

# DLHODOBÝ MONITORING MOSTNÝCH KONŠTRUKCIÍ – OČAKÁVANIA A MOŽNOSTI

## LONG TERM MONITORING OF BRIDGE STRUCTURES – EXPECTATIONS AND POSSIBILITIES

Alojz KOPÁČIK<sup>1</sup>, Peter KYRINOVIČ<sup>1</sup>, Ján ERDÉLYI<sup>1</sup>

### **Abstract:**

*Monitoring of bridge structures using classical surveying methods. Possibilities and obstacles of automated deformation measurement of bridge structures. Trends in the field of bridge health care monitoring in foreign countries. State of the art in Slovakia.*

### **Abstrakt:**

*Meranie posunov a pretvorenia mostných konštrukcií klasickými metódami. Možnosti a úskalia automatizácie merania posunov a pretvorení mostných konštrukcií využitím geodetických metód a prístrojov. Trendy v oblasti merania mostných konštrukcií a v oblasti monitoringu ich stavu (health care monitoring) v zahraničí. Súčasný stav na Slovensku.*

## 1 ÚVOD

Problematika merania posunov a pretvorení mostných objektov na Slovensku je upravená sériou legislatívnych a technických predpisov. Dlhodobé meranie posunov a pretvorení sa na väčšine mostných objektov stále vykonáva klasickými geodetickými metódami, ku ktorým v ostatných rokoch pribudli metódy založené na satelitných meraniach. V ostatných rokoch sme svedkami takisto výskumných aktivít spojených s aplikáciou terestrických laserových skenovacích systémov alebo terestrickej radarovej interferometrie v tejto oblasti, ktoré však nedosahujú úroveň každodenného aplikačného štandardu.

Vykonávanie meraní klasickými metódami vyžaduje obmedzenie prípadne až dočasné vylúčenie dopravy na týchto objektoch, čo v ostatných rokoch spôsobuje stále väčšie problémy a stáva sa postupne faktorom výrazne limitujúcim aplikáciu klasických metód v budúcnosti. Možným riešením je inštalácia automatizovaných meracích systémov (AMS) na mostných objektoch s veľkým dopravným zaťažením, pričom pri návrhu a inštalácii týchto systémov sa dominantnou stáva požiadavka minimalizovať obmedzenia dopravy pri realizácii meraní.

Vyššie opísané limitujúce faktory ako aj poznatky publikované v zahraničí orientovali výskum v ostatných rokoch k úplnej automatizácii procesu merania, využívaniu inovatívnych geodetických technológií a tvorbe multi-senzorových systémov, využívajúcich okrem geodetických prístrojov aj snímače naklonenia, zrýchlenia (akcelerometre), teploty, tlaku, vlhkosti, intenzity vetra, intenzity dopravného zaťaženia a pod.

## 2 SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY V ZAHRANIČÍ

Problematika výskumu, návrhu a realizácie AMS a implementácie moderných technológií v oblasti dlhodobého merania posunov a pretvorení stavebných konštrukcií je v zahraničí súborne označovaná ako monitoring stavu konštrukcií – Structural Health Monitoring (SHM).

---

<sup>1</sup> Kopáčik Alojz, prof. Ing. PhD., Peter Kyrinovič, Ing. PhD., Ján Erdélyi, Ing. PhD., STU Bratislava, Stavebná fakulta, Katedra geodézie, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, ++421 2 5927 4559, alojz.kopacik@stuba.sk

Významnú súčasť oblasti SHM tvorí meranie posunov a pretvorení mostných konštrukcií. Už spomínané limitujúce faktory (rastúca intenzita dopravného zaťaženia) viedli aj v zahraničí k výraznému nárastu počtu inštalovaných AMS na mostoch v takmer vo všetkých krajinách, najmä však v Japonsku, Číne a v USA [7], [8], [9], [18], [19], [20]. Osobitnú pozornosť si zaslúži projekt dlhodobého merania mosta cez úžinu Oresund medzi Švédskom a Dánskom [15].

Významný krok v predmetnej oblasti urobili v USA, kde bol prijatý a legislatívnym rámcom podporený program dlhodobej starostlivosti o mostné konštrukcie (Long-Term Bridge Performance – LTBP), ktorý vytvoril účinný nástroj na realizáciu AMS na vybraných mostných konštrukciách v celej krajine. AMS boli a postupne sú inštalované najmä na objekty nachádzajúce sa na významných dopravných koridoroch s veľkým dopravným zaťažením [3].

