

Monitorovanie stavebného objektu snímačmi naklonenia

Peter Kyrinovič¹ a Alojz Kopáčik²

Monitoring of Building Structure by Tilt sensors

This paper discusses about the dynamic monitoring of stability (tilt measurement) of bearing pillar of high-rise building using the electronic measuring system. The electronic measuring system consists of Libela 2800 tilt sensor, input/output device for the AE 2DN tilt sensor, measuring amplifier and also the Spider8 analog/digital converter and the registration equipment (notebook). The basic part of uniaxial tilt sensor creates a frame, on which is among damping plates hung a pendulum (ferromagnetic kernel). The tilt value is determined on a principle of electromagnetic induction by changing the position of ferromagnetic kernel in the reel. The range of pendulum movement is $\pm 2,5$ mm/m and the accuracy of the tilt determination is 0,001 mm/m. The monitored building represents, from the point of constructional view, a ferro-concrete rectangular skeleton, which consists of vertical bearing pillars, on which are guyed longitudinal and transverse girders. The building ground-plan is rectangular with the dimensions of 75 m (distance) and 12 m (width). The building has two underground and six above the ground floors with constructional high of 3,40 m. Whole highth of the above ground part of building is 20,4 m. The pillar tilt was measured in the transverse direction of the building at the level of the second floor using the Libela 2800 electronic sensor. The sensor was situated on the metallic console (L-profile), which was assembled on a lateral side of the circuit bearing pillar at the highth of 8,3 m above the ground level. Together with the tilt monitoring, the outside air temperature in the close area of pillar was measured.

The tilt measurement was carried out continuously for 168 hours with the recording frequency of 1 Hz (1 measurement/second). The file of the measured data with 603 950 records was reduced to the file with 1006 records, which corresponds to the record of the every tenth minute. The measured tilt values represent from the mathematical point of view, a time series. The time series of the measured value is a sum of the trend, seasonal, cyclic and the stochastic component. By the application of time series analysis using the regression method and the Box-Jenkinson methodology, we decompose systematic components and isolate stochastic errors, which rise by the measurement. Individual components of time series are expressed mathematically as a function of time. A precise and exact mathematic-statistical data processing guarantees the definite coefficient estimation of the time series function and enables a correct interpretation of results. The difference between the initial and the final tilt value in a range of measurement (168 hours) is 0,218 mm/m and the relative transverse movement of pillar (building) at the highth of 8,3 m would reach the value of 1,81 mm.

Key words: measuring system, sensor, tilt, calibration, time series, trend component

Úvod

Meranie je nevyhnutnou zložkou poznávania skúmaných objektov a procesov. Určovanie rozmeru, a tvaru, ako i meranie posunov a pretvorení objektov, sa v minulosti vykonávalo prevažne geodetickými metódami. Statické geodetické metódy zaznamenali stav objektu v istom časovom okamihu, resp. v čase merania.

Narastajúce požiadavky na presnosť, minimalizovanie času potrebného na meranie a v neposlednom rade požiadavka kontinuálneho dlhodobého monitorovania stavebného objektu spôsobuje, že geodetické metódy v niektorých oblastiach ustupujú do pozadia a sú nahrádzané progresívnymi elektronickými metódami.

Súčasná výpočtová a meracia technika umožňuje vykonávať meranie a registrovanie údajov v reálnom čase. Meranie pomocou elektronických snímačov má výhodu v možnosti digitalizácie elektrického signálu a jeho jednoduchého prenosu a registrácie. Elektronické snímače umožňujú okrem merania statických javov stavebných objektov realizovať vďaka vysokej frekvencii zberu údajov aj meranie dynamických javov.

Predkladaný príspevok pojednáva o monitorovaní stability nosného piliera budovy elektronickým snímačom naklonenia AE 2 DN a meracieho systému Spider8, uvádza popis meracieho systému a jeho prípravu, ako aj samotný postup merania. Ťažisko článku je zamerané na spracovanie meraných údajov naklonenia, získaných kontinuálnym meraním. Merané údaje predstavujú z matematického hľadiska časový rad. Korektné a exaktné matematicko-štatistické spracovanie údajov pomocou regresnej analýzy a Box-Jenkinsonovej metodológie zaručuje jednoznačný odhad koeficientov funkcie časového radu, čo umožňuje správnu interpretáciu výsledkov.

Elektronický merací systém

Elektronický merací systém vo všeobecnosti predstavuje súbor snímačov, prístrojov a zariadení, ktoré umožňujú merať pozorovaný objekt alebo jeho vlastnosti, namerané údaje upravovať, následne registrovať

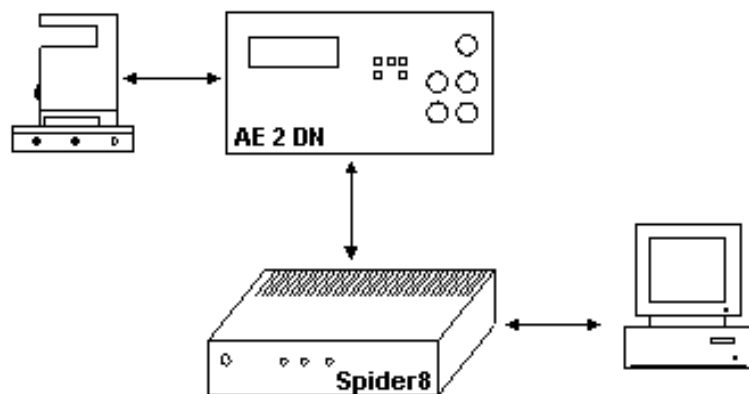
¹ Ing. Peter Kyrinovič, Katedra geodézie, Stavebná fakulta STU Bratislava, Radlinského 11, 813 68 Bratislava, tel: 02-5927 4310, peter.kyrinovic@stuba.sk

² prof. Ing. Alojz Kopáčik, PhD., Katedra geodézie, Stavebná fakulta STU Bratislava, Radlinského 11, 813 68 Bratislava, tel: 02-5927 4559, alozj.kopacik@stuba.sk

(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 9. 5. 2005)

a vyhodnocovať. Výstupný signál elektronických snímačov môže byť analógový alebo digitálny. V prípade analógového výstupného signálu je nutné signál pred spracovaním upraviť, zosilniť a digitalizovať (Klementev et. al, 1991). Meranie, úprava a registrácia musí pritom prebiehať súčasne v reálnom čase. Spracovanie a vyhodnotenie údajov sa môže vykonávať kontinuálne počas merania alebo po skončení merania, tzv. post-processingovým spracovaním.

