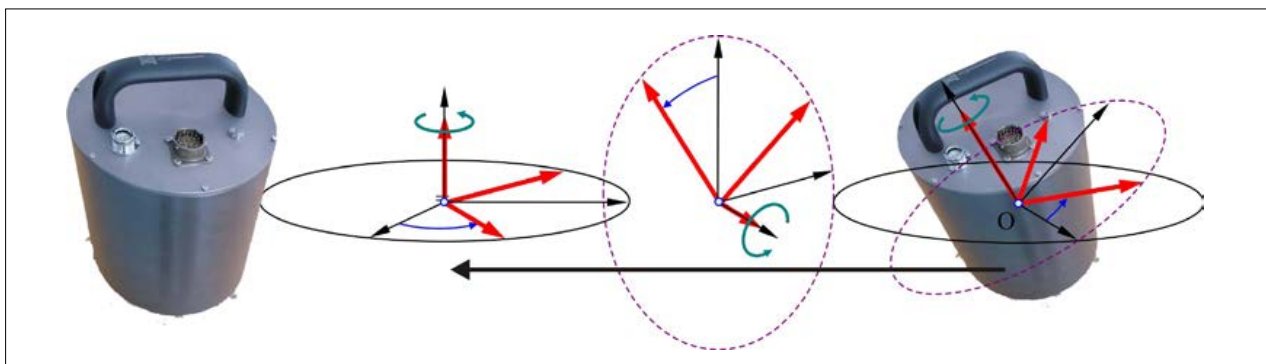
velike. Podlaga, na kateri stoji merjenec, ne sme imeti nihanj, ki jih ne merimo (na primer sukanja podlage, usločenja). Merilniki, ki merijo hitrost nihanja podlage in tako predstavljajo referenčne vrednosti, morajo biti sledljivo kalibrirani itn. Zaradi razmeroma velike teže seizmometra pa je učinkovita uporabnost tresalne mize za namene absolutne kalibracije seizmometra omejena samo na višje frekvence. Zaradi teže merjenca, večina sodobnih širokopasovnih seizmometrov je težja kot 8 kilogramov, se pri nižjih frekvencah zgodi soodvisnost med tresalno mizo, seizmometrom in podlago, na kateri je nameščena tresalna miza, kar zazna seizmometer, in ne referenčni merilniki. Spodnja frekvenčna meja, pri kateri se še lahko izvaja absolutna kalibracija, je odvisna od konstrukcije tresalne mize in je med 0,5 Hz do 0,1 Hz [Larsonnier in drugi, 2014]. Zato se pri nižjih frekvencah uporabljajo kalibracijske tuljave, ki so vgrajene v vseh sodobnih širokopasovnih seizmometrih in prek katerih se imitira pospešek tal. S tako imenovano elektronsko kalibracijo je mogoče umerjati seizmometre tudi pri nižjih frekvencah. S kombinacijo obeh vrst kalibracij v umerjevalnih laboratorijih natančno umerijo seizmometre na celotnem frekvenčnem območju.

Za seizmometre, ki so na potresnih opazovalnicah nameščeni na stalnih lokacijah, absolutna kalibracija seizmometrov v laboratorijih ni priporočljiva zaradi več razlogov. Na potresnih opazovalnicah so seizmometri postavljeni v jaških in so dobro toplotno izolirani. Dnevna sprememba temperature v neposredni bližini seizmometra je v povprečju nekaj stotink Kelvina, tako seizmometri niso podvrženi termičnim šokom, ki bi povzročili spremembe v dinamičnih lastnostih vzmeti. Ker je v sodobnih seizmometrih premik uteži uravnovešen s povratno električno generirano silo, je vpliv uteži na vzmet zanemarljiv, fizikalne lastnosti vzmeti pa se sčasoma skoraj ne spreminjajo. Proizvajalec seizmometrov Guralp trdi, da se seizmometrom, ki so jih dobili v testiranje, parametri prenosne funkcije niso bistveno spremenili tudi po desetih letih. Poleg tega se seizmometer pri namestitvi na potresni opazovalnici natančno orientira in uravnava glede na geografski sever. Če pa se seizmometer

za namene absolutne kalibracije iz potresne opazovalnice transportira do enega od redkih svetovnih laboratorijev, ki omogočajo absolutno kalibracijo, je lahko med transportom podvržen mehničnim in drugim vplivom. Kljub absolutnemu umirjanju lahko pride pri vrnitvi zaradi nepravilnega ravnanja med transportom do sprememb dinamičnih lastnosti seizmometra. Ravno tako je skoraj nemogoče popolnoma identično usmeriti in uravnati seizmometer pri ponovni namestitvi seizmometra na isti lokaciji, saj tega ne omogočajo že seizmometri s svojo ovalno obliko. Ker bi s postopki, ki so povezani z absolutno kalibracijo seizmometra, povzročili več škode, kot pa bi imeli koristi od absolutne kalibracije, se seizmometri na potresnih opazovalnicah preverjajo na kraju. Šele ko so ugotovljena odstopanja, se seizmometer pošlje v popravilo k proizvajalcu, ki po popravilu tudi preveri in po potrebi na novo opredeli prenosno funkcijo.