Výrazným impulzom vedúcim k dlhodobému monitoringu stavu mostných konštrukcií bola aj skutočnosť, že sa stavajú stále náročnejšie konštrukcie, často aj v seizmicky aktívnych oblastiach. Cieľom dlhodobých meraní je v takýchto prípadoch najmä preukázanie dlhodobej stability dynamických parametrov týchto konštrukcií, resp. kontrola ich seizmickej odolnosti po celú dobu prevádzky. Meraniu a hodnoteniu dynamických vlastností mostných konštrukcií sa venujú viacerí autori v prácach [1], [4], [5], [6], [10], [13], [17], [19].

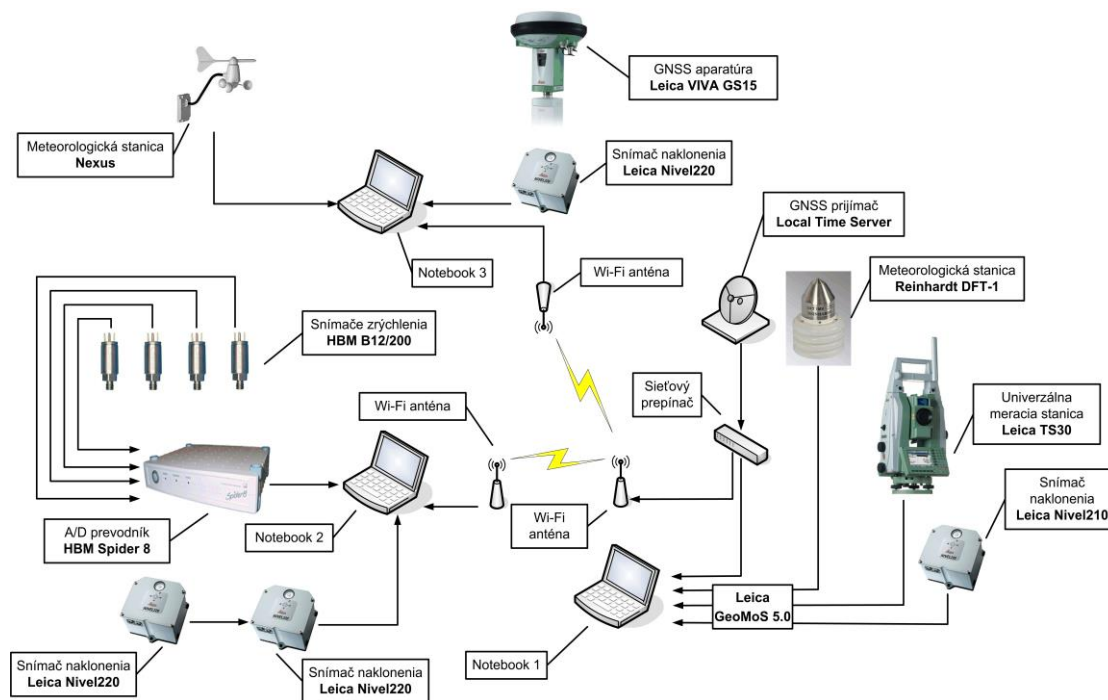
### 3 NÁVRH A ŠTRUKTÚRA MERACIEHO SYSTÉMU

Návrh a realizácia meracieho systému na dlhodobé meranie posunov a pretvorení mostných konštrukcií musí zohľadňovať špecifiká konkrétnej konštrukcie a požiadavky užívateľa. AMS má byť navrhnutý tak, aby poskytoval užívateľovi (správcovi mosta) údaje o správaní sa mostnej konštrukcie počas plnej prevádzky mosta. Cieľom meraní realizovaných navrhovaným AMS je obvykle:

- kontrola stability vzťažných bodov, najmä stanovísk geodetických prístrojov,
- určenie priestorových posunov a pretvorení nosnej konštrukcie,
- určenie pretvorení exponovaných častí konštrukcie (nosný oblúk, pilón, laná a iné),
- priečne a pozdĺžne naklonenie nosnej konštrukcie vo vybraných miestach,
- dynamické pretvorenia nosnej konštrukcie vo vybraných miestach.