Elektronický merací systém použitý na monitorovanie naklonenia nosného piliera stavebného objektu tvorí:



- snímač naklonenia, (obr. 1) Libela 2800,
- vstupno-výstupná jednotka pre snímač naklonenia – AE 2 DN,
- merací zosilňovač a analógovo-digitálny prevodník – Spider8,
- registračné zariadenie – osobný počítač,
- napájacie a prepojujacie káble.

Obr. 1. Schéma elektronického meracieho systému

Fig. 1. Scheme of electronic measuring system

Snímač naklonenia Libela 2800

Snímač naklonenia Libela 2800 (Steinmayer, Nemecko) je určený na meranie uhla sklonu, odchýlok od rovinnosti a na určenie priamky alebo roviny s požadovaným sklonom (Kubanka et. al, 1996). Základnú časť jednoosého snímača tvorí rám, na ktorom je medzi tlmiacimi platničkami zavesené kyvadlo. Rozsah pohybu kyvadla je $\pm 2,5$ mm/m. Poloha závesného kyvadla je snímaná pomocou diferenciálneho transformátora. Snímač obsahuje aretačnú skrutku na zaistenie závesného kyvadla počas prenosu alebo manipulácie a reiteračnú skrutku na mechanické nastavenie nulovej polohy kyvadla. Vzhľadom na malý rozsah výkyvu kyvadla musí byť snímač pred zapnutím urovnaný do vodorovnej polohy. Urovnávanie sa zabezpečuje pomocou kruhovej libely, ktorá je umiestnená v hornej časti snímača a kovových podložiek.

Snímač je napájaný z externého zdroja umiestneného vo vstupno-výstupnej jednotke AE 2 DN (obr. 2).



Vstupno-výstupná jednotka umožňuje meniť rozlišovaciu schopnosť výstupného analógového signálu v hodnotách 0,01 alebo 0,001 mm.m⁻¹ ako aj elektronické nulovanie výstupného signálu. Výsledná hodnota naklonenia je zobrazovaná priamo na digitálnom displeji jednotky.

Obr. 2 Vstupno-výstupná jednotka AE 2 DN a snímač naklonenia Libela 2800

Fig. 2. Input/output device of AE 2 DN and LIBELA 2800 tilt sensor

Použitie vstupno-výstupnej jednotky AE 2 DN nie je za normálnych okolností nutné, nakoľko všetky jej funkcie dokáže plne nahradiť merací zosilňovač Spider8. Použitá bola z dôvodu, že sme nepoznali schému zapojenia vstupno-výstupného konektora na snímači a nevedeli sme zabezpečiť napájanie snímača ako aj prenos výstupného signálu priamo do zosilňovača Spider8. Nesprávnym zapojením by sme riskovali poškodenie snímača alebo meracieho zosilňovača.

Vstupno-výstupná jednotka meraný analógový signál zosilňuje a následne digitalizuje. Výsledná hodnota aktuálneho naklonenia sa zobrazuje len na displeji, avšak nie je zabezpečená jej registrácia. Pre ďalšie spracovanie bol využitý výstupný analógový zosilnený signál pre prídavné grafické zobrazovacie zariadenie, ktorý bol privedený do meracieho zosilňovača Spider8.

Merací zosilňovač Spider8

Merací zosilňovač Spider8 meraný analógový signál zosilňuje, filtruje a transformuje na digitálny, ktorý je nevyhnutný pre ďalšie spracovanie pomocou výpočtovej techniky (HBM, 2000).



Obr. 3. Merací zosilňovač Spider8
Fig. 3. Spider8 measuring amplifier

Zosilňovač má zabudované štyri samostatné meracie kanály pre vstup analógového signálu a jeden šestnásťkanálový modul pre digitálny signál (obr. 3), okrem toho obsahuje výstupný LPT port na tlačiareň, vstupno-výstupný port (LPT alebo RS 232) na prepojenie s počítačom a jeden vstupno-výstupný port, ktorý môže byť využitý na pripojenie ďalšieho meracieho zosilňovača.

Nastavenie a ovládanie procesu merania, ako aj registrácie, sa vykonáva pomocou on-line pripojeného počítača s nainštalovaným programom Conmes Spider ver. 12.1 (HBM, 2001).

Nastavenie pracovných charakteristík snímačov meraných veličín sa vykonáva pomocou kalibrácie. Kalibráciou sa rozumie zadefinovanie snímača a parametrov transformačnej funkcie snímača, pomocou ktorej sa dosiahne, že hodnota výstupného signálu zo snímača sa transformuje a zobrazuje v požadovanej hodnote a príslušnej jednotke meranej veličiny.

Pri kalibrácii sa najskôr nastaví číslo kanála, pomocou ktorého je kalibrován snímač pripojený k meraciemu zosilňovaču Spider8 (obr. 4). Kalibrácia môže byť vykonaná buď manuálne alebo na základe dvoch meraných hodnôt. Funkciu manuálnej kalibrácie snímača je možné použiť v prípade, ak sú známe koeficienty transformačnej funkcie z kalibračného listu snímača.

Rozsah		Citlivosť	
Minimum	Maximum	k	q
-2,0	2,0	y = 1,0000 * x +	0,0000
Měřená jednotka	mm/m	4,0000	

Obr. 4. Výpočet parametrov transformačnej funkcie
Fig. 4. Calculation of parameter of the transform function

Druhý spôsob – kalibráciu na základe dvoch meraných hodnôt, je možné vykonať v charakteristických bodoch meracieho rozsahu snímača pomocou iného meradla, ktorého presnosť odpovedá alebo je vyššia ako požadovaná presnosť merania. Za charakteristické body sú zvolené koncové body meracieho rozsahu snímača, nakoľko transformačná funkcia snímača je lineárna. Zadá sa počiatočná kalibračná hodnota meranej veličiny a následne po vykonaní prvého merania sa zobrazí k nej odpovedajúca meraná hodnota výstupného signálu snímača. Obdobným spôsobom sa vykoná i druhé meranie. Parametre transformačnej funkcie k a q a citlivosť sa automaticky vypočítajú po odmeraní druhej hodnoty a následne sa zobrazia (obr. 4). Koeficienty transformačnej funkcie ako aj všetky ostatné zadané charakteristiky snímača sa ukladajú do kalibračného súboru. Každý snímač, ktorého charakteristiky sú uložené v kalibračnom súbore je možné neskôr prekalibrovať (opraviť parametre transformačnej funkcie), zmeniť rozsah, číslo kanálu, prípadne vykonať zmeny v popise snímača.