Kontrola z referenčnim seizmometrom

Kontrola seizmometra z referenčnim seizmometrom lahko poteka v laboratoriju ali pa na potresni opazovalnici. Pri postavitvi referenčnega seizmometra na potresni opazovalnici mora biti poleg stalnega seizmometra na voljo dovolj velik termično izoliran prostor za postavitve referenčnega seizmometra. Postavitev pa mora trajati dovolj dolgo, da na izračun ne vplivajo prehodni pojavi oziroma motnje, ki so posledice relaksacijskih procesov po postavitvi seizmometra. Z referenčnim seizmometrom, če je ta natančno umerjen, je mogoča zelo natančna kontrola testiranega seizmometra. Ker pri tem postopku referenčni seizmometer postavimo v neposredno bližino testiranega seizmometra, s tem dosežemo, da oba seizmometra teoretično zaznavata isti seizmični signal. Potrebujemo še šestkanalno zajemalno enoto, ki zajema podatke iz obeh seizmometrov, pri čemer mora biti instrumentalni šum zajemalne enote pod instrumentalnim šumom seizmometrov. Ker se podatki iz obeh seizmometrov zajemajo sočasno, točna ura v zajemalni



Slika 1: Ker tudi v laboratorijskih razmerah ni mogoče identično orientirati seizmometrov, izračunamo najprej transformacijsko matriko, ki transformira seizmični zapis testiranega seizmometra v prostor referenčnega seizmometra.

Figure 1: Since even under laboratory conditions orientation of two collocated seismometers may not be identical, first the transformative matrix that transforms seismic record of tested seismometer to the reference one is calculated.



Slika 2: Referenčni seizmometer na observatoriju na Golovcu v Ljubljani je STS-2. Je v beli izolacijski posodi (označena s puščico). Desno od te posode so postavljeni seizmometri, ki so v fazi testiranja: STS-2, LE-3D/5s, CMG-40T in CMG-3ESPC.

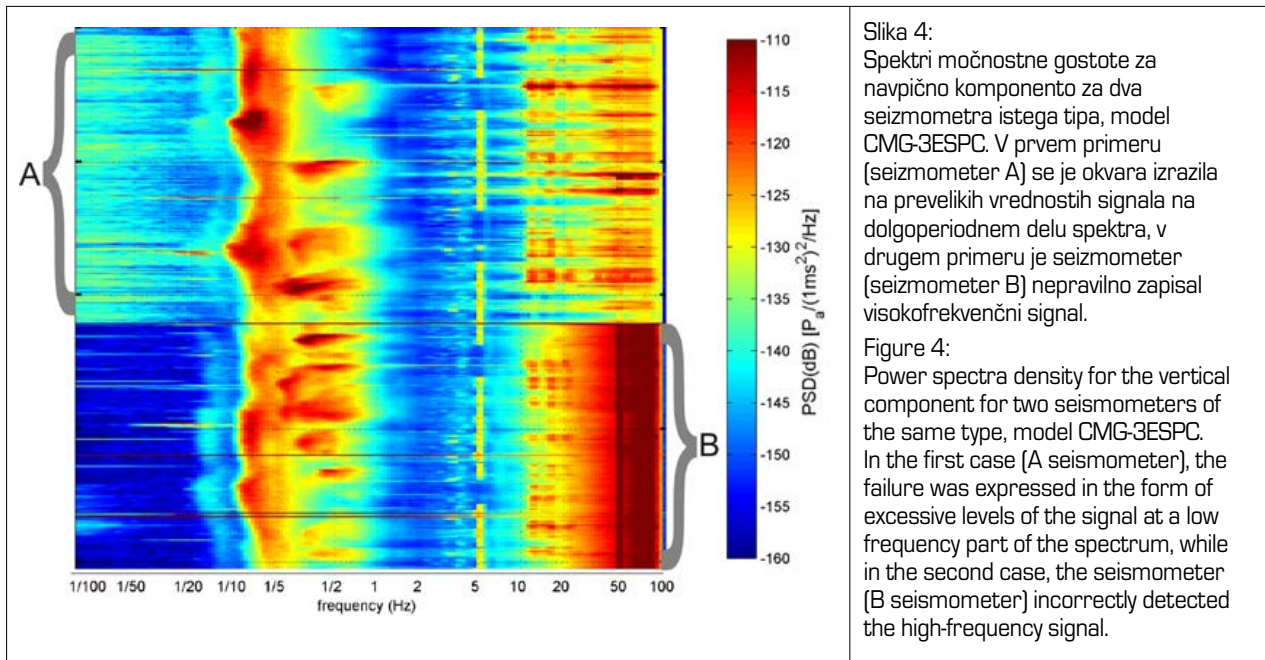
Figure 2: The "reference" seismometer at Golovec observatory in Ljubljana is STS-2 and it is permanently installed inside the white insulation (on the left side of the image). To the right of these insulation are the tested seismometers: STS-2, LE-3D / 5s, CMG-40T and CMG-3ESPC.

