

1 - Most Apollo cez rieku Dunaj v Bratislave

# AUTOMATIZOVANÉ MERACIE SYSTÉMY NA KONTROLU STABILITY MOSTOV

Automatizované meracie systémy (AMS) na dlhodobý geodetický monitoring posunov a pretvorení sú čoraz častejšie nasadzované na investične náročných stavebných objektoch. Umožňujú sledovať stav objektov v reálnom čase v relatívne vysokom časovom rozlíšení. Príspevok popisuje AMS mostných objektov, ktorý bol navrhnutý na Katedre geodézie Stavebnej fakulty STU v Bratislave. Inštalácia a testovacia prevádzka je realizovaná na moste Apollo cez rieku Dunaj v Bratislave.

Mosty sú neoddeliteľnou súčasťou dopravnej infraštruktúry. Ich bezpečná prevádzka je podmienená pravidelnou geodetickou kontrolou, ktorá je zameraná predovšetkým na určovanie posunov a pretvorení vybraných častí mosta. Kým meranie posunov a pretvorení spodnej stavby mosta je možné vykonať aj počas premávky na moste, meranie na nosnej konštrukcii mosta si vyžadujú jej dočasné obmedzenie.

Z dôvodu dopravného zaťaženia mosta je potrebné minimalizovať čas

odstávky, resp. vykonávať geodetické merania len v nočných hodinách. Časové obmedzenia, ako aj svetelné podmienky počas merania, sú limitujúcim prvkom pri voľbe metódy a metódy merania.

Doteraz používané metódy a prístrojové vybavenie na monitorovanie posunov a pretvorení mostných objektov sú nahradzované progresívnymi monitorovacími metódami s integrovanými AMS, ktoré sú spravidla inštalované pri výstavbe a prevádzke tunelov, veľkých

mostných objektov, výškových budov, povrchových a hlbinných banských objektov, pri sledovaní svahových posunov a pod. Aplikácia AMS umožňuje kontinuálne monitorovanie stability mostného objektu v ľubovoľnom čase bez nutnosti dopravného obmedzenia [1]. Významným prínosom je však možnosť monitorovať aj dynamické vlastnosti a zaznamenať informácie o správaní sa pozorovaného objektu spojitě, bez straty informácie vplyvom použitej technológie.

## AMS na kontrolu stability mostov

Takýto systém na kontrolu stability mostov je založený na integrácii geodetických a negeodetických (elektronických) technológií na meranie posunov a pretvoreni do jedného celku. Systém pracuje na princípe viacerých metód, ktoré umožňujú kontinuálne meranie a registráciu meraných údajov. Je navrhnutý tak, aby poskytoval užívateľovi (správci mosta) údaje o správaní sa mostnej konštrukcie počas plnej prevádzky mosta. AMS pozostáva z:

- univerzálnej meracej stanice Leica TS30 so systémom ATR,
- multifrekvenčnej GNSS aparatúry Leica VIVA GS15,
- dvojsovoých snímačov naklonenia Leica Nivel 210 a Nivel 220,
- jednoosového snímača zrýchlenia HBM B12/200,
- A/D prevodníka HBM Spider 8,
- meteorologických staníc Reinhardt DFT-1MV a TFA Nexus,
- časového servera (Local Time Server) + WiFi antén,
- prenosných počítačov.

Systém je v súčasnej dobe inštalovaný na moste, resp. v blízkosti mosta

Apollo v Bratislave, kde sa realizujú pravidelné testovacie 24-hodinové merania, niekoľkokrát v roku [2] a [3]. V štádiu prípravy je obdobný AMS na moste SNP v Bratislave.