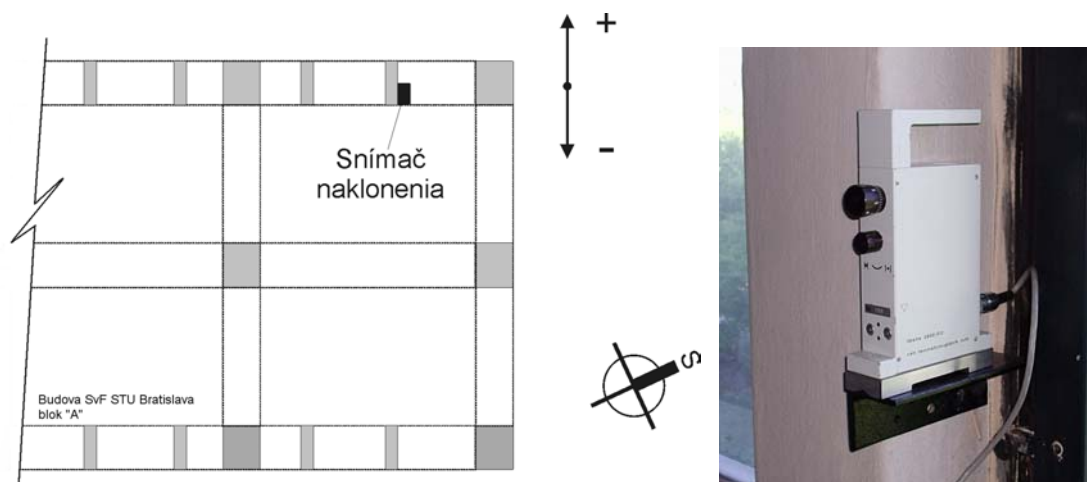
Monitorovanie naklonenia nosného piliera

Monitorovanie naklonenia nosného piliera budovy bolo realizované v dňoch 28. 4. 2004 – 4. 5. 2004 v budove Stavebnej fakulty STU v Bratislave - blok A. Budova predstavuje z konštrukčného hľadiska železobetónových skelet obdĺžnikového tvaru, ktorý pozostáva zo zvislých nosných stĺpov, na ktorých sú uchytené pozdĺžne a priečne vodorovné nosníky (obr. 5). Pôdorys budovy má obdĺžnikový tvar s rozmerom strán 75 (dĺžka) a 12 m (šírka). Budova má dve podzemné a šesť nadzemných podlaží, s konštrukčnou výškou podlažia 3,40 m. Celková výška nadzemnej časti budovy je 20,4 m.

Naklonenie piliera bolo merané v priečnom smere v úrovni druhého nadzemného podlažia.

Snímač bol umiestnený na kovovej konzole (L-profil), namontovanej na bočnej stene obvodového nosného piliera (obr. 5). Pre zistenie vplyvu teploty ovzdušia na naklonenie piliera bola v bezprostrednej blízkosti piliera súčasne meraná aj teplota vzduchu.

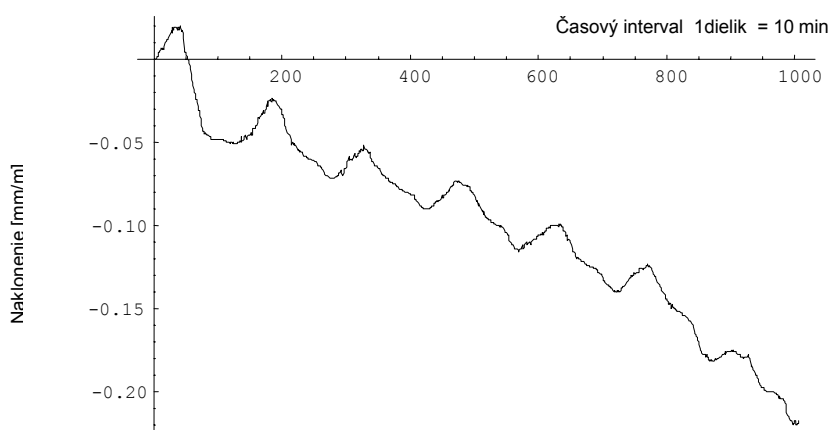
Z technických dôvodov (limitujúca dĺžka káblov medzi snímačom a počítačom) bolo meranie realizované len na jednom mieste budovy. Merané hodnoty naklonenia a teploty vzduchu boli kontinuálne registrované do on-line pripojeného počítača. Okrem týchto hodnôt bolo registrované aj poradové číslo, resp. čas záznamu. Spustenie a zastavenie merania, nastavenie konfigurácie, ako aj registrácia údajov bola vykonaná prostredníctvom programu Conmes Spider ver. 12.1.



Obr. 5. Umiestnenie snímača na kovovej konzole
Fig.5. Location of the Sensor on the metallic console

