

MERANIE POSUNOV A PRETVORENÍ STAVEBNÝCH OBJEKTOV, KONŠTRUKCIÍ A TECHNOLOGICKÝCH ZARIADENÍ

Alojz Kopáčik¹

Abstrakt

Vodohospodárske stavby patria medzi objekty osobitného významu z hľadiska celospoločenského, technického, ekonomického ako aj z bezpečnostného. Priebežné a nepretržité monitorovanie ich stavu je preto nevyhnutné, avšak personálne, časovo ale aj ekonomicky náročné. Vyššie uvedené skutočnosti determinujú potrebu kontinuálneho merania posunov na vodohospodárskych stavbách, v súlade s trendom implementáciu moderných metód a technologických postupov umožňujúcich automatizáciu procesu merania a interpretácie ich výsledkov. Príspevok prináša prehľad metód na meranie posunov a pretvorenie stavebných objektov a ich stručné hodnotenie z pohľadu dosiahnuteľnej presnosti. V obmedzenom rozsahu prináša stručný komentár k metodike spracovania výsledkov a ich interpretácie, včítane obvyklého obsahu finálneho elaborátu. V súlade s aktuálnymi trendami v zahraničí sú jednotlivé časti príspevku doplnené o poznámky k automatizácii procesu merania a spracovania výsledkov.

1 ÚVOD

Pri výstavbe sa stále častejšie a častejšie využívajú zložité a atypické konštrukcie, veľkých rozmerov alebo výšok. V technických predpisoch na výstavbu a prevádzku stavebných objektov boli preto zakotvené požiadavky na systematické merania posunov a pretvorenie objektov a technologických zariadení. Vodohospodárske stavby patria medzi objekty osobitného významu z hľadiska celospoločenského, technického, ekonomického ako aj z bezpečnostného. Priebežné a nepretržité monitorovanie ich stavu je preto nevyhnutné, avšak personálne, časovo ale aj ekonomicky náročné. Vyššie uvedené skutočnosti determinujú potrebu automatizácie tohto procesu, včítane čiastočnej alebo komplexnej interpretácie výsledkov získaných monitoringom. Vzhľadom na vysokú úroveň centralizovaného riadenia prevádzky týchto objektov sa prirodzene núka integrácia meracích systémov implementovaných na jednotlivých objektoch do jedného centra, lokalizovaného podľa požiadaviek prevádzkovateľa. Túto skutočnosť podporuje aj dnes už existujúce vysokokapacitné komunikačné prepojenie jednotlivých objektov s prevádzkovým riadiacim centrom.

¹ prof. Ing. Alojz Kopáčik, PhD., Katedra geodézie, Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 813 68 Bratislava, alozj.kopacik@stuba.sk

2 VÝZNAM A ÚČEL MERANÍ

Každý, aj správne založený a vybudovaný stavebný objekt, zaznamenáva nielen počas stavby, ale aj počas prevádzky určité priestorové zmeny, ktoré pôsobia na geometrické parametre konštrukcie objektu alebo technických zariadení, a tým narušujú ich statickú funkciu a spoľahlivosť. Z hľadiska bezpečnosti, bezporuchovej výstavby a prevádzky objektov sú potrebné merania, ktorými sa overujú tvarové a rozmerové parametre základových a nosných konštrukcií objektov. Akonáhle presahujú zmeny v týchto parametroch určitú, vopred definovanú hodnotu, treba vykonať opatrenia za účelom odstránenia signalizovaných závad. Diagnostikou konštrukcií stavebných objektov sa získajú objektívne informácie o procese ich pretvorenia. Tieto tvoria podklady na:

- posúdenie správania sa objektu a prostredia, s ktorým je objekt v interakcii,
- porovnanie skutočných hodnôt posunov s teoretickými (vypočítanými) hodnotami,
- hodnotenie bezpečnosti a správnej funkcie konštrukcií objektu.

Veľké rozdiely medzi meranými a teoretickými hodnotami signalizujú nedostatky v zakladaní, zlú kvalitu stavebných prác, nepresný matematický model použitý na výpočet teoretických hodnôt, nepresné údaje o prvkoch použitých na výpočet teoretických hodnôt alebo nespoľahlivé výsledky merania spôsobené chybami merania a podobne. Výsledky diagnostiky možno využiť nielen na posudzovanie bezpečnosti a správania sa základových a nosných konštrukcií objektu, ale aj na prognostické účely, ďalej ako podklady na plánovanie údržby a ako podnety na predlžovanie životnosti a prevádzky objektov alebo technologických zariadení.