## Aplikácia AMS na moste Apollo

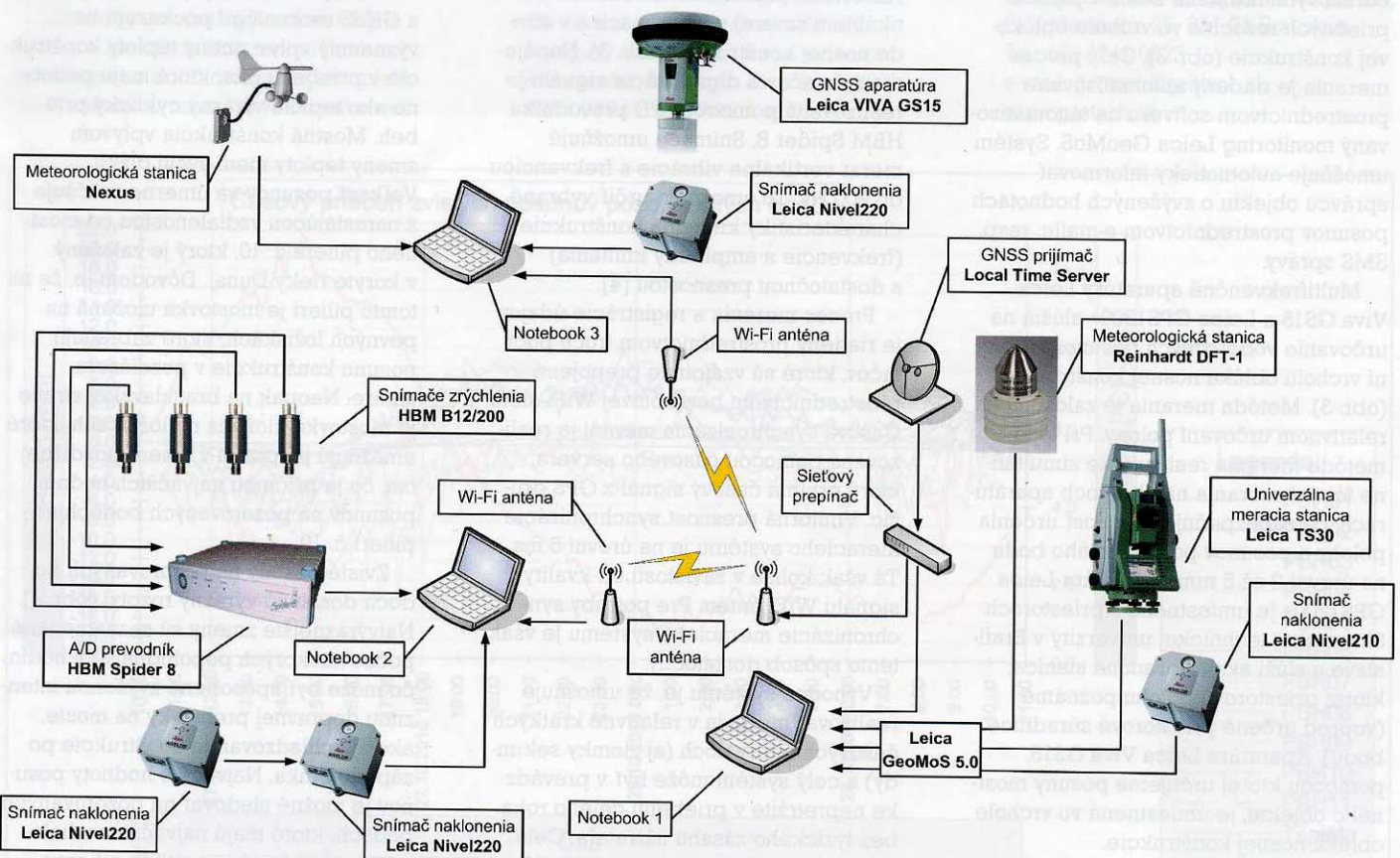
Most Apollo cez rieku Dunaj je piatym bratislavským mostom spájajúcim centrálnu časť mesta s mestskou časťou Petržalka (obr. 1). Celková dĺžka mosta vrátane príľahlej bratislavskej a petržalskej estakády je 854,0 m. Hlavný mostný objekt tvorí dvojtrámová oceľová konštrukcia s ortotropnou mostovkou. V hlavnom poli sú trámy zavesené na dvoch k sebe naklonených oceľových oblúkoch výšky 36,0 m. Na tomto mostnom poli je inštalovaný predmetný AMS.