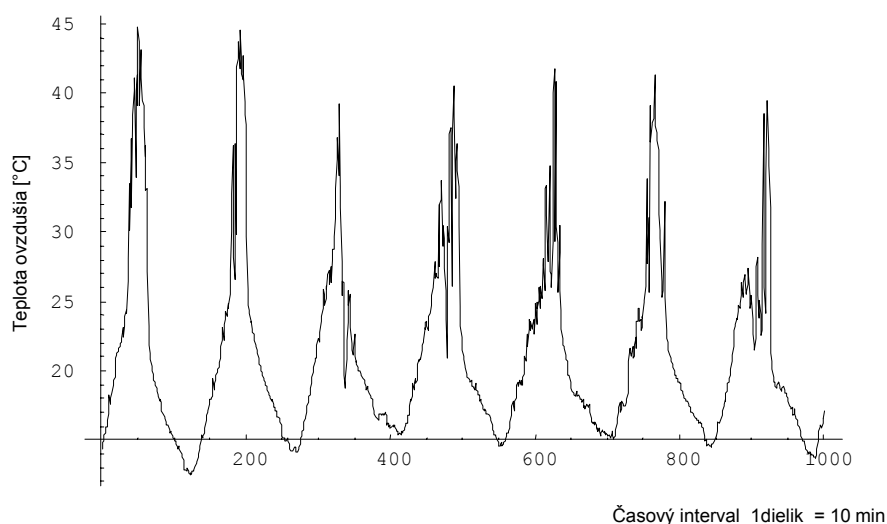
Celé meranie prebiehalo nepretržite takmer 168 hodín s frekvenciou záznamu 1 Hz (1 meranie/sekunda), nakoľko program Conmes Spider 12.1 neumožňoval väčší interval medzi jednotlivými záznamami. Súbor meraných údajov s celkovým počtom 603 950 záznamov bol zredukovaný na súbor s počtom záznamov 1006, ktorý odpovedá záznamu každej desiatej minúty. Na redukciu bol použitý vlastný program vytvorený v programovacom jazyku C.

Z matematického hľadiska predstavuje súbor meraných údajov časový rad. Časové rady naklonenia a teploty ovzdušia sú znázornené samostatne, pretože hodnoty meraných údajov sú diametrálne rozdielne (obr. 6 a 7). Hodnota kladného, resp. záporného naklonenia piliera je zrejماً z obrázka č. 5.



Obr. 6. Grafické znázornenie naklonenia piliera v priečnom smere
Fig. 6. Graphical presentation of pillar the tilt in the cross direction

Z grafického zobrazenia teploty ovzdušia je vidieť, že v krátkom okamihu stúpila teplota v bezprostrednej blízkosti piliera až o 20 °C. Zvýšenie teploty nastáva vždy v popoludňajších hodinách (medzi 14 a 18 hod.), keď na pilier pôsobí priame slnečné žiarenie. Rozdielna hodnota a časový interval prudkého zvýšenia teploty v jednotlivých dňoch je spôsobená oblačnosťou a intenzitou slnečného žiarenia.



Obr. 7. Grafické znázornenie teploty ovzdušia
Fig. 7. Graphical representation of air temperature

Analýza časového radu

Časový rad meranej veličiny predstavuje súhrn trendovej, sezónnej, cyklickej a náhodnej zložky. Cieľom analýzy časového radu je jeho rozklad a oddelenie systematickej zložky a izolovanie náhodnej chyby, vznikajúcej pri meraní, tzv. biely šum. Preto je potrebné postupne izolovať jeho jednotlivé zložky zo súboru meraných hodnôt a vyjadriť ich ako funkciu času.

Pri rozklade časového radu bol použitý predpoklad aditívnosti, z ktorého vyplýva jeho dekompozícia, ktorá má tvar (Cipra, 1986)

$$Y_t = Tr_t + C_t + Sz_t + E_t, \quad (1)$$

kde Tr_t je trendová zložka,
 C_t je cyklická zložka,
 Sz_t je sezónna zložka,
 E_t je náhodná (reziduálna) zložka.

Na analýzu časového radu, získaného pri meraní naklonenia budovy, bol použitý program Mathematica 4.2, firmy Wolfram Research.

Odhad trendovej zložky

V prvom kroku aditívnej dekompozície je hodnotená trendová zložka Tr . Z obrázka č. 6 vidieť, že časový rad má klesajúci trend, pričom tento trend je možné aproximovať všeobecným polynómom n -tého stupňa

$$y = a_1 \cdot t^{0.1} + a_2 \cdot t^{0.2} + a_3 \cdot t^{0.3} + \dots + a_{10} \cdot t. \quad (2)$$

Využitím funkcie regresnej analýzy sa získajú najpravdepodobnejšie koeficienty polynómu a_1, a_2 až a_{10} trendovej zložky a hľadáme najvhodnejší model, pričom súčet štvorcov odchýlok musí byť minimálny.

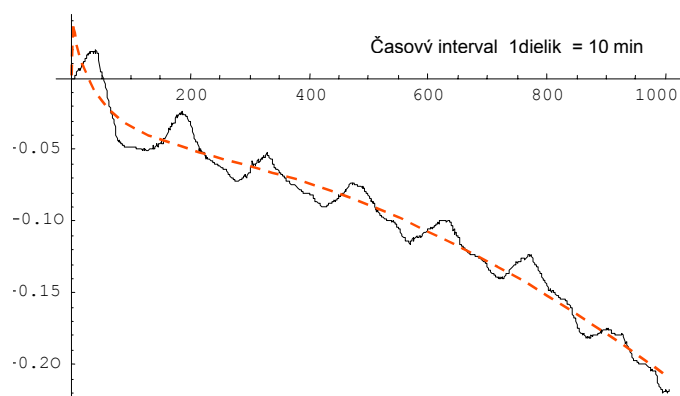
Výsledkom odhadu sú koeficienty polynómu a_1, a_2 až a_{10} , stredné chyby koeficientov a pravdepodobnostná hodnota P (Pvalue). Rozhodujúcim faktorom pri výbere vhodného radu polynómu je hodnota P , ktorú program priradí každému z koeficientov polynómu a ktorého hodnota musí byť blízka nule. Koeficienty, ktorých hodnota P nie je blízka nule, sú považované zo štatistického hľadiska za nevýznamné pre zostavenie funkcie polynómu.