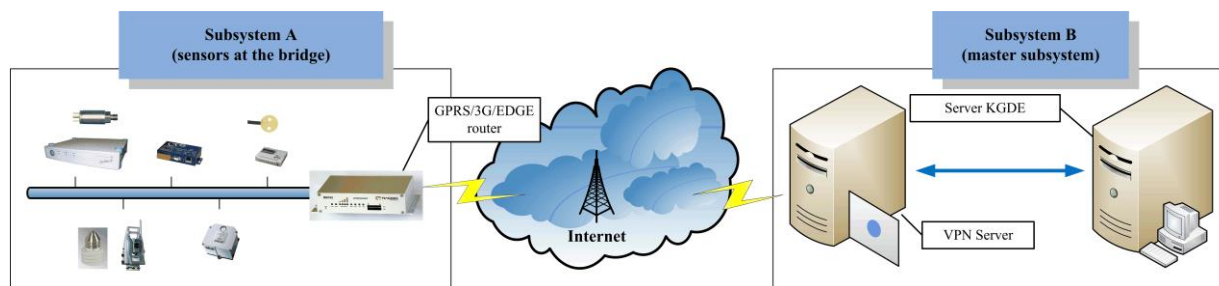
AMS napĺňajúci vyššie opísané očakávania bude integrovať viaceré geodetické a negeodetické technológie na meranie posunov a pretvorení do jedného celku. Základnou požiadavkou na všetky súčasti systému je možnosť kontinuálneho merania a registrácie meraných údajov, ako aj ich kontinuálne zasielanie na vzdialený server. Štruktúru AMS väčšinou tvoria univerzálne meracie stanice vybavené systémom ATR, multi frekvenčné GNSS aparatúry s možnosťou hustoty záznamu údajov 20 Hz a vyššou, snímače naklonenia, snímače zrýchlenia, meteorologické stanice, zosilňovače signálu s A/D prevodníkmi, časový server (Local Time Server - LTS), WiFi antény, prenosné počítače.

Integrácia viacerých súčastí pracujúcich s hustotou záznamu meraných veličín na úrovni 10 Hz až 100 Hz vyžaduje osobitný prístup k časovej synchronizácii všetkých snímačov a zariadení AMS. Postupným vývojom sa javí ako vhodná a postačujúca synchronizácia záznamov vo všetkých počítačoch a zariadeniach pomocou časového signálu zaznamenaného GNSS prijímačmi. Časový signál GNSS prijímača je zaznamenaný časovým serverom (LTS), ktorý prostredníctvom Wi-Fi antén tento odosiela do jednotlivých počítačov a zariadení riadiacich zber údajov v rôznych častiach AMS. Uvedeným spôsobom je možné dosiahnuť synchronizáciu súčastí AMS na úrovni 0,05 sekúnd s hustotou opakovanej synchronizácie 1 Hz [12]. Súčasťou každého návrhu (projektu) AMS je schéma zapojenia jednotlivých komponentov AMS obsahujúca návrh počtu zariadení, riadiacich počítačov a synchronizačných prvkov (obr. 1).



Obr. 1 Příklad schémy zapojenia komponentov AMS s časovou synchronizáciou

Ďalšou, dnes už prirodzenou požiadavkou je vzdialený manažment AMS cez chránené štandardné web rozhranie. Užívateľ má použitím takéhoto rozhrania štandardný vzdialený prístup k jednotlivým funkcionalitám systému, môže kontrolovať a nastavovať parametre AMS, má prístup k čiastkovým výsledkom v reálnom čase a má možnosť vykonávať analýzy v rozsahu inštalovaného programového vybavenia AMS. Vzdialený prístup k AMS zabezpečuje centrálny server umiestnení, obvykle u zhotoviteľa AMS, ktorý vo väčšine prípadov poskytuje užívateľovi jeho správu a údržbu (obr. 2).



Obr. 2 Dvojúrovňová štruktúra AMS

Viacúrovňová konfigurácia AMS umožňuje spojenie viacerých subsystémov s centrálnym serverom. Súčasná kvalita prenosových liniek a štandardného web rozhrania bez akýchkoľvek problémov zvláda prístup k viacerým subsystémom v reálnom čase. Takéto riešenie umožňuje monitoring viacerých mostných objektov jedným centrálnym serverom, čo znamená pre užívateľa nie len zvýšený komfort v podobe jednotného manažmentu viacerých objektov ale aj výrazné finančné úspory.