Predmetom geodetického monitoringu hlavnej oceľovej konštrukcie mosta sú:

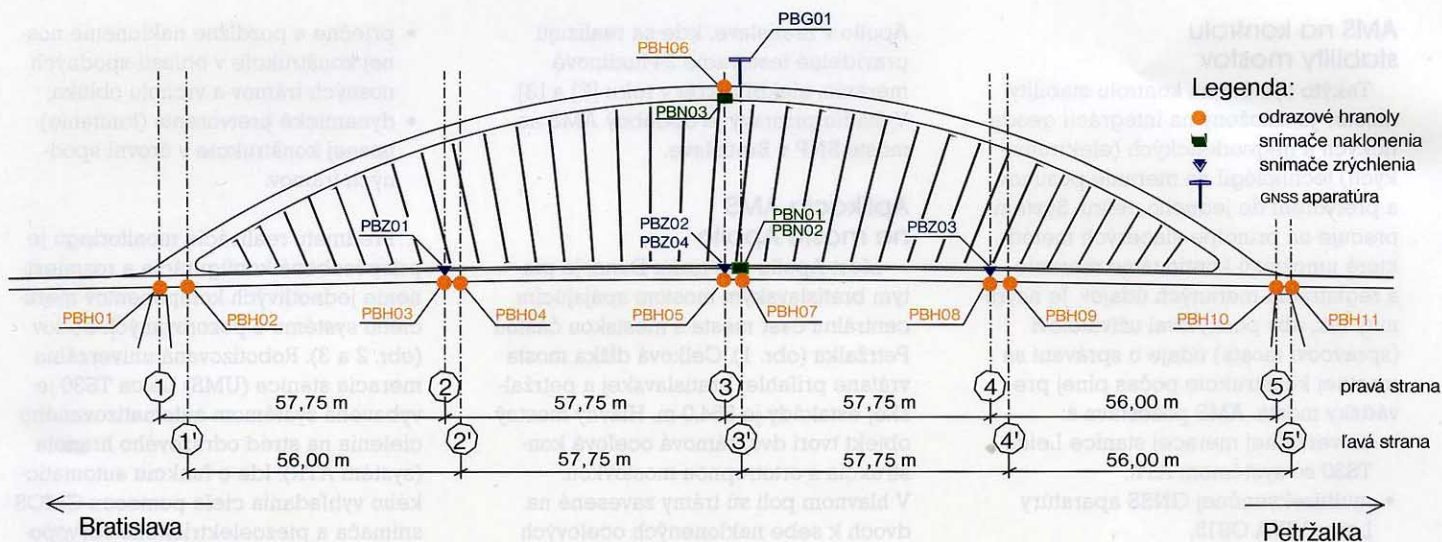
- priestorové (3D) posuny pozorovaných bodov, umiestnených v oblasti spodných nosných trémov a vrcholu oblúka, vrátane kontroly stability vzťažného bodu;
- vodorovné posuny pozorovaného bodu, umiestneného v úrovni vrcholu oblúka nosnej konštrukcie;

- priečne a pozdĺžne naklonenie nosnej konštrukcie v oblasti spodných nosných trémov a vrcholu oblúka;
- dynamické pretvorenia (kmitanie) nosnej konštrukcie v úrovni spodných trémov.

Predmetu realizácie monitoringu je prispôbená konfigurácia a rozmiestnenie jednotlivých komponentov meracieho systému a pozorovaných bodov (obr. 2 a 3). Robotizovaná univerzálna meracia stanica (UMS) Leica TS30 je vybavená systémom automatizovaného cielenia na stred odrazového hranola (systém ATR). Ide o funkciu automatického vyhľadania cieľa pomocou CMOS snímača a piezoelektrického servopohonu, ktoré sú integrované v UMS. Stanica tak umožňuje plnú automatizáciu merania na vybrané pozorované body stabilizované geodetickými odrazovými hranolmi, s relatívne vysokou presnosťou určenia priestorových súradníc a posunov do 2 mm. Meteorologická stanica Reinhardt DFT-1MV meria teplotu vzduchu, atmosférický tlak a relatívnu vlhkosť vzduchu. Polohová stabilita UMS je v pravidelných intervaloch monitorovaná pomocou snímača naklonenia Leica Nivel210. Snímač meria



2 - Schéma štruktúry automatizovaného meracieho systému



3 - Situácia rozmiestnenia pozorovaných bodov (snímačov) na moste

naklonenie v dvoch na seba kolmých smeroch. Údaje o atmosférických podmienkach a naklonení stanoviska zabezpečujú korekciu meraných veličín, korekciu polohy UMS a tým pádom aj korektné určenie priestorovej polohy a posunov pozorovaných bodov mostného objektu. Pozorované body, ktorých priestorová poloha a posuny sú určované pomocou UMS sú stabilizované odrazovými hranolmi Leica v piatich pričných rezoch a vo vrchole oblúkovej konštrukcie (obr. 3). Celý proces merania je riadený automatizovane prostredníctvom softvéru na automatizovaný monitoring Leica GeoMoS. Systém umožňuje automaticky informovať správcu objektu o zvýšených hodnotách posunov prostredníctvom e-mailu, resp. SMS správy.