Hodnota P je počítaná na základe štatistických testov pre t -rozdelenie s $(n-p)$, kde p je počet parametrov polynómu stupňami voľnosti. Postupným odstraňovaním jednotlivých nevýznamných členov polynómu, na základe spomínanej hodnoty P , bol získaný polynóm tvaru

$$\text{trend} = a_5 \cdot t^{0.5} + a_6 \cdot t^{0.6} + a_7 \cdot t^{0.7} + a_8 \cdot t^{0.8}. \quad (3)$$

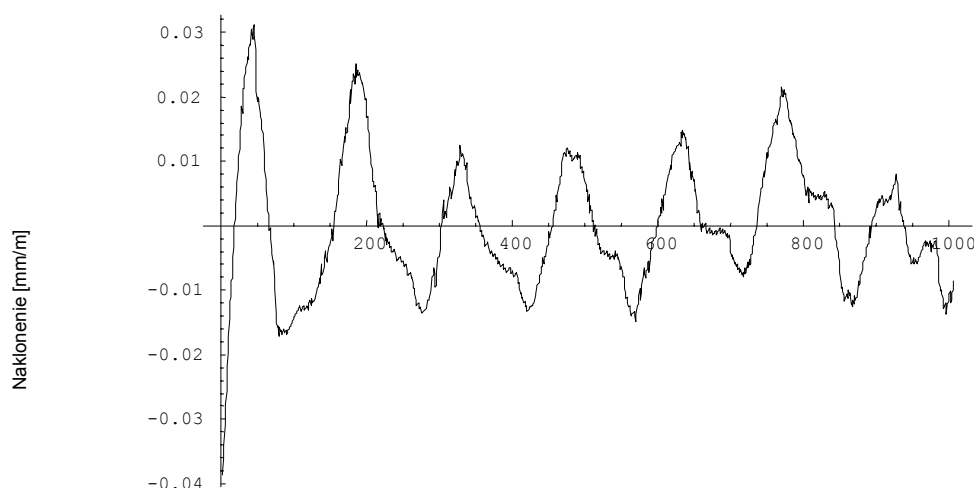
Výsledný polynóm aproximujúci trendovú zložku časového radu má tvar

$$\text{trend} = 0,602101 \cdot t^{0,5} - 1,06877 \cdot t^{0,6} + 0,628497 \cdot t^{0,7} - 0,123158 \cdot t^{0,8}. \quad (4)$$



Obr. 8. Znáznornenie pôvodného časového radu (plná čiara) a trendovej zložky (čiarkovane)
 Fig. 8. Presentation of initial time series (solid line) and trend component (dashed line)

Po odpočítaní trendovej zložky od časového radu vidieť, že časový rad obsahuje sezónnu a cyklickú zložku s viacerými významnými frekvenciami.



Obr. 9. Pôvodný časový rad po odstránení trendovej zložky
 Fig. 9. The initial time series after the elimination of trend component

Odhad sezónnej a cyklickej zložky

Odhad významných frekvencií na základe spektrálnej analýzy vychádza z predpokladu, že skúmaný časový rad tvorí nekonečná zmes sínusových a kosínusových kriviek s rôznymi amplitúdami (Cipra, 1986). Predpokladaný tvar modelu sezónnej a cyklickej zložky pri aditívnej dekompozícii pomocou goniometrických kriviek je

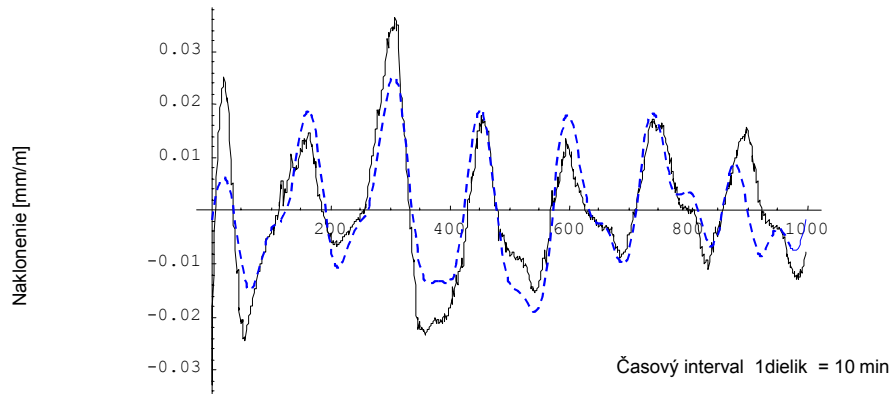
$$y_t = \beta_0 + \beta_1 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{L}\right) + \beta_2 \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{L}\right) + \varepsilon_t, \quad (5)$$

kde β_0, β_1 a β_2 sú neznáme koeficienty sezónnej zložky,
 L je dĺžka periódy,
 ε je náhodná zložka.

Metódou spektrálnej analýzy bol určený počet periód najvýznamnejších frekvencií. Najvýznamnejšia je frekvencia s periódou opakovania každých 24 hodín, ktorá predstavuje periodický vplyv teploty na naklonenie piliera. Ďalšia významná frekvencia má periódu opakovania 12 hodín. Keďže dĺžky týchto periód súvisia s kalendárom, môžeme prehlásiť že uvedené frekvencie definujú len sezónnu zložku. Spektrálna analýza nepreukázala výskyt frekvencií, ktoré tvoria cyklickú zložku.

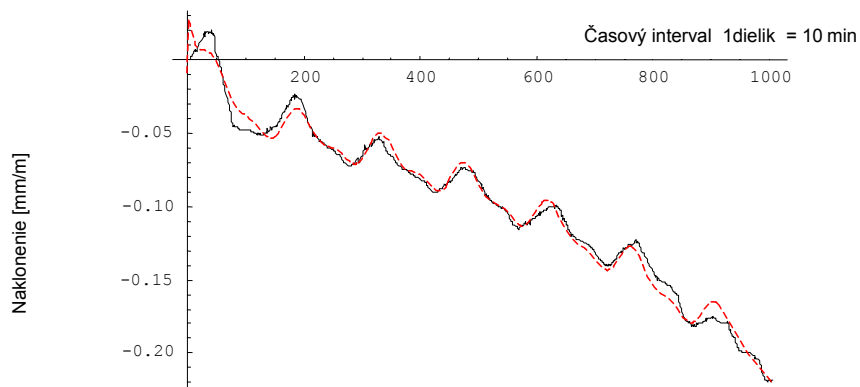
Odhad parametrov funkcie sezónnej zložky bol vykonaný obdobným spôsobom, ako pri výpočte parametrov trendovej zložky, a to pomocou regresnej analýzy. Výsledná funkcia aproximujúca sezónnu zložku má tvar

$$\begin{aligned} \text{sezona} = & -0,00676127 \cdot \cos\left[\frac{7 \cdot \pi \cdot t}{503}\right] - 0,00422387 \cdot \cos\left[\frac{7 \cdot \pi \cdot t}{503}\right] + 0,00848776 \cdot \sin\left[\frac{7 \cdot \pi \cdot t}{503}\right] - \\ & - 0,00261133 \cdot \sin\left[\frac{14 \cdot \pi \cdot t}{503}\right] \end{aligned} \quad (6)$$