## 4 SPRACOVANIE ÚDAJOV

Programové vybavenie centrálneho serveru AMS umožňuje cez integrovaný FTP interface automatizované alebo ručné sťahovanie údajov. Inštalované moduly poskytujú užívateľovi možnosť analýzy výsledkov meraní využitím matematických modelov a grafického zobrazenia meraných údajov, ako aj výsledkov analýzy. Charakter meraní a meraných údajov umožňujú vyhodnotenie nielen statických, ale aj dynamických pretvorení vybraných častí monitorovaného objektu.

Dynamické prejavy mostných konštrukcií sú generované viacerými faktormi – dopravným zaťažením, pôsobením vetra a teplotným zaťažením. V dôsledku ich pôsobenia mostná konštrukcia a jej časti vykonávajú periodické pohyby rôznej frekvencie a amplitúdy. Spracovaním údajov získaných AMS je možné tieto javy opísať (kvantifikovať) odhadom ich parametrov aplikáciou metód a postupov spektrálnej analýzy, ktorej základom je najmä určenie periodických komponentov časových radov a signálov.

Realizácia meraní automatizovaným spôsobom generuje obvykle údaje s konštantným „krokom“ záznamu a usporiadaných do podoby časových radov. Výnimku tvoria údaje z univerzálnych meracích staníc v prípade, že predmetom záznamu je meraná dĺžka. V prípade merania dĺžok je záznam nepravidelný v čase, dĺžka „kroku“ (periódy) sa mení v závislosti na nastavenom móde merania a meniacich sa fyzikálnych podmienkach počas merania. Z hľadiska aplikácie rôznych matematických modelov na analýzu dynamických vlastností konštrukcií je rozhodujúcou skutočnosťou stabilita periódy záznamu a nie jej dĺžka [11]. Pri spracovaní údajov z univerzálnych meracích staníc je preto potrebné na túto skutočnosť pamätať a na spracovanie údajov zaznamenaných nepravidelným „krokom“ je potrebné použiť vhodný matematický model, reflektujúci charakter takýchto údajov.

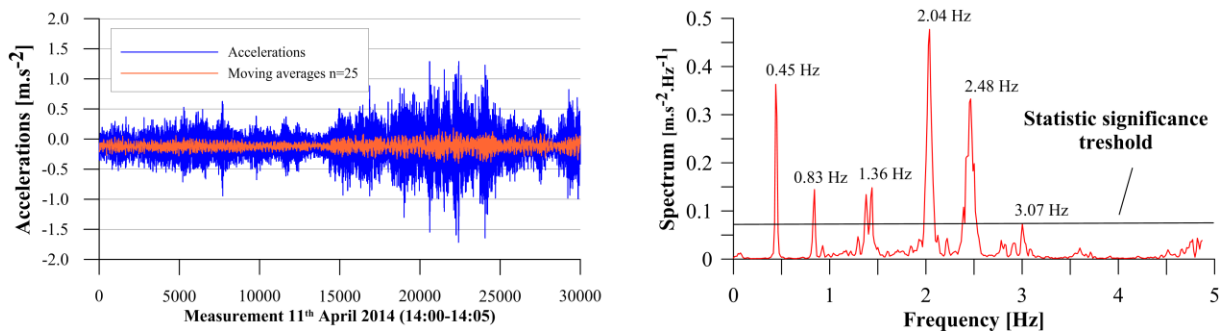
Na spracovanie časových radov je najčastejšie využívanou metódou Fourierová transformácia (FT), ktorá opisuje harmonické funkcie signálu

$$F(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt. \quad (1)$$

FT sa využíva často aj na transformáciu signálu z časovej domény (oblasti) do frekvenčnej oblasti. Ak záznam z merania má podobu diskkrétnej funkcie s konštantným krokom (časový rad), aplikuje sa pri spracovaní diskrétna Fourierová transformácia (DFT). Veľmi často sa používa jej zjednodušený variant, známy v literatúre pod označením Fast Fourier Transformation (FFT)

$$D_k = \sum_{j=0}^{N-1} y_j w(j) e^{\frac{2\pi i j k}{N}}, \quad (2)$$

kde  $k = 0, 1, \dots, N-1$  a  $w$  je spektrálne okno, obvykle používané v podobe definovanej Hammingom [11]. Výsledkom analýzy meraní v spektrálnej oblasti je amplitúdové, frekvenčné spektrum (periodogram) a fázové spektrum (obr. 3). Na určenie úrovne štatistickej významnosti hľadaných frekvencií v diskretnom spektre sa môže použiť napríklad Fisherov asymetrický test periodicity [2].



