

ADAPTACE KYVADLOVÉHO SEIZMOMETRU S-5-S PRO MĚŘENÍ ROTAČNÍ SLOŽKY SEIZMICKÝCH KMITŮ

ADAPTATION OF PENDULOUS SEISMOMETER S-5-S FOR MEASUREMENT OF ROTATION COMPONENT OF SEISMIC VIBRATIONS

Jaromír Knejzlík¹, Zdeněk Kaláb², Zdeněk Rambouský³

Abstrakt

Sovětský elektrodynamický seizmometr S-5-S z 60. let minulého století je možno adaptovat pro měření rotační složky seizmických kmitů. Měřicí a tlumicí elektrodynamického měniče jsou v původním seizmometru S-5-S instalovány na nesymetrické dvouramenné páce, jejíž osa otáčení je realizována dvěma křížovými závěsy z plochých per. Kyvadlo je v rovnovážné poloze udržováno astazovaným pružinovým závěsem.

Při níže popsané adaptaci seizmometru S-5-S je odstraněn pružinový závěs kyvadla a na stranu páky je přidáno závaží, pomocí něhož je kyvadlo vyváženo tak, aby těžiště celkové hmoty leželo v ose otáčení. Na jeden křížový pérový závěs je instalován tenzometrický snímač polohy kyvadla. Dynamické parametry upraveného kyvadlového systému, tj. vlastní perioda a tlumení, jsou nastaveny pomocí zpětných vazeb, které jsou zavedeny do tlumicího měniče z měřicího elektrodynamického měniče úhlové rychlosti a tenzometrického snímače polohy přes elektronické obvody.

Upravený seizmometr umožňuje měření kolem svislé i vodorovné osy. Výstupní signál může být úměrný úhlu nebo úhlové rychlosti.

Abstract

Soviet electrodynamic seismometer of S-5-S type made in the sixtieth of the last century is possible to adapt for measurement of rotational component of seismic vibrations. Mechanical system of the original S-5-S seismometer consists of sensing and dumping electrodynamic transducers mounted on unsymmetrical two-arm pendulum. This pendulum is hanged on basement using two pairs of crossed flat springs, which operate as axis of rotation. The pendulum is balanced by additional spring.

Below described adaptation of the S-5-S seismometer covers removing the additional spring and adding an additional mass on the damping arm. This new mass is used for balancing of pendulum into axis of rotation. Strain-gauge angle sensor is installed on one pair of flat spring. Main dynamic parameters of developed rotation sensor, e.g. natural period and its damping are controlled electronically by feedback of angular displacement and angular velocity, both conducted to the damping transducer coil.

This new rotation sensor named S-5-SR enables measurement of rotational component of ground motion in the horizontal plane or in the vertical one. Output signal from this new type of rotational sensor can be proportional either to rotation displacement or rotation velocity.