Multifrekvenčné aparatúry Leica Viva GS15 a Leica GPS1200+ slúžia na určovanie vodorovných posunov v úrovni vrcholu oblúka nosnej konštrukcie (obr. 3). Metóda merania je založená na relatívnom určovaní polohy. Pri tejto metóde merania realizujeme simultánne fázové merania na oboch aparatúrach, čo zabezpečuje presnosť určenia polohy a posunov pozorovaného bodu na úrovni 2 až 5 mm. Aparatúra Leica GPS1200+ je umiestnená v priestoroch Slovenskej technickej univerzity v Bratislave a slúži ako referenčná stanica, ktorej priestorovú polohu poznáme (vopred určené priestorové súradnice bodu). Aparatúra Leica Viva GS15, pomocou ktorej určujeme posuny mostného objektu, je umiestnená vo vrchole oblúka nosnej konštrukcie.

Snímače naklonenia Leica Nivel220 monitorujú pozdĺžne a priečne naklone-

nie nosnej konštrukcie v strede nosnej konštrukcie (obr. 3). Tieto snímače merajú naklonenie konštrukcie oproti zvislici v pravidelných 1 sekundových intervaloch s presnosťou 4,7  $\mu\text{m/m}$ . Tieto údaje umožňujú určiť vodorovnú zložku naklonenia, resp. posunu konštrukcie v mieste merania.

Snímače zrýchlenia HBM B12/200 slúžia na určovanie dynamických charakteristík (kmitanie konštrukcie vo vertikálnom smere) vo štvrtinách a v strede nosnej konštrukcie (obr. 3). Napájanie snímačov a digitalizácia signálu je realizovaná pomocou A/D prevodníka HBM Spider 8. Snímače umožňujú merať vertikálne vibrácie s frekvenciou do 200 Hz. To umožňuje určiť vybrané charakteristiky kmitania konštrukcie (frekvencie a amplitúdy kmitania) s dostatočnou presnosťou [4].

Proces merania a registrácie údajov je riadený prostredníctvom troch počítačov, ktoré sú vzájomne prepojené prostredníctvom bezdrôtovej WiFi siete. Časová synchronizácia meraní je realizovaná pomocou časového servera, ktorý prijíma časový signál z GPS družíc. Vnútna presnosť synchronizácie meracieho systému je na úrovni 5 ms. Tá však kolíše v závislosti od kvality signálu WiFi antén. Pre potreby synchronizácie meracieho systému je však tento spôsob dostatočný.

Výhodou systému je, že umožňuje realizovať merania v relatívne krátkych časových intervaloch (aj zlomky sekundy) a celý systém môže byť v prevádzke nepretržite v priebehu celého roka bez fyzického zásahu užívateľa. Celá konfigurácia parametrov merania (časový interval meraní a registrácie, výstupy

atď.) závisí od potrieb užívateľa systému, čím je možné vytvoriť si obraz o stave objektu v ľubovoľnom časovom období a rozlíšení. Na rozdiel od klasických metód geodetického monitoringu predstavuje AMS vyššiu pridanú hodnotu pre užívateľa systému.

### Praktické skúsenosti so systémom

Posuny určované pomocou UMS a GNSS technológií poukazujú na významný vplyv zmeny teploty konštrukcie v priebehu dňa, ktoré majú podobne ako teplota výrazný cyklický priebeh. Mostná konštrukcia vplyvom zmeny teploty mení svoju dĺžku. Veľkosť posunov sa úmerne zväčšuje s narastajúcou vzdialenosťou od mostného piliera č. 10, ktorý je založený v koryte rieky Dunaj. Dôvodom je, že na tomto pilieri je mostovka uložená na pevných ložiskách, ktoré zabraňujú posunu konštrukcie v pozdĺžnom smere. Naopak na bratislavskej strane je mostovka uložená na ložiskách, ktoré umožňujú jej posun v smere pozdĺžnej osi, čo je príčinou najväčších hodnôt posunov na pozorovaných bodoch na pilieri č. 10.