Obr. 3 Spektrálna hustota merania zrýchlení na vybranom bode nosnej konštrukcie v rôznom čase

Pri realizácii meraní s univerzálnymi stanicami údaje nie sú zaznamenané s konštantným krokom (periódou). Podobná situácia vzniká, ak v zázname merania niektoré údaje chýbajú, napríklad z dôvodu nespoľahlivých alebo málo výkonných prenosových liniek. Algoritmy FT je možné na takéto údaje aplikovať iba po úprave záznamu merania na časový rad (priemerný konštantný krok) alebo nahradením chýbajúcich údajov interpoláciou. Takáto úprava však často vedie preukázateľne ku skresleniu výsledkov a chybným záverom spektrálnej analýzy [10]. Správne výsledky v takýchto prípadoch poskytuje aplikácia výpočtu Lomb-Scargle Periodogram (LSP) podľa vzťahu:

$$P(T) = \frac{1}{2\sigma^2} \left\{ \frac{\left[ \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \cos\left(\frac{2\pi(t_i - \tau)}{T}\right) \right]^2}{\sum_{i=1}^N \cos^2\left(\frac{2\pi(t_i - \tau)}{T}\right)} + \frac{\left[ \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \sin\left(\frac{2\pi(t_i - \tau)}{T}\right) \right]^2}{\sum_{i=1}^N \sin^2\left(\frac{2\pi(t_i - \tau)}{T}\right)} \right\} \quad (3)$$

kde parameter  $\tau$  sa určí

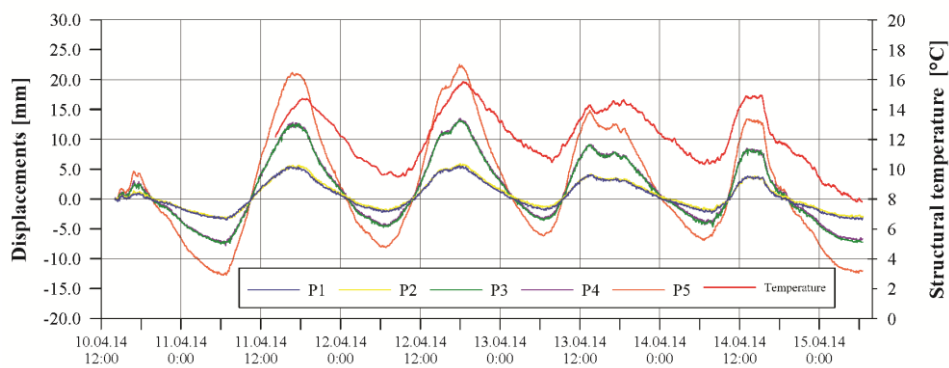
$$\tan\left(\frac{4\pi\tau}{T}\right) = \frac{\sum_{i=1}^N \sin\left(\frac{4\pi t_i}{T}\right)}{\sum_{i=1}^N \cos\left(\frac{4\pi t_i}{T}\right)}, \quad (4)$$

kde  $N$  je počet meraní v zázname,  $t_i$  je čas merania,  $\bar{x}$  je priemerná hodnota,  $\sigma^2$  je variancia údajov v zázname [14].

Spektrálnou analýzou viacerých časových radov (signálov) je možné určiť spoločné frekvencie nachádzajúce sa v spektrách synchronizovaných meraní. Za týmto účelom sa vypočíta priemerná normalizovaná hustota spektra, ako aritmetický priemer všetkých normalizovaných periodogramov, ktorá charakterizuje rozdelenie spektrálnej hustoty všetkých časových radov (signálov) zahrnutých do analýzy.