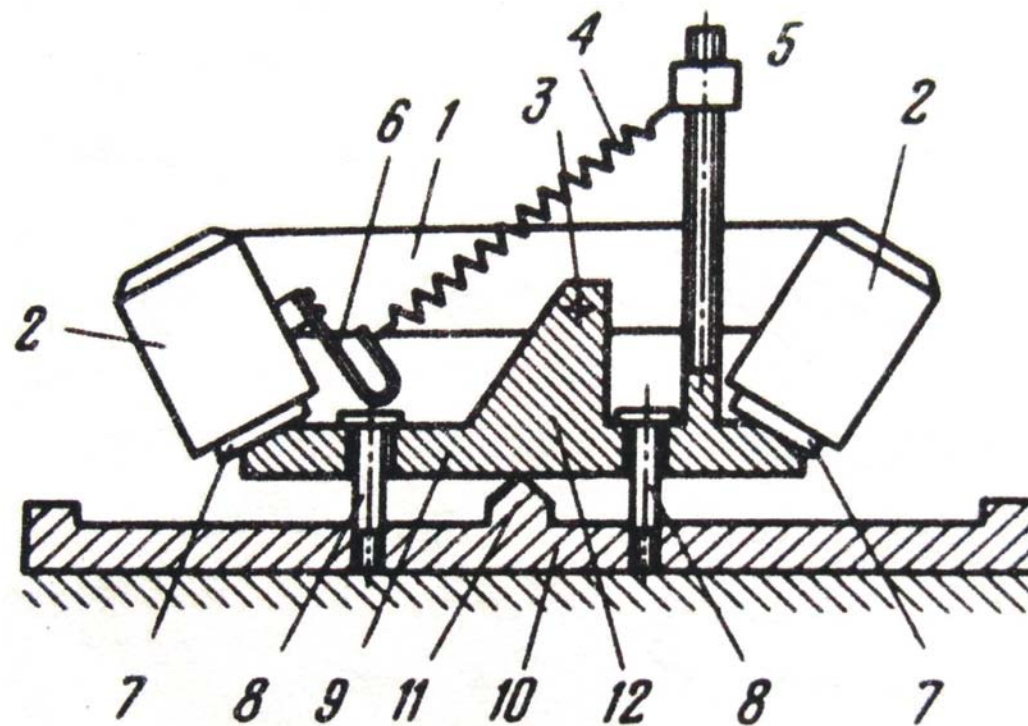
Klíčová slova

rotační složka kmitání, seismometr S-5-S, rotační sensor

1 Úvod

Pohyby půdy, které jsou generovány zemětřeseními, jsou úplně popsány šesti složkami, tj. třemi translačními a třemi rotačními složkami. Rotační složky jsou známy již několik století, avšak až v posledním desetiletí je věnována větší pozornost jejich přesnému měření. V epicentrálních oblastech mohou při silných zemětřeseních vznikat rotační složky kmitů o úhlové rychlosti až $10^{-1} \text{ rad.s}^{-1}$, které mohou významně namáhat stavební konstrukce. S rostoucí vzdáleností od epicentra amplituda rotačních složek rychle klesá na zanedbatelnou hodnotu. Některé studie ukazují jejich důležitost pro seismologické analýzy i inženýrské aplikace (např. BSSA, 2009; řada referátů prezentovaných na konferencích ESC). Vysoce citlivé senzory rotačních kmitů založené na principu optických interferometrů se používají ke studiu rotačních kmitů Země.

Rotační složky kmitů lze získat digitálním zpracováním záznamů translačních kmitů z polí třísložkových seismických senzorů. V současné době bylo vyvinuto několik konstrukcí staničních senzorů pro měření rotačních složek kmitů. Například v BSSA (May 2009) bylo publikováno devět článků, v nichž jsou popsány konstrukce a testování rotačních senzorů. Komerčně jsou dostupné třísložkové senzory rotačních kmitů R-1 a R-2 (www.eentec.com). Interpretace rotačních kmitů se začíná uplatňovat i v průzkumné seizmice. K tomuto účelu je například vyvinout levný robustní senzor, který by bylo možno levně produkovat a používat v rozsáhlých soustavách (array). V říjnu 2010 byl k této problematice v Praze uspořádán 2nd International Workshop on Rotation Seismology and Engineering Applications. V ČR je tato problematika řešena především na MFF UK Praha, GFÚ AVČR, v.v.i. Praha, ÚSMH AVČR, v.v.i. Praha a ÚGN AVČR, v.v.i. Ostrava. Brokešová a Málek (2010) prezentovali mechanický senzor, který je založen na vyhodnocení diferenciálních signálů z geofonů, které jsou instalovány na obvodu pevné kruhové základny. V ÚSMH je vyvíjen rotační senzor s kapacitním snímačem pohybu. Princip kapalinového



Obr. 1 Schéma mechanického uspořádání seismometru S-5-S pro snímání vertikálních kmitů (Aranovič et al. 1974)

rotačního senzoru a první výsledky ověřovacích měření prototypu jsou publikovány v práci Jedličky et al. (2009). V tomto článku předkládáme popis přestavby kyvadlového seismometru S-5-S na jednoduchý jednosložkový staniční rotační senzor, první výsledky naměřených parametrů a příklad záznamu důlně indukovaného seizmického jevu registrovaného na experimentální stanici v Doubravě v OKR.

2 Mechanická konstrukce seismometru S-5-S

Původní seismometr S-5-S je typu (Mass-on-Rod Pendulum) s elektrodynamickým snímacím a tlumicím měničem je určen k snímání kmitů v rozsahu period 5 – 0,01 s. Schéma mechanického uspořádání pro snímání vertikálních kmitů je na Obr. 1.