enoti ni bistvena, je pa zelo priporočljiva. Ker tudi v laboratorijskih razmerah zaradi konstrukcije seizmometrov ni mogoče identično orientirati obeh seizmometrov ter ker tudi vsi trije izhodi posameznega seizmometra niso idealno pravokotni med seboj, izračunamo najprej transformacijsko matriko (Tasič in Runovc, 2012; 2014), ki transformira seizmični zapis testiranega seizmometra v prostor referenčnega seizmometra ali obratno, odvisno od namena meritve (slika 1). Transformacijska matrika vsebuje veliko koristnih informacij (Tasič in Runovc, 2013). Najpomembnejši podatek, ki ga izračunamo iz transformacijske matrike, je tako imenovano razmerje generatorskih konstant. Ta podatek pove, kako natančno se na frekvenčnem območju med 0,2 in 0,5 Hz ujemata meritvi iz obeh seizmometrov. Iz transformacijske matrike lahko izračunamo tudi, kako sta seizmometra med seboj orien-

tirana. S tem postopkom z referenčnim seizmometrom določimo tudi orientacijo seizmometra v vrtini (Tasič in drugi, 2010). Izračunamo pa lahko tudi druge parametre, recimo odstopanja od teoretično pravokotne postavitve senzorjev v seizmometru. Ko numerično transformiramo seizmični zapis testiranega seizmometra v prostor referenčnega seizmometra, lahko izračunamo še spekter močnostne gostote instrumentalnega šuma (Ringler in Hutt, 2010; Tasič in Runovc, 2012). Kadar v spektru zaznamo odstopanja od pričakovanih vrednosti, lahko kaže to na okvaro seizmometra, na napake v povezovalnih kablilih ali na problem z napajalnikom. Z referenčnim seizmometrom se lahko v nekaterih primerih določi tudi relativna prenosna funkcija testiranega sistema (Pavlis in Vernon, 1994).

Za namene sledljivosti meritev mora biti referenčni seizmometer isti, in to zelo kakovosten širokopasovni seizmometer, ravno tako pa se mora vedno uporabljati ista zelo kakovostna šestkanalna zajemalna enota, kar pa je zelo drago. V Sloveniji meritve z referenčnim seizmometrom najpogosteje opravljamo na observatoriju na Golovcu, kjer za referenčni sistem uporabimo stalno postavljen sistem, seizmometer je STS-2, preverjamo pa seizmometre, ki jih bomo šele postavili na potresnih opazovalnicah (slika 2). Primer: leta 2011 smo poleg referenčnega seizmometra namestili seizmometer istega tipa (STS-2), ki smo ga pozneje postavili na potresno opazovalnico Knežji Dol. Pri namestitvi smo poskusili biti čim bolj natančni pri orientaciji in uravnavanju. Izračunana transformacijska matrika je pokazala, da sta bila seizmometra, kljub vloženemu trudu, nagnjena med seboj za $0,04^\circ$, razlika v orientaciji pa je znašala $0,10^\circ$. Na prvi pogled velika napaka v orientaciji je še vedno močna znotraj ugotovite Ameriškega geološke zavoda (USGS), v katerem so ugotovili, da nekatere orientacije seizmometrov na njihovih potresnih opazovalnicah odstopajo celo do 3° (Ringler in drugi, 2013). Izračuni so tudi pokazali, da so »razmerja generatorskih konstant« med obema seizmometroma med 1,009 in 1,011, kar se ujema s specifikacijami seizmometrov. Ocena v deviaciji v ortogonalnosti senzorjev pa je med $0,01^\circ$ in $0,03^\circ$, kar je bolje, kot so ocenili proizvajalci.