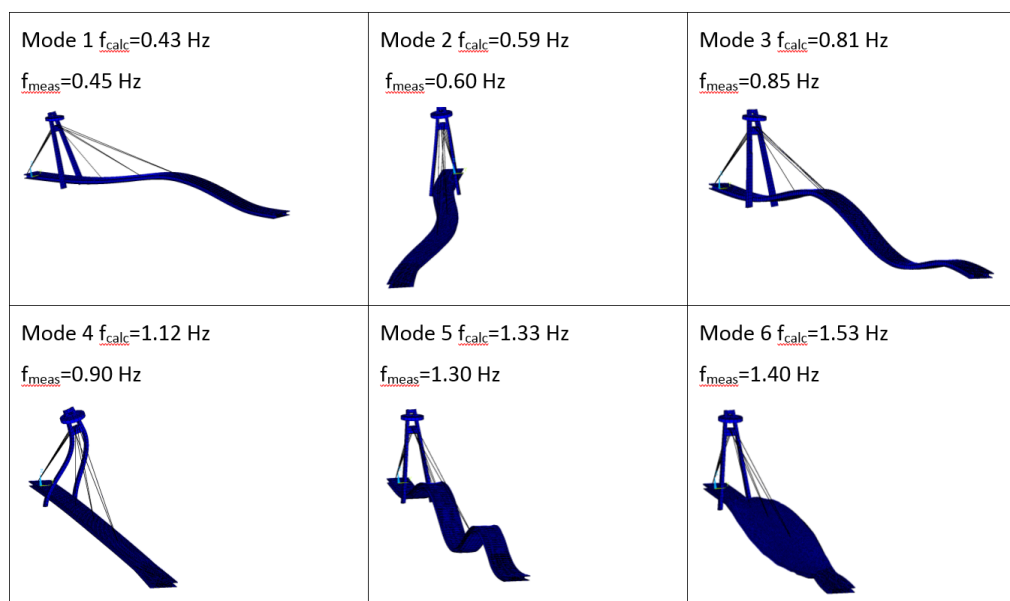
Vzájomná spektrálna analýza dvojice časových radov (signálov) nám umožňuje určiť koreláciu a časový posun medzi informáciami (údajmi) obsiahnutými v nich. Výsledné amplitúdové spektrum v takomto prípade bude obsahovať spoločné amplitúdy vybraných frekvencií oboch časových radov (signálov). Fázové spektrum charakterizuje časový posun medzi dvomi časovými radmi (napr. teplotou a pretvorením konštrukcie vplyvom teplotného zaťaženia – obr. 4). Úroveň korelácie dvoch časových radov (signálov) pre vybranú hodnotu periódy charakterizuje hodnota ich koherencie [17].

Cieľom analýzy vo frekvenčnej oblasti je určenie vlastných frekvencií pohybu konštrukcie, zodpovedajúcim jej vlastným tvarom. Vlastné tvary konštrukcie je možné určiť výpočtom na modeli konštrukcie metódou konečných prvkov – Finit Element Metod (FEM).



Obr. 4 Pretvorenie nosnej konštrukcie mosta vplyvom teplotného zaťaženia

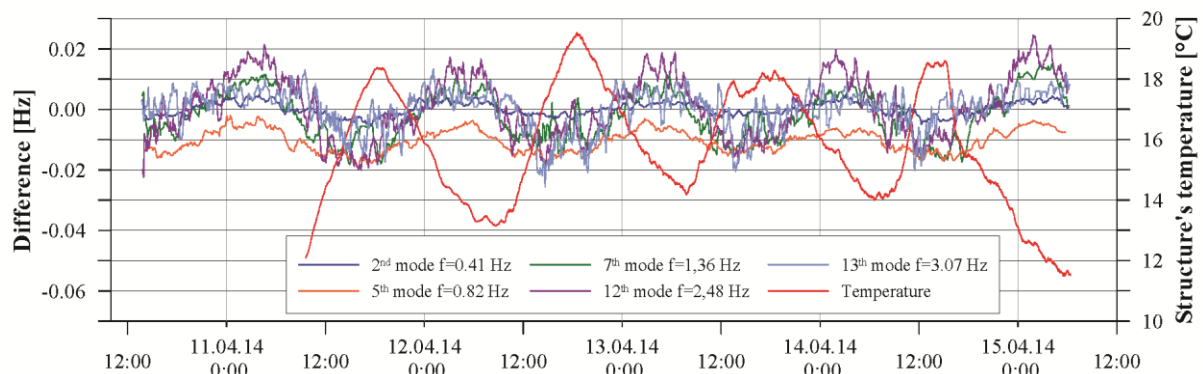
Porovnanie vypočítaných vlastných frekvencií s hodnotami určenými meraním poskytuje veľmi dobrý obraz o výslednej kvalite meraní. Pri verifikácii funkcionalít AMS navrhovaného pre bratislavské mosty boli vykonané merania na moste SNP, ktorého vlastné frekvencie boli súčasne spočítané v prostredí ANSYS (obr. 5). Merania boli vykonané v podmienkach silného dopravného zaťaženia konštrukcie. Zohľadnenie dopravného zaťaženia (najmä nákladných vozidiel a autobusov) zavedenie korekcií, môžu spresniť výsledky analýzy [16].