Konstrukční prvky snímače jsou namontovány na chassis (9), které je upevněno 4 šrouby (8) ke dvěma hrotům (11) na základně kostry (10). Kyvadlo (1) tvoří dvouramenná páka, na jejíž konce jsou přimontovány identické magnety (2) elektrodynamických snímačů (ET). Cívky (7) ET jsou upevněny na chassis. Kyvadlo je zavěšeno na chassis dvěma křížovými pérovými závěsy (3). Kyvadlo je udržováno v rovnovážné poloze pružinou (4), která je zavěšena mezi termokompensátor (6) a regulovatelný závěs (5). Redukovaná délka kyvadla je 0,425 m. Změnou napnutí a bodu zavěšení pružiny se seřizuje efektivní tuhost zavěšení kyvadla a tím i perioda jeho vlastních kmitů $T_0 = 5$ s. Optimální tlumení seismometru se dosahuje zatížením cívky tlumicího ET rezistorem nebo jejím zkratováním.

Chassis lze ve skříni seismometru otočit o 90° a tím seismometr přizpůsobit pro registraci horizontálních kmitů. Obr. 1 na výše uvedený popis jsou převzaty z publikace Aranovic et al. (1974). Protože osa otáčení kyvadla neleží v těžišti kyvadla, seismometr registruje v součtu translační kmity kolmé na osu otáčení a rotační kmity kolem této osy.

3 Adaptace seismometru S-5-S na rotační senzor S-5-SR

Aby upravený seismometr S-5-SR registroval jen rotační kmity, je nutno kyvadlo vyvážit tak, aby střed jeho momentu setrvačnosti ležel v ose otáčení. K tomuto účelu je na kratší rameno kyvadla přidáno pevné závaží a kolmo k ose otáčení jsou instalována v kolmých směrech dvě vyvažovací závažíčka. Termokompensátor (6), pružina (4) a závěs (5) jsou odstraněny. Tato mechanická úprava je patrná z Obr. 2.

Pro vysvětlení principu korekce vlastní periody T_0 a tlumení rotačního seismometru vycházíme z rovnice vlastních kmitů kyvadla seismometru, která je dána vztahem:

$$m \times r \times \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + D \times \frac{d\varphi}{dt} + S \times \varphi = 0 \quad (1)$$

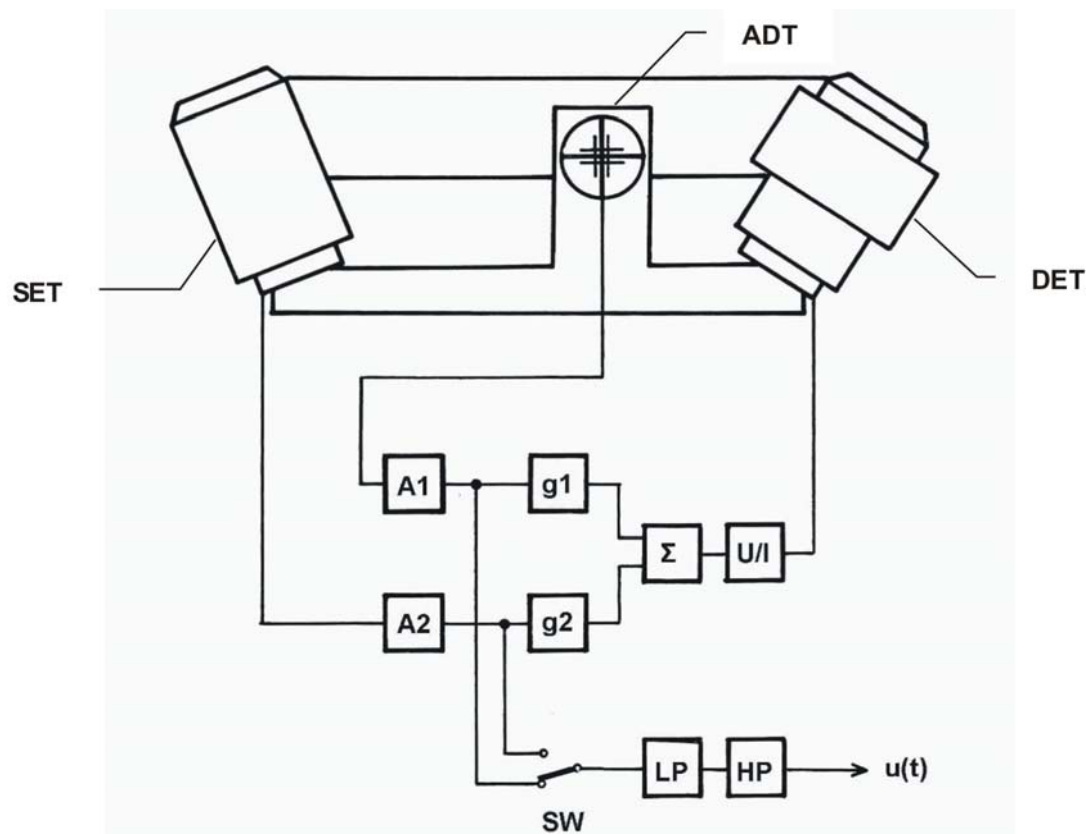
kde m – ekvivalentní hmotnost momentu setrvačnosti kyvadla,
 r – ekvivalentní poloměr momentu setrvačnosti kyvadla,
 D – tlumicí moment,
 S – tuhost závěsů kyvadla.