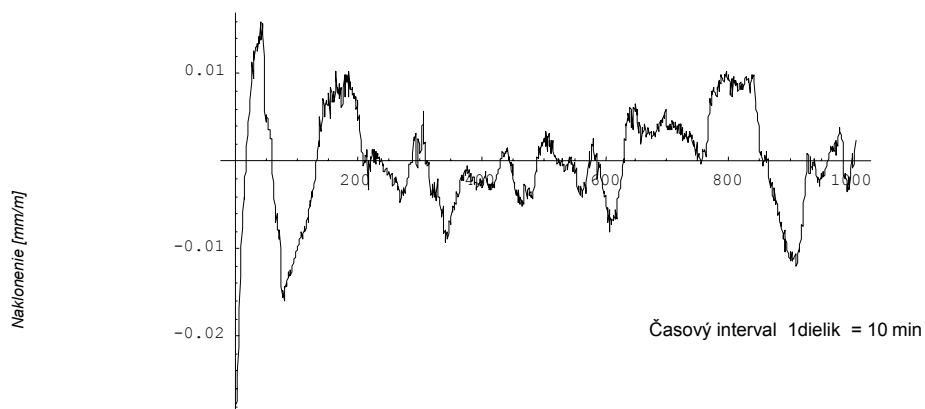


Obr. 10. Znáznornenie sezónnej zložky (čiarkovane) a časového radu bez trendovej zložky (plná čiara)
Fig. 10. Presentation of seasonal component (dashed line) and time series without the trend element (solid line)

Po výpočte bol súčet trendovej a sezónnej zložky porovnaný s meranými hodnotami naklonenia (obr. 11).



Obr. 11. Znáznornenie súčtu trendovej a sezónnej zložky (čiarkovane) a pôvodného časového radu (plná čiara)
Fig. 11. Presentation of the sum of the trend and seasonal component (dashed line) and the initial time series (solid line)



Obr. 12. Časový rad po odstránení trendovej a sezónnej zložky
Fig. 12. Time series after the elimination of the trend and the seasonal component

Odpočítaním súčtu trendovej a sezónnej zložky od hodnôt pôvodného časového radu (meraných údajov naklonenia) získame časový rad, o ktorom predpokladáme, že je už realizáciou bieleho šumu, t.j. obsahuje len hodnoty náhodnej zložky (náhodné chyby) pôvodného časového radu (obr. 12).

Odhad náhodnej (reziduálnej) zložky

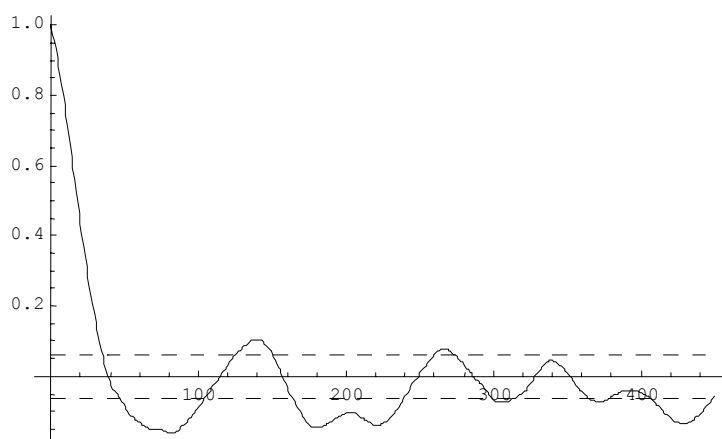
Jednou zo špecifických vlastností časových radov je autokorelácia, t.j. skutočnosť že každá meraná hodnota je štatisticky závislá na predchádzajúcej, resp. na predchádzajúcich meraniach (Cipra, 1986). Výberová autokorelačná funkcia $r(k)$ má tvar

$$r(k) = \frac{\gamma(k)}{\gamma(0)} = \frac{\sum_{t=k+1}^n (y_t - \bar{y})(y_{t-k} - \bar{y})}{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2}, \quad (7)$$

kde y_t sú prvky časového radu a $\gamma(k)$ je výberová autokovariančná funkcia

$\gamma(k) = \text{cov}(y_t, y_{t-k})$, pričom hodnota $r(k)$ je pre ľubovoľné $k < n$ z intervalu $\langle -1, 1 \rangle$.

Ďalším krokom analýzy náhodnej zložky časového radu je testovanie náhodnosti premenných pomocou autokorelačnej funkcie (Chatfield, 1982), vypočítanej pomocou príkazu CorrelationFunction a následne vypočítame štandardné odchýlky autokorelačnej funkcie (obr. 13).



Obr. 13. Korelačná funkcia a štandardné odchýlky časového radu
Fig. 13. Correlation function and standards deviations of the time series

Následne je potrebné nulovú hypotézu H_0 otestovať, či časový rad rezíduí je realizáciou navzájom nezávislých, rovnako rozdelených náhodných premenných. Podľa obrázka č. 13 nie sú všetky hodnoty korelačnej funkcie menšie ako dvojnásobok štandardnej odchylky odhadu korelačnej funkcie a teda nulovú hypotézu zamietame. Čo znamená, že hodnoty skúmaného časového radu rezíduí nie sú náhodné a časový rad nie je realizáciou bieleho šumu.

Nezávislé overenie náhodnosti bolo vykonané pomocou štatistického testu založenom na teste kritických bodov (bodov obratu) – lokálnych maxim a lokálnych minim. Bod x_t je horným bodom obratu uvažovaného radu, pričom $x_{t-1} < x_t > x_{t+1}$ pre $t = 2, \dots, n-1$. Analogicky môžeme definovať dolný bod obratu. Počet horných a dolných bodov obratu $r = 526$ a počet hodnôt časového radu $n = 1006$.