Obr. 5 Vlastné tvary a vlastné frekvencie mosta SNP [16]

Existencia AMS umožňuje realizáciu opakovaných meraní vybranými snímačmi a na vybraných bodoch v takmer ľubovoľnej množine variácií. Táto skutočnosť viedla kolektív autorov skúmať stabilitu, resp. prípadné variácie frekvencií mostnej konštrukcie v čase. Predmetom analýzy boli frekvenčné spektrá meraní realizovaných v 5 minútových blokoch. Po odstránení trendových zložiek boli v každom bloku vypočítané vlastné frekvencie určené z merania. Priemerná hodnota vlastných frekvencií, vypočítaná zo všetkých blokov sa líši od modelových hodnôt menej ako 10%, čo potvrdzuje dobrú zhodu medzi výsledkami meraní a výpočtom pomocou FEM. Denné variácie frekvencií vykazujú zmeny vo veľkosti 0,04 Hz korelujúce s určitým fázovým posunom s variáciami teploty nosnej konštrukcie (obr. 6).

Najvyššie hodnoty variácií vykazuje frekvencia na úrovni 2,48 Hz zodpovedajúcej 12. vlastnému tvaru. Nižšie hodnoty variácií vykazujú nižšie frekvencie analyzovaného spektra, kde hodnoty denných variácií frekvencií dosahujú hodnotu maximálne 0,01 Hz [13].



Obr. 6 Denné variácie vlastných frekvencií nosnej konštrukcie mosta

Výsledky vzájomnej spektrálnej analýzy frekvencií a teplotného zaťaženia konštrukcie potvrdzujú koreláciu na úrovni 0,75 a vyššej. Fázový posun má hodnotu  $-150^\circ$ , čo svedčí o klesajúcej hodnote frekvencií konštrukcie s nárastom teplotného zaťaženia a to s posunom cca 2 hodín. Výsledky potvrdzujú možnosť použitia opakovaných dynamických meraní na dlhodobé sledovanie vlastnosti mostnej konštrukcie [13].

## 5 ZÁVER

Vývoj moderných technológií prináša možnosti aj v oblasti realizácie meraní posunov a pretvorení stavebných konštrukcií. Nové série geodetických prístrojov vykazujú stále vyššiu mieru automatizácie a štandardizácie s meracou technikou využívanou inými profesiami (stavebníctvo, strojárstvo a iné), čo umožňuje ich bezproblémovú integráciu a vytváranie AMS spoločne s ďalšími snímačmi a senzormi. Všeobecná snaha o automatizáciu meraní je vedená cieľom zvýšiť kvalitu meraní, na jednej strane zvyšovaním ich presnosti a na strane druhej ich objektivitu.

Vhodne navrhnutý a realizovaný AMS je vhodný na realizáciu tak dlhodobých ako aj krátkodobých meraní. Programové produkty poskytované trhom v súčasnosti umožňujú len čiastkový manažment AMS. Na doplnenie funkcionalít obvykle vyžadovaných užívateľmi je potrebné ďalšie programové vybavenie obvykle pripravené na mieru. Vhodným doplnením programového vybavenia AMS je možné u mostných objektov vykonávať celú škálu meraní v časovej aj frekvenčnej oblasti.

Výsledky prezentované v príspevku vznikli s podporou projektu APVV-0236-12.

## LITERATÚRA

- [1] BENČAT, J. - STEHLÍKOVÁ, M. - PAPÁN, D. 2012. New Bridge crossing Danube in Bratislava: Assessment, Measurement and Monitoring. In IX. International Scientific Conference of Faculty of Civil Engineering : Košice, Slovak Republic, May 22-25, 2012. Technical University in Košice, 2012. ISBN 978-80-553-0905-7. 8 p.
- [2] CIPRA, T. 1986. Analýza časových řad s aplikacemi v ekonomice. SNTL/ALFA, Praha, 246 p.
- [3] COLLINS, J. – MULLINS, G. – LEWIS, C. – WINTERS, D. 2014. State of the practice and art for structural health monitoring of bridge substructures. Publ. No. FHWA-HRT-09-040. Federal Highway Administration, USA.