Perioda vlastních kmitů T_0 a konstanta poměrného tlumení b jsou dány vztahy:

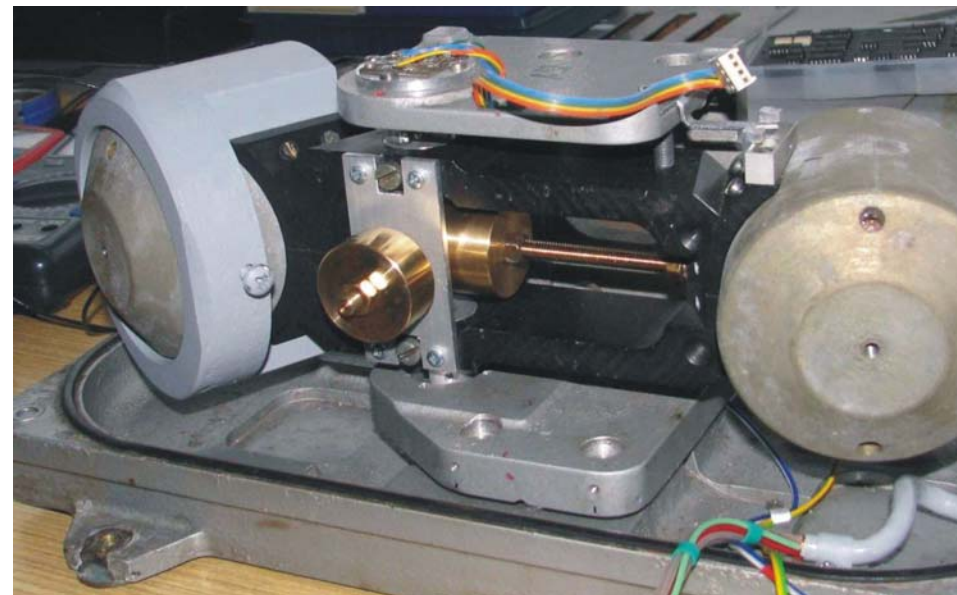
$$T_0 = 2\pi \times \sqrt{\frac{m \times r}{S}} \quad (2)$$

$$b = \frac{D}{2m \times r} \quad (3)$$

Vlivem výše popsaných mechanických úprav seismometru se změnil všechny parametry v rovnici (1). Vzroste hmotnost m , a změnil se ekvivalentní poloměr r . Původní pružinový astatický závěs kyvadla zaváděl do kmitavé soustavy kyvadla zápornou tuhost. Po jeho odstranění tuhost závěsů kyvadla vzrostla. Proto klesla vlastní perioda



Obr. 3 Blokové schéma elektronických obvodů seismometru S-5-SR



Obr. 2 Mechanická úprava vyvážení kyvadla. Instalace pro měření rotačních kmitů v horizontální rovině

kyvadla z 5 s na 3,3 s; systém nebylo možno optimálně ztlumit jen zkratem cívký tlumicího elektrodynamického měniče (dále DET). Parametry D a S a tím i T_0 a b lze však korigovat elektronicky pomocí zpětnovazebních proudů, zavedených do tlumicího DET. Zpětnovazební proud pro korekci D musí být úměrný úhlové rychlosti $d\varphi/dt$ a lze jej tudíž odvodit ze signálu elektrodynamického měniče SET. Pro elektronickou korekci tuhosti S je potřebný zpětnovazební proud úměrný úhlové výchylce φ . Pro jeho generování je nutno seismometr doplnit o snímač úhlové výchylky kyvadla (dále ADT).