Formulácia nulovej hypotézy H_0 vychádza z predpokladu, že časový rad je realizácia vzájomne nezávislých, rovnako rozdelených náhodných veličín, ktoré nemusia mať ako biely šum nulovú strednú hodnotu (môže sa tu jednať o biely šum kolísajúci okolo nenulovej hodnoty). Pri väčšom počte n hypotézu H_0 zamietame na hladine významnosti α pre $N(0,1)$, keď platí nerovnosť

$$\frac{[r - 2 \cdot (n-2) / 3]}{\sqrt{(16 \cdot n - 29) / 90}} \geq u(\alpha / 2). \quad (8)$$

Dosadením počtu obratov a celkového počtu hodnôt do vzťahu (8) dostávame hodnotu $-10,72$. Na hladine významnosti $\alpha = 5\%$ z intervalu $\langle -1,96; 1,96 \rangle$. V tomto prípade hypotézu H_0 zamietame, s pravdepodobnosťou

95 % hodnoty časového radu nie sú náhodné a obsahujú ešte systematickú zložku, ktorú je potrebné popísať a eliminovať.

Pre analýzu časového radu rezíduí bola použitá Box-Jenkinsonovu metodológia. V prvom kroku bol identifikovaný najvhodnejší model. Po zadaní príkazu program vypísal desať modelov, spolu s odhadnutými parametrami a disperziou. Na základe hodnôt Akaikého informačného kritéria (AIC) a Baysovského informačného kritéria (BIC) bol vybraný model a rád modelu. Najvhodnejší je ten model, ktorého hodnota AIC alebo BIC je najmenšia. V našom prípade má najnižšiu hodnotu AIC tretí model. Je to autoregresný model AR(3) tretieho radu s tromi neznámymi parametrami, ktorého všeobecný tvar je

$$\text{model_AR(3)} = \varphi_1 \cdot y_{t-1} + \varphi_2 \cdot y_{t-2} + \varphi_3 \cdot y_{t-3} + \varepsilon_t, \quad (9)$$

kde $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ sú neznáme parametre,
 y_t sú hodnoty časového radu rezíduí,
 ε_t je biely šum (náhodná zložka časového radu rezíduí).

Odhadnuté hodnoty parametrov AR(3) modelu a ich stredné chyby sú uvedené v tab.1

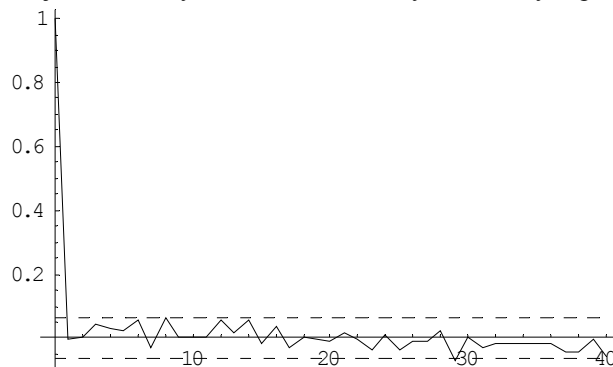
Tab. 1. Hodnoty parametrov AR(3) modelu
 Tab. 1. Parameter values of the AR(3) model

f_1	0,924971	m_{f1}	0,043722
f_2	0,128204	m_{f2}	0,057494
f_3	-0,0770406	m_{f3}	0,0432341

Správnosť voľby modelu a odhadu parametrov je potrebné overiť tak, že od hodnôt časového radu rezíduí sa odpočítajú hodnoty AR(3) modelu a opäť vykonajú štatistické testy náhodnosti pomocou korelačnej funkcie a štandardných odchýlok, ako aj pomocou testu kritických bodov (bodov obratu).

Po vykreslení novej korelačnej funkcie a jej štandardnej odchýlky je možné prehlásiť, že časový rad je realizácia navzájom nezávislých, rovnako rozdelených náhodných premenných a teda nulovú hypotézu H_0 na zvolenej hladine významnosti nezamietame (obr. 14).

Pre kontrolu bol ešte vykonaný štatistický test náhodnosti – test kritických bodov obratu. Odpočítaním modelu AR(3) od rezíduí sa zmení aj počet bodov obratu funkcie na $r = 644$, pričom celkový počet bodov $n = 1006$ ostáva nezmenený. Výsledná hodnota podľa vzťahu (8) sa rovná $-1,89603$, takže je v rámci intervalu $\langle -1,96; 1,96 \rangle$. Nulovú hypotézu H_0 nezamietame a s pravdepodobnosťou 95 % môžeme prehlásiť, že výsledný časový rad je realizáciou navzájom nezávislých rovnako rozdelených náhodných premenných.



Obr. 14. Korelačná funkcia časového a jej smerodajné odchýlky
 Fig. 14. The correlation function of time series and its variances

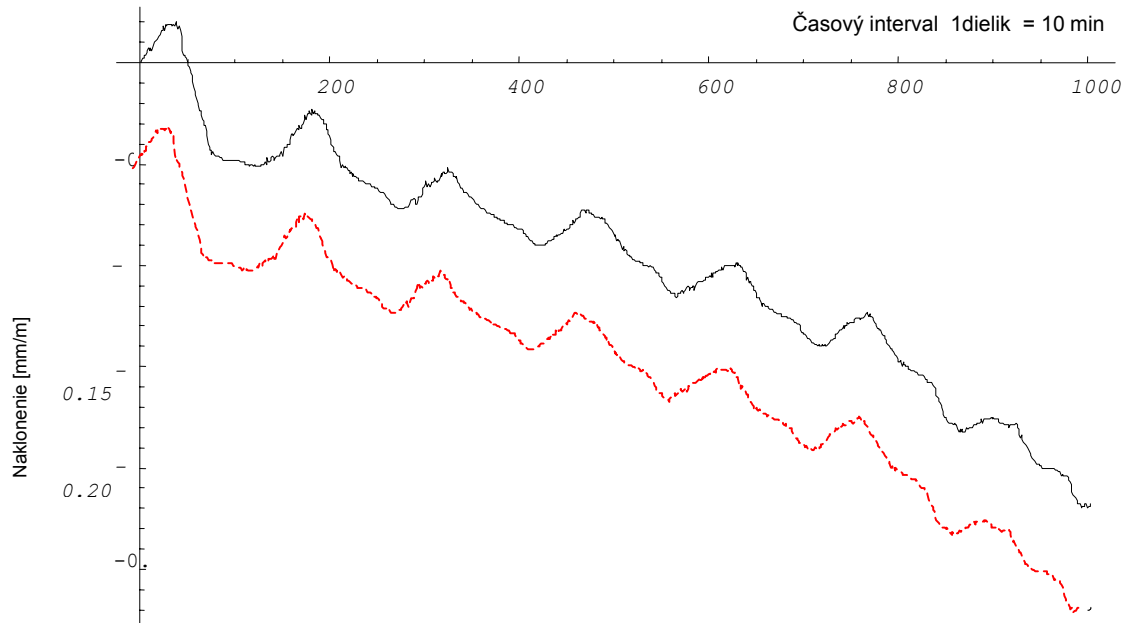
Funkcia časového radu naklonenia piliera