Zvislé posuny na pozorovaných bodoch dosahujú výrazný rozptyl (obr. 4). Najvýraznejšie zmeny sú zaznamenané počas neskorých popoludňajších hodín, čo môže byť spôsobené zvýšenou intenzitou dopravnej premávky na moste, ako aj ochladzovaním konštrukcie po západe Slnka. Najväčšie hodnoty posunov je možné sledovať na pozorovaných bodoch, ktoré majú najväčšiu vzdialenosť od oboch mostných pilierov. V nočných hodinách je priebeh zvislých

posunov konštrukcie ustálený. Výsledky dynamických meraní pomocou snímačov zrýchlenia korešpondujú s teoretickým modelom kmitania konštrukcie. Zmeny frekvencií kmitania konštrukcie nadobúdajú podobne ako posuny cyklický priebeh, vplyvom zmien teploty vzduchu a konštrukcie ako aj vplyvom dopravnej premávky.

Testovacie merania s využitím AMS teda preukázali potrebu aplikácie takýchto systémov na veľkých mostných objektoch. Vytvorili nový pohľad na správanie sa hlavnej oceľovej konštrukcie mosta vplyvom poveternostných podmienok (zmeny teploty vzduchu a konštrukcie, rýchlosť a smer vetra), kolísania hladiny spodnej vody rieky Dunaj a v neposlednom rade aj vplyvom zaťaženia mosta dopravnou premávkou. Posuny a pretvorenia mostných objektov je potrebné monitorovať aj v krátkych časových intervaloch. Polročné, resp. ročné kontrolné merania týchto objektov zaznamenávajú len dlhodobý vývoj stavebnej konštrukcie. Poznatky zo správania sa konštrukcie získané AMS poskytujú detailný pohľad na vývoj konštrukcie v čase a môžu slúžiť na včasné odhalenie porúch konštrukcie a tým predísť závažným nehodám.

#### Záver

Dlhodobý geodetický monitoring je jednou z hlavných úloh technicko-bezpečnostného dohľadu mostných objektov. S rozvojom meračských a informač-

ných technológií sa zefektívňuje aj spôsob realizácie týchto činností. Súčasný trend aplikácie automatizovaných meracích systémov však brzdia relatívne vysoké vstupné náklady na ich realizáciu. Pri výstavbe veľkých mostných objektov je však potrebné vyvíjať snahu na inštaláciu takýchto systémov, pretože z dlhodobého hľadiska predstavujú efektívny spôsob sledovania stavu konštrukcie. To preukazuje aj reálna aplikácia takého systému na moste Apollo v Bratislave.

Ing. Peter Kyrinovič, PhD.,  
Ing. Imrich Lipták, Ing. Ján Erdélyi,  
prof. Alojz Kopáčik, PhD.,  
Stavebná fakulta STU Bratislava  
Recenzent: doc. Ing. Jaroslav Šíma, CSc.,  
Stavebná fakulta ŽU, Žilina  
Foto: archív autorov

#### Literatúra:

- [1] Kopáčik A., Kyrinovič P., Erdélyi J., Lipták I.: *New Trends of Automated Bridge Monitoring*, 2011, In *Reports on Geodesy No. 1 (90)*, s. 173 – 181, ISSN 0867-3179
- [2] Kopáčik A., Kyrinovič P., Lipták I., Erdélyi J.: *Automated Monitoring of the Danube Bridge Apollo in Bratislava*, 2011, In *FIG Working Week 2011: 6th National congress of ONIGT, Bridging the gap between cultures. Marrakech, Morocco, 18. – 22. 5. 2011*, ISBN 978-87-90907-92-1, s. 10