Blokové schéma elektronických obvodů pro realizaci výše popsaných korekcí je na Obr. 3. Snímač úhlové výchylky ADT je realizován jako úplný tenzometrický most, jehož jednotlivé tenzometry jsou nalepeny na plochá pera křížového závěsu

kyvadla. Konstrukce tohoto typu snímače byla již dříve vyvinuta pro úpravu seismometru SM-3 k měření posunutí a je podrobněji popsána v článku Kalába a Knejzlíka (2000). Signál úměrný úhlové výchylce je zesilován zesilovačem A1 a dále prochází přes útlumový člen g_1 , ideální sčítací obvod Σ a měnič napětí/proud (U/I) do DET. Změnou útlumu g_1 lze regulovat výslednou elektronicky sníženou tuhost systému kyvadla S a tím nastavovat i vlastní periodu T_0 . Změnou vyvážení ADT se provádí nastavení nulové polohy kyvadla. Tyto obvody však nejsou na Obr. 3 vyznačeny.

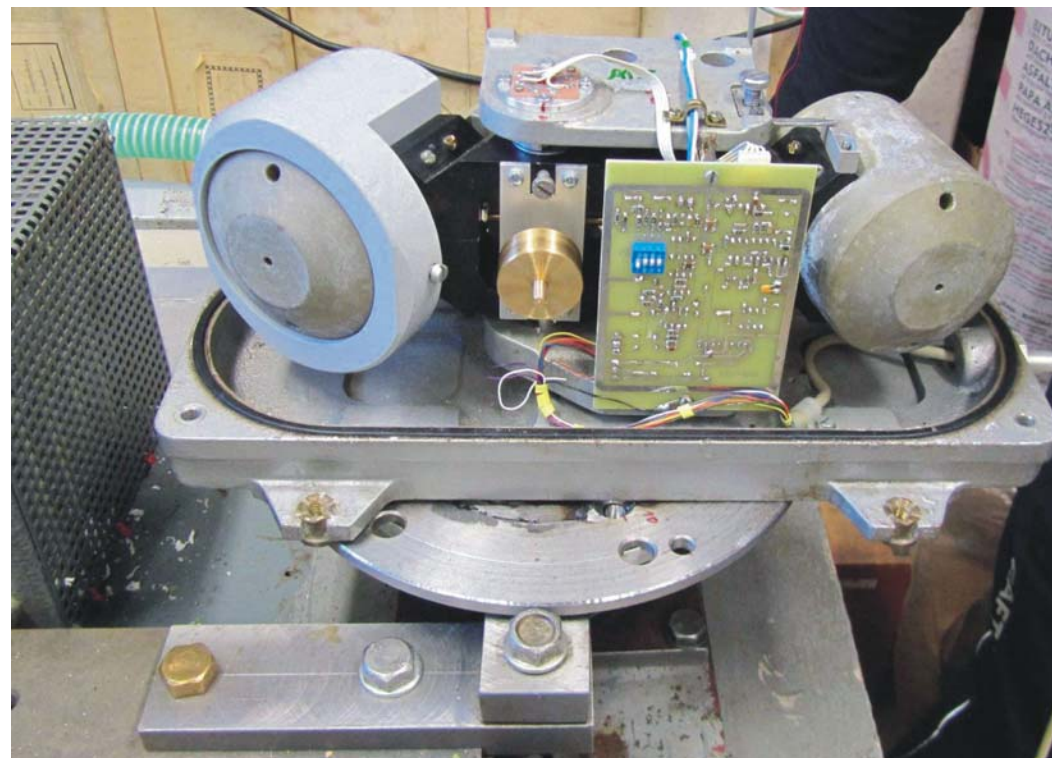
Signál úměrný úhlové rychlosti $d\phi/dt$ je zesilován zesilovačem A2 a poté je přes útlumový člen g_2 , ideální sčítací obvod Σ a U/I zaveden do DET. Změnou útlumu g_2 lze regulovat výsledný tlumicí moment D a tím i poměrné tlumení systému b.