<pre> IME : SKDS INI datoteka: SKDS STS2.ini SEIZMOMETER : STS-2 To[s] : 120 q330 ind s/n: 0100001557A03863 vhod na q330: "sensor A" [1,2,3] tip podatka : HH* info : Q330HRS sn 5658, STS2 S/N 10416 </pre> <p>STOPNICA</p> <pre> podatek : S 2015 04 11 00:50 U: ↑ To[s]: 116.4 ; β: 0.6992 ; U: ↓ To[s]: 119.7 ; β: 0.7103 ; V: ↑ To[s]: 120.6 ; β: 0.7082 ; V: ↓ To[s]: 120.6 ; β: 0.7085 ; W: ↑ To[s]: 119.2 ; β: 0.7036 ; W: ↓ To[s]: 120.7 ; β: 0.7085 ; </pre>	<pre> IME : SKDS INI datoteka: SKDS STS2.ini SEIZMOMETER : STS-2 To[s] : 120 q330 ind s/n: 0100001557A03863 vhod na q330: "sensor A" [1,2,3] tip podatka : HH* info : Q330HRS sn 5658, STS2 S/N 10416 </pre> <p>STOPNICA</p> <pre> podatek : S 2015 05 14 05:30 U: ↑ To[s]: 119.7 ; β: 0.7098 ; U: ↓ To[s]: 119.7 ; β: 0.7103 ; V: ↑ To[s]: 120.6 ; β: 0.7085 ; V: ↓ To[s]: 120.7 ; β: 0.7085 ; W: ↑ To[s]: 120.6 ; β: 0.7084 ; W: ↓ To[s]: 120.7 ; β: 0.7086 ; </pre>	<p>Slika 3: Izračunani parametri pri odzivu na stopnico pred (levo) zamenjavo okvarjenega dela zunanje enote seizmometra in po (desno) njej. Odstopanja od pričakovanih vrednosti smo označili z rumeno.</p> <p>Figure 3: The step response of the system before (left) and after (right) the replacement of the faulty part of external seismometer unit. The yellow background presents incorrect results.</p>
---	---	--



Meritve z referenčnim seizmometrom smo opravljali tudi na posameznih potresnih opazovalnicah (npr.: Tasič in drugi, 2010), pri čemer smo za referenčni seizmometer uporabili seizmometer, ki je bil trenutno na voljo.

Kontrola s testnimi signali

Za sodobne širokopasovne seizmometre, ki so nameščeni na potresnih opazovalnicah, velja priporočilo, da se preverjajo s testnimi signali vsaj enkrat na leto. Zajemalne enote imajo vgrajene kalibracijske module, ki omogočajo vpeljavo analognega signala na kalibracijske tuljave v seizmometru. S temi signali nadziramo relativno stabilnost prenosne funkcije seizmometrov. Večinoma so v zajemalnih enotah vgrajeni testni izhodni signali: »sinus« (od 1 Hz navzdol), »stopnica« in »beli šum«. Čeprav je z opisanimi signali teoretično mogoča absolutna določitev parametrov prenosne funkcije, so analogni signali na izhodu iz zajemalnih enot zaradi rekonstrukcijskega filtra pri pretvorbi D/A deformirani ter se ne skladajo popolnoma s teoretično oziroma nazivno izhodno vrednostjo. Pomanjkljivost tega postopka je tudi, da je zabeležen samo odziv sistema na testne signale, ne pa tudi testni signal. Vseeno pa omogočajo zelo natančno relativno kontrolo stabilnosti prenosne funkcije. Te signale lahko prožimo daljinsko, zaradi česar je seizmometer nepretrgano v svojem stalnem okolju, v neposredni bližini opazovalnice pa tudi ni dodatnih motenj, ki so posledica človeške dejavnosti (recimo hoje). Prednost proženja testnih signalov na daljavo je tudi ta, da je seizmograf takoj po končani kalibraciji v optimalnem stanju.

Na potresni opazovalnici na lokaciji v Skadanščini smo prav s testnim signalom v obliki stopnice odkrili napako na zunanji enoti (HostBOX) seizmometra STS-2. Nizkofrekvenčni odziv sodobnega širokopasovnega seizmometra je natančno opisan s sistemom drugega reda, katerega

bistvena elementa sta nihajni čas nihala (T_0) in kritično dušenje β . Aprila 2015 pa smo namesto pričakovanih vrednosti zaznali odstopanja, ki so kazala na napako (slika 3). Po analizi na potresni opazovalnici in nato na observatoriju na Golovcu smo ugotovili napako v zunanji enoti seizmometra, imenovani »HostBox«. Po zamenjavi enote smo ponovno dobili pričakovane podatke.