- [4] ENCKELL, M. 2007. Structural Health Monitoring of Bridges in Sweden. In The 3rd International conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, Vancouver, British Columbia, Canada, November 13-16, 2007. 9 s.
- [5] FÁBRY, M. - ŽIVNER, T. - ÁROCH, R. - SOKOL, M. - PAULÍK, P. 2014. Monitorovanie Prístavného mosta v Bratislave. Inžinierske stavby. 2014, Vol.62, No.2, p.26-27.
- [6] GEIER, R. 2009. Recent Austrian Activities in Bridge Monitoring. In 5th Central European Congress on Concrete Engineering, Baden. Austria, Baden: VCE, 2009, 6 p.
- [7] HILL, C. D. – SIPPEL, K., D. 2002. Modern Deformation Monitoring: A Multi Sensor Approach. In FIG XXII International Congress, Washington, D.C. USA, FIG, 2002, 12 p.
- [8] HSIEH, K., H. - HALLING, M., W. - BARR, P., J. 2006. Overview of Vibrational Structural Health Monitoring with Representative Case Studies. In Journal of Bridge Engineering, ASCE. ISBN 1084-0702/2006/6-707-715, 2006, vol.11, no. 6, p.707-715.
- [9] KO, J. M. - NI, Y. Q. 2005. Technology Developments in Structural Health Monitoring of Large-Scale Bridges. In Engineering Structures. Elsevier. Vol. 27. 2005, s. 1715-1725.
- [10] KOPÁČIK, A. - LIPTÁK, I. - KYRINOVIČ, P. - ERDÉLYI, J. 2013. Dynamic deformation monitoring of a technological structure. In Geodetski list. ISSN 0016-710X. Vol.67 (90), No. 3 (2013), s. 161-174.
- [11] KUO, S. M. – LEE, B. H. 2001. Real-Time Digital Signal Processing. John Wiley and Sons Ltd. 2001. 503 p. ISBN 0-470-84137-0.
- [12] LIPTÁK, I. 2010. Meranie posunov a pretvoreni mosta Apollo cez Dunaj v Bratislave. Bratislava, Diplomová práca, 62 s.
- [13] LIPTÁK, I. 2014. Automatisation of Deformation Measurements of Bridge Structures. Dissertation thesis. Bratislava: STU in Bratislava, Slovak Republic, 164 pp.
- [14] LOMB, N. R. 1976. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. Astrophysics Space Science 1976; 39:447–62.
- [15] PEETERS, B. 2009. Continuous Monitoring of the Øresund Bridge: Data Acquisition and Operational Modal Analysis. In Encyclopedia of Structural Health Monitoring. DOI: 10.1002/9780470061626.shm, 166 pp.
- [16] SOKOL, M. - VENGLÁR, M. - ÁROCH, R. - KOPÁČIK, A. - KYRINOVIČ, P. - LIPTÁK, I. - ERDÉLYI, J. - ŠIŠMIŠOVÁ, Z. - LAMPEROVÁ, K. 2017. Traffic Response Pattern of Cable-Stayed Bridge as a Comparison Tool for SHM. 39th IABSE Symposium – Engineering the Future September 21-23 2017, Vancouver, Canada.
- [17] TRAUTH, M. H. 2010. Matlab Recipes for Earth Sciences. 3<sup>rd</sup> Edition. Springer – Verlag, 2010. 336 p. ISBN 978-3-642-12762-5.
- [18] WENZEL, H. 2009. Health Monitoring of Bridges. John Wiley & Sons, Ltd. 2009. 643 p. ISBN 978-0-470-03173-5.
- [19] WENZEL, H., - PICHLER D. 2005. Ambient Vibration Monitoring. 1<sup>st</sup> edition. J. Wiley & Sons Ltd., Chichester. 308 p. ISBN 978-0470024300.
- [20] YONG, G. - SPENCER, B., F. 2008. Structural Health Monitoring Strategies for Smart Sensor Networks. Urbana-Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2008. ISSN 1940-9826. 126 p.

**Lektoroval:** Ing. Štefan Lukáč  
LIPG, s.r.o. Bratislava