Měřený signál úhlové výchylky ϕ nebo úhlové rychlosti $d\phi/dt$ se odebírá přes přepínač SW buď z výstupu A2 nebo A1. Tento signál je dále veden přes dolnofrekvenční propust LP a hornofrekvenční propust HP. LP má mezní frekvenci cca 0,01 Hz a slouží hlavně k odstranění stejnosměrné složky měřeného signálu. HP Besselova typu omezuje frekvenční rozsah shora a potlačuje především rušení vznikající parazitními kmity kyvadla při vyšších frekvencích. V popisovaném prototypu S-5-SR je nastavena na 25 Hz.

Elektronické obvody podle Obr. 3 jsou instalovány na desce plošných spojů uvnitř skříně seismometru (Obr. 4). Kvůli dosažení maximální citlivosti byla převinuta cívka snímacího elektrodynamického měniče SET tak, že její konstanta citlivosti se zvýšila čtyřikrát. Instalace tenzometrického snímače úhlové výchylky ADT je zřejmá z Obr. 2 a Obr. 4.

4 Parametry adaptovaného seismometru S-5-SR

Základní parametry adaptovaného seismometru S-5-SR v provedení pro měření rotačních kmitů v horizontální rovině byly ověřovány na testovacím vibračním stole v GFÚ. Tento vibrační stůl umožňuje generování translačních i rotačních kmitů. Při konstantní amplitudě harmonických kmitů 50 μm (špička-špička) byly proměřovány konstanty citlivosti pro úhlovou rychlost i úhlovou výchylku a parazitní citlivost na translační kmity. Amplitudy výstupních signálů byly měřeny spektrálním analyzátozem Brüel & Kjaer Type 2031. V rozsahu rychlostí kmitání do 10 mrad/s byla naměřena konstanta citlivosti pro úhlovou rychlost $k(d\phi/dt) = 52,6 \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$. Nad 10 mrad^{-1}



Obr. 4 Seismometr S-5-SR instalovaný na rotačním stolku



Obr. 5 Instalace seizmometrů na experimentální stanici Doubrava v OKR. Vlevo senzor Vigeo kontrolní aparatury Vistec GAIA

růstem úhlové rychlosti kmitání citlivost klesá. Je to způsobeno nehomogenitou magnetického pole SET. Pro kanál úhlové výchylky byla stanovena konstanta citlivosti $k(\varphi) = 1393 \text{ V}\cdot\text{rad}^{-1}$.

Pro parazitní citlivost na translační kmity na různých frekvencích při konstantním rozkmitu $50 \mu\text{m}$ (špička-špička) byla zjištěna konstanta citlivosti $k_p = 1,1 \text{ mV/Hz}$. Seizmometr byl orientován tak, aby směr mechanického kmitání byl kolmý na kyvadlo. Při výpočtu odstupe signálu úhlové rychlosti od parazitního translačního signálu R_t se nejprve stanoví úhlový rozkmit φ_t , při kterém střed snímacího senzoru SET dosáhl na daném poloměru otáčení (132 mm) lineárního rozkmitu $50 \mu\text{m}$. Pro tento úhlový rozkmit je vypočten teoretický signál a ten je porovnán s naměřeným parazitním translačním signálem. Takto stanovený R_t klesá s frekvencí od 70 dB pro $2,5 \text{ Hz}$ na 30 dB pro 25 Hz . To je způsobeno pravděpodobně nedokonalým dynamickým vyvážením kyvadla seizmometru a parazitními kmity závěsů kyvadla a ostatních dílů seizmometru. Nejsou také známy parazitní kmity samotného vibračního stolu. Ve spektrech měřených signálů byly totiž pozorovány složky, jejichž kmitočty nejsou harmonické násobky budicí frekvence a mohou být způsobeny pohonem vibračního stolu. I tak však je $R_t > 40 \text{ dB}$ v rozsahu frekvencí pod $12,5 \text{ Hz}$, což je hodnota srovnatelná s profesionálně vyráběným senzorem R-2 (Evans et al, 2010). Úroveň vlastního šumu jsme nebyli schopni určit kvůli vysokému seizmickému neklidu.