Kontrola v skoraj »realnem času«

Za prepoznavanje nepravilnosti pri delovanju seizmometra si pomagamo tudi s podatkom o korelaciji med posameznimi komponentami istega seizmometra. Iz seizmičnega nihanja tal za zadnjo polno uro izračunamo korelacijski koeficient med vsemi tremi ortogonalnimi zapisi seizmometra. Če je vrednost korelacijskega koeficienta prevelika, lahko to kaže na napako, ki jo potrdimo ali ovržemo po natančnejši analizi zapisov nihanj tal. Na istem časovnem intervalu izračunamo še spektre močnostne gostote za seizmične podatke iz vseh potresnih opazovalnic državne mreže potresnih opazovalnic. Če posamezni spektri odstopajo od pričakovanih vrednosti, je to opozorilo za potencialno napako v delovanju seizmometra. Zaradi kompleksnosti nihanj tal postopki prepoznavanja napake v spektrih niso avtomatizirani in jih opravi strokovnjak. Kadar je na podlagi spektrov ugotovljena potencialna napaka v delovanju seizmometra, ga najprej prenesemo v laboratorij na ponovno kontrolo v znanem okolju. Na sliki (slika 4) je primer napake dveh seizmometrov tipa CMG-3ESPC. Z obema seizmometroma smo naredili še dodaten test, zaporedno meritev na isti lokaciji, ter tako izključili vpliv lokalnega okolja. Prvi seizmometer (seizmometer A) je imel prevelike vrednosti v dolgoperiodnem delu spektra, drugi seizmometer (seizmometer B) je imel prevelike

vrednosti v nizkoperiodnem delu spektra. Oba seizmometra smo morali poslati v popravilo k proizvajalcu.

Sklepne misli

Stotine seizmometrov po vsem svetu beležijo nihanje tal ob potresih. Da je njihovo delovanje pravilno, skrbijo lokalni upravljalci seizmoloških mrež. Čeprav so seizmometri

na potresnih opazovalnicah nameščeni v nadzorovanem in termično stabilnem okolju, se lahko zgodi, da meritve nihanj tal niso več zanesljive zaradi sprememb v funkcionalnosti seizmometra, kar se na srečo sicer ne dogaja pogosto. Zato je treba delovanje seizmometrov preverjati. Za kontrolo delovanja seizmometrov na Državni mreži potresnih opazovalnic uporabljamo različne postopke, s katerimi v različnih časovnih intervalih posredno ali neposredno preverjamo pravilnost delovanja.

Viri in literatura

1. Hutt, R. C., Evans, R. J., Followill, F., Nigbor, L. R., Wielandt, E., 2010. Guidelines for standardized testing of broadband seismometers and accelerometers. USGS Open-File Report 2009-1295, U. S. Geological Survey.
2. Pavlis, L. G., Vernon, F. L., 1994. Calibration of Seismometers Using Ground Noise. *Bul. Seis. Soc. Am.* 84, 1243-1255.
3. Ringler, A. T., Hutt, C. R., 2010. Self-Noise Models of Seismic Instruments. *Seis. Res. Lett.*, 81, 972-983.
4. Ringler, A. T., Hutt, C. R., Persefield, K., 2013. Seismic station installation orientation errors at ANSS and IRIS/USGS stations. *Seis. Res. Lett.*, 84, 926-931.
5. Tasič, I., Mali, M., Sinčič, P., 2010. Posodobitev potresne opazovalnice VNDS, Potresi v letu 2009, Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo in geologijo, Ljubljana, 32-35.
6. Tasič, I., Runovc, F., 2012. Seismometer self-noise estimation using a single reference instrument, *J Seismol.*, 16, 183-194.
7. Tasič, I., Runovc, F., 2013. Determination of a seismometer's generator constant, azimuth, and orthogonality in threedimensional space using a reference seismometer, *J Seismol.*, 17, 807-817.
8. Tasič, I., Runovc, F., 2014. The development and analysis of 3D transformation matrices for two seismometers, *J Seismol.*, 18, 575-586.
9. Larsonnier, F., Nief, G., Dupont, P., Millier, P., 2014. Seismometers calibration: comparison between a relative electrical method and a vibration exciter based absolute method. IMEKO 22nd TC3, 12th TC5 and 3rd TC22 International Conferences, Cape Town, South Africa, dosegljivo na <http://www.imeko.org/publications/tc22-2014/IMEKO-TC22-2014-013.pdf>.
10. Wielandt, E., 2012. Seismic sensors and their calibration. Chapter 5, in: *New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2)*, IASPEI, ed. Bormann, P., 1-51.