Výslednú funkciu časového radu získame v zmysle aditívnej dekompozície ako súčet trendovej, sezónnej a náhodnej (reziduálnej) zložky. Všeobecná rovnica funkcie naklonenia piliera má tvar

$$\text{funkcia} = \text{trend} + \text{sezona} + \text{model_AR(3)} + \varepsilon_t. \quad (10)$$

Po dosadení jednotlivých zložiek získavame matematickú funkciu časového radu

$$\begin{aligned}
 \text{funkcia} = & 0,602101 \cdot t^{0,5} - 1,06877 \cdot t^{0,6} + 0,628497 \cdot t^{0,7} - 0,123158 \cdot t^{0,8} - \\
 & - 0,00676127 \cdot \cos\left[\frac{7 \cdot \pi \cdot t}{503}\right] - 0,00422387 \cdot \cos\left[\frac{7 \cdot \pi \cdot t}{503}\right] + 0,00848776 \cdot \sin\left[\frac{7 \cdot \pi \cdot t}{503}\right] - \\
 & - 0,00261133 \cdot \sin\left[\frac{14 \cdot \pi \cdot t}{503}\right] + 0,924971 \cdot y_{t-1} + 0,128204 \cdot y_{t-2} - 0,0770406 \cdot y_{t-3} + \varepsilon_t
 \end{aligned} \quad (11)$$



Obr. 15. Grafické znázornenie pôvodného časového radu (plná čiara) a funkcie časového radu (čiarkovaná čiara)
 Fig. 15. Graphical representation of the initial time series (solid line) and the time series function (dashed line)

Poznámka: Funkcia časového radu je z dôvodu prehľadného grafického znázornenia odsadená vo vertikálnom smere o hodnotu -0.05 mm/m .

Záver

Merané hodnoty naklonenia boli získané v relatívne krátkom časovom období (7 dní). Nie je preto vylúčené, že odhadnutá trendová zložka časového radu predstavuje časť sezónnej zložky. Pre dekompozíciu sezónnej zložky z časového radu by bolo potrebné merať naklonenie vo väčšom časovom intervale, aby sa prejavila celá perióda sezónnej zložky.

Rozdiel medzi počiatkovou a koncovou hodnotou naklonenia v rámci merania (takmer 168 hodín) je $0,218 \text{ mm/m}$. Ak by sme posudzovali merané naklonenie piliera na 2. poschodí ako naklonenie celej budovy, tak relatívny priečny posun budovy vo výške $8,3 \text{ m}$ by dosahoval hodnotu $1,81 \text{ mm}$. Za predpokladu rovnomerného naklonenia budovy by naklonenie vo výške $20,4 \text{ m}$ dosahovalo hodnotu $4,45 \text{ mm}$. Najväčšia zmena naklonenia nosného piliera $0,071 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1}$ za deň nastala 28. 4. 2004. Vo výške $8,3 \text{ m}$ tento rozdiel predstavuje zmenu priečného naklonenia $0,59 \text{ mm/deň}$.

Z meraných údajov teploty ovzdušia môžeme pozorovať pravidelne stúpajúci a klesajúci cyklus zmeny teploty vplyvom striedania dňa a noci. Rozdiel medzi maximálnou dennou a minimálnou nočnou teplotou ovzdušia sa prejavuje na výslednej hodnote naklonenia piliera. V dopoludňajších hodinách a okolo obeda dochádza k miernemu poklesu naklonenia a pilier má tendenciu vrátiť sa do pôvodnej polohy. Okolo 15-tej hodiny nastáva opäť nárast naklonenia.

Porovnaním údajov naklonenia s teplotou ovzdušia vidieť, že okolo 14-tej hodiny začína na pilier pôsobiť priame slnečné žiarenie a dochádza k prudkému nárastu teploty ovzdušia. S oneskorením asi jednej hodiny sa uvedená zmena teploty začne prejavovať na hodnote naklonenia piliera. Pôsobenie teploty trvá asi do 6-tej hodiny nasledujúceho dňa, kedy dochádza k zvratu a pilier sa opäť začína nakláňať na opačnú stranu.

Ďalším faktorom vplývajúcim na hodnotu naklonenia piliera, je chvenie nosnej konštrukcie spôsobené zaťažením budovy, pohybom ľudí v budove a taktiež vplyvom intenzity dopravy v blízkosti budovy. Vplyv intenzity dopravy na hodnotu naklonenia môžeme pozorovať najmä v ranných hodinách v čase od 5:00, keď začínajú premávať električky a autobusy. Približne od 6:30 na chvenie konštrukcie začína vplývať nerovnomerné zaťaženie budovy ako i pohyb ľudí v budove. Tento vplyv potom pretrváva počas celej pracovnej doby. Naopak,

v nočných hodinách je krivka naklonenia hladká a na hodnotách naklonenia sa prejavuje len trend a sezónna zložka.

Príspevok je súčasťou riešenia projektu č. 01/318/03, za podpory vedeckej grantovej agentúry VEGA.

Literatúra - References

- Cipra, T.: Analýza časových řad s aplikacemi v ekonomii. *SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha 1986.*
- HBM: Manuál k meraciemu systému Conmes Spider ver. 12.1. *Consynea spol. s r.o. 2001.*
- HBM: Manuál k meraciemu systému Spider8. 2000.
- Chatfield, C.: Analyse von Zeitreihen. *Carl Hanser Verlag, München 1982.*
- Klementev, I., Kyška, R.: Elektrické meranie mechanických veličín. *1. Alfa vyd. Bratislava, 1991, 328 s.*
- Kubanka, M., Staněk, V.: Kalibrácia sklonomera AE 2 DN. *Geodetický a kartografický obzor, 42/84, 1996, číslo 6, s. 112-116*