5 Příklad záznamu rotační složky důlně indukovaného seizmického jevu

Pro ověření funkce a existence rotačních kmitů generovaných důlně indukovanými seizmickými jevy v OKR byl rotační seizmometr S-5-SR spolu s jedním vertikálním a jedním horizontálním seizmometrem SM-3 nainstalován na betonový základový nosník ve sklepní místnosti v budově Obecního úřadu v Doubravě na Karvinsku (Obr. 5).

Rotační seizmometr S-5-SR je konfigurován pro měření úhlové rychlosti rotačních kmitů v horizontální rovině (tj. kolem vertikální osy). Horizontální SM-3 snímá kmity ve směru kolmém na kyvadlo S-5-SR. Seizmometry jsou připojeny na tříkanálovou registrační aparaturu PCM3-EPC4.

Frekvenční rozsah registrace je 0,5 – 30 Hz, vzorkovací frekvence 100 Hz, dynamika digitalizace je 120 dB. Příklad záznamu důlně indukovaného jevu ze dne 5. 2. 2011 v 5:05:49 je uveden na Obr. 6.

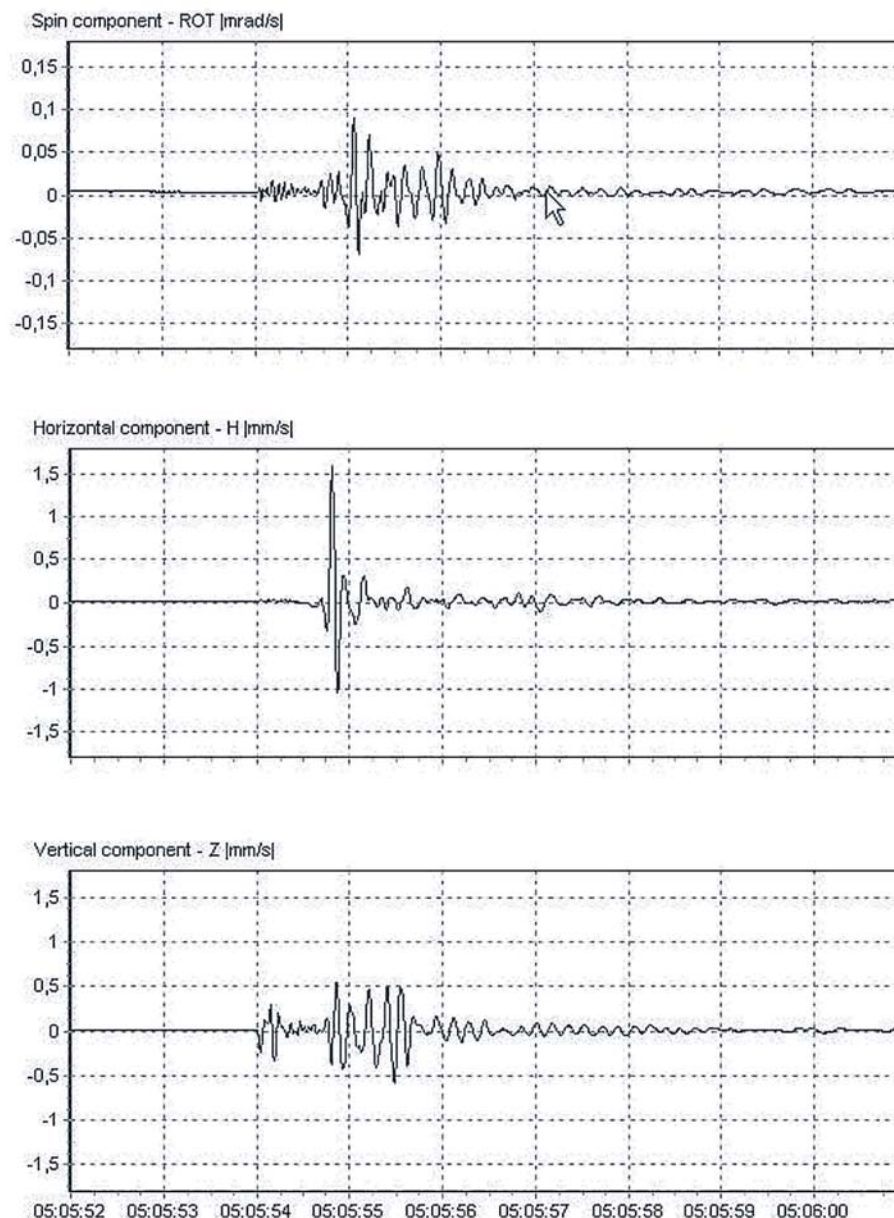
Představený záznam i řada dalších záznamů vlnových obrazů dokazuje existenci rotační složky kmitů, jejíž charakter je odlišný od záznamu horizontální i vertikální translační složky. Protože po dobu měření nevznikl důlně indukovaný seizmický jev s významnějším vibračním projevem na povrchu, není možno provést detailnější interpretaci záznamů. Jsme si vědomi skutečnosti, že tvar vlnových obrazů je zřejmě značně ovlivněn místem instalace a odezvou budovy.