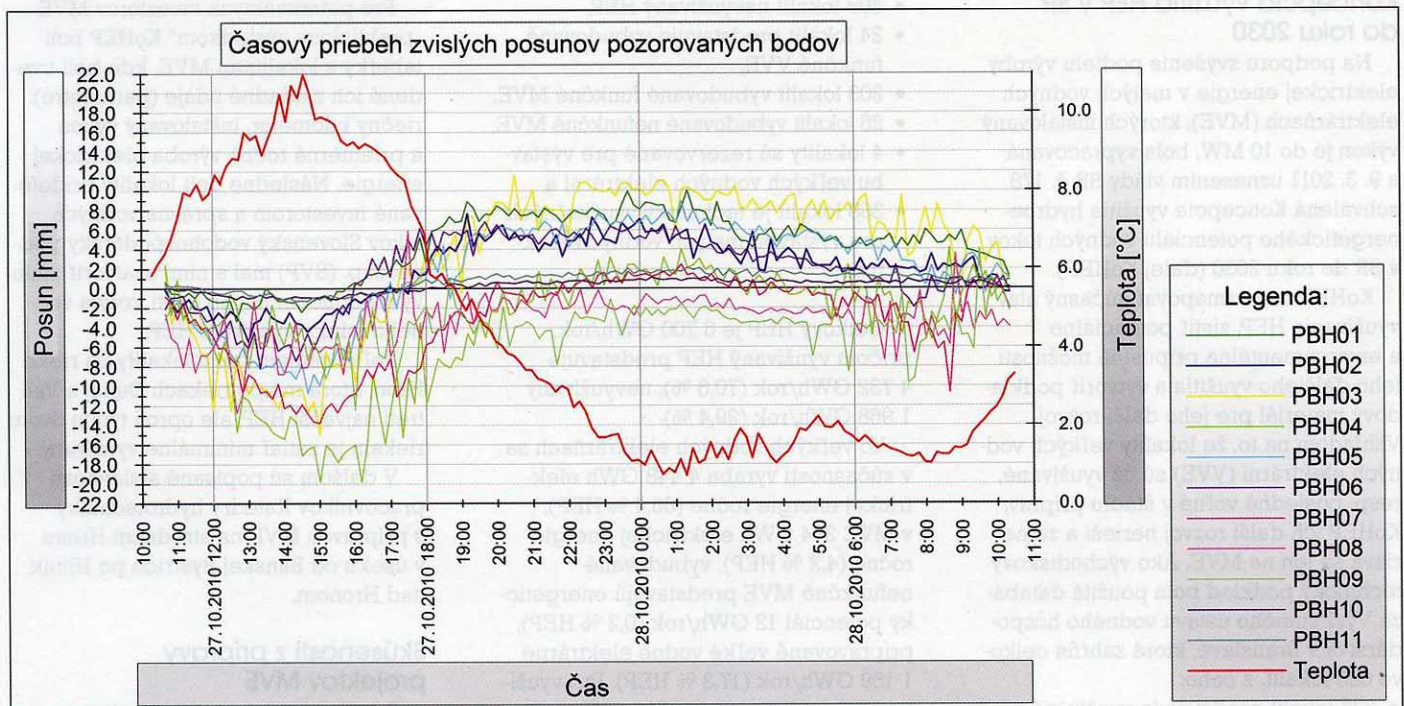
- [3] Kyrinovič P., Lipták I., Erdélyi J., Kopáčik A.: *Automatizovaný merací systém na kontinuálny monitoring mostov*, 2011, In *Geodetický a kartografický obzor 12/2011*, ISSN 0016-7096, 2011, roč. 57, č. 12, s. 285 – 294
- [4] Kopáčik A., Lipták I.: *Spectral analysis of structural deformation – A case study*, 2012, In *Journal of Applied Geodesy*, Vol. 6, Iss. 3 – 4, s. 159 – 166, ISSN 1862-9024

Spoločnosť **GEOTECH Bratislava s. r. o.** dodáva technológie na určovanie geometrických parametrov objektov a ich presnej polohy. Vykonáva tiež činnosti spojené s monitorovaním objektov ako: odborný posudok – návrh technológie – projekt – realizácia.

Motto: „Monitorovanie chráni vaše investície ako aj zdravie a životy vašich pracovníkov“.

**Leica**  
**Geosystems**

**GEOTECH Bratislava s. r. o.**,  
zastúpenie **Leica Geosystems AG pre SR**,  
Černyševského 26, 851 01 Bratislava  
Tel.: 02/ 6241 0823  
e-mail: geotech@geotech.sk  
www.geotech.sk



4 - Zvislé posuny na bodoch meraných pomocou UMS