6. Závěr

Adaptací seismometru S-5-S lze realizovat použitelný staniční snímač rotační složky seizmických kmitů ve frekvenčním rozsahu 0,2 – 25 Hz. Snímač lze konfigurovat pro měření rotačních kmitů kolem vertikální i horizontální osy, přičemž výstupní signál může být úměrný úhlové výchylce nebo rychlosti. Prvá laboratorní měření parametrů senzoru prokázala jeho vyhovující vlastnosti, které bude možno dalším vývojem ještě zlepšit. Z Obr. 6 lze podle amplitudy signálu seizmického jevu, která nepřesahuje $100 \mu\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$, odhadnout, že úroveň vlastního šumu S-5-SR je řádu $0,1 \mu\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$.

Při experimentálním provozu na seizmické stanici v Doubravě na Karvinsku byly získány první záznamy rotační složky kmitů vyvolaných důlně indukovanými seizmickými jevy. Ohniska těchto jevů jsou často lokalizována do oblasti pod seizmickou stanicí, kde probíhá těžba. Lze zde tedy v souladu s teorií tyto rotační složky kmitů očekávat.

V lednu 2011 bylo Úřadem průmyslového vlastnictví uděleno Osvědčení o zápisu užitého vzoru, reg.č. 21679, pro výše popsanou adaptaci seismometru S-5-S k měření rotačních složek signálu.



Obr. 6 Příklad záznamu důlně indukovaného seizmického jevu na stanici Doubrava v OKR. Spin component = rotační složka

Poděkování

Výzkum je realizován v rámci OZ 30860518, výzkumný záměr řešený na ÚGN, dílčí úkol „Studium vybraných fyzikálních polí a jejich projevů v horninovém masívu a observatorní činnost“. Autoři děkují GFÚ za možnost provedení laboratorních testů na jejich zařízení.

Literatura

- ARANOVIC Z. I., KIRNOS D. P., FREMD V. M. Apparatura i metodika seizmometričeskich nabljudenij v SSSR. *Nauka, Moskva*, 1974, p. 54–55.
- BSSA (2009) Rotational Seismology and Engineering Applications. *BSSA*, May 2009.
- EVANS ET AL., 2010 Performance of New R-2 Sensor. *Abstract ve sborníku z 2nd International Workshop on Rotation Seismology and Engineering Applications*, Prague.
- BROKEŠOVÁ J., MÁLEK J. New Portable Sensor System for Rotational Seismic Motion Measurements. *Rev. Sci. Instrum.* 81, 084501 (2010); doi:10.1063/1.3463271 (8 pages)
- KALÁB Z., KNEJZLÍK, J. Seismometer SM3 as Displacement Sensor. *Acta Montana ISRM AS CR*, Czech Republic, Prague, Series A, No 16 (118), 2000, p. 109-115

Autoři

- ¹ Ing. Jaromír Knejzlík, CSc. – Ústav geoniky AV ČR, v. v. i., Studentská 1768, 708 00, Ostrava-Poruba, knejzlik@ugn.cas.cz
- ² prof. RNDr. Zdeněk Kaláb, CSc. – Ústav geoniky AV ČR, v. v. i., Studentská 1768, 708 00, Ostrava-Poruba, též VŠB-TU Ostrava, FAST, L. Poděšť 1875, 708 33 Ostrava-Poruba, kalab@ugn.cas.cz
- ³ Ing. Zdeněk Rambouský – Ústav geoniky AV ČR, v. v. i., Studentská 1768, 708 00, Ostrava-Poruba, rambousk@ugn.cas.cz