Meranie posunov nových stavebných objektov vyžaduje projektant po dohode s investorm v zmysle technických noriem [11], a to spravidla na základe vyhodnotených prieskumov o základovej pôde, resp. ak sa jedná o objekty nezvyčajnej konštrukcie alebo o objekty obsahujúce nové neoverené konštrukčné systémy.

Meranie posunov existujúcich objektov predpisujú vybrané technické predpisy alebo si toto meranie vyžiada majiteľ (prevádzkovateľ) na základe odborného statického posudku v zmysle stavebného zákona obvykle vtedy, keď sa objavia na objekte trhliny alebo možno predvídať posuny vplyvom prítlačenia základovej pôdy v okolí, zmenou hladiny podzemnej vody, podkopianím a podobne.

Meranie posunov objektov môže mať charakter dlhodobého periodického merania alebo charakter krátkodobého merania [6], [11].

3 ZÁKLADNÉ POJMY

Posunom (pretvorením) všeobecne rozumieme pozvoľné zmeny v priestorovej polohe (tvare) objektu vplyvom zaťaženia základovej škáry, dynamických prevádzkových účinkov a ďalších, obvykle fyzikálnych faktorov, pôsobiacich na objekt v danom prostredí a čase. Tieto zmeny určíme priamym meraním na objektoch v teréne, prípadne na ich modeli vytvorenom v počítačovom prostredí. Meraním sa vyšetruje priebeh, charakter a veľkosť týchto zmien oproti základnej alebo predchádzajúcej etape merania.

Posun možno definovať ako zmenu v polohe objektu oproti polohe v základnej alebo predchádzajúcej etape merania.

Pretvorenie (deformácia) vyjadruje zmenu tvaru v konštrukcii objektu oproti tvaru pri základnej alebo predchádzajúcej etape merania. Teoreticky pri rovnomernom posune objektu, resp. jeho častí nemusí nastať pretvorenie.

Absolútny posun je posun vyjadrený v absolútnej sústave, nezávislej od meraného objektu.

Relatívny posun je posun vyjadrený v relatívnej sústave vzhľadom na vzťažný bod nachádzajúci sa na objekte. Vyjadruje vzájomné zmeny v polohe pozorovaných bodov objektu.

Vodorovný posun znamená vodorovnú zložku posunu meraného bodu. V pravouhlej súradnicovej sústave sa charakterizuje zložkami Δx a Δy .

Zvislý posun vyjadruje zvislú zložku posunu meraného bodu. Zvyčajne sa označuje Δz alebo Δh .

Sadanie (zdvíhanie) je zvislá zložka posunu smerom dolu (hore), obvykle vyvolaná stlačením základovej pôdy. V banskom meračstve sa používa názov *pokles*.

Naklonenie je odchýlenie zvislej osi objektu od zvislice.

Pootočenie je uhlová odchýlka objektu od jeho pôvodnej polohy, pričom je os otáčania vo všeobecnej polohe.

Priehyb (ohyb) je pretvorenie zvyčajne nosnej konštrukcie objektu v smere kolmom na prevládajúci smer.

Ďalšie pojmy súvisiace s meraním posunov a pretvorení obsahujú napríklad publikácie [6], [11] a mnohé ďalšie.

4 PROJEKT NA MERANIE POSUNOV A PRETVORENÍ

Pre každý stavebný objekt, na ktorom treba merať posuny, sa vypracuje projekt na meranie posunov. Projekt vypracuje geodet projektanta obvykle za spolupráce statika a investora. Obsah a náležitosti projektu merania posunov uvádza [11]. V projekte sa uvedú najmä:

- účel a význam meraní,
- údaje o geologických a hydrologických vlastnostiach základovej pôdy,
- spôsob založenia stavby, popis konštrukcie objektu,
- hodnoty očakávaných posunov a ich predpokladaný vývoj,
- vyžadovaná presnosť meraní,
- metódy na meranie posunov s rozborom presnosti a hospodárnosti meraní,
- spôsob a časový plán rozmiestnenia a stabilizácie meracích zariadení, spôsob ich

- ochrany pred poškodením,
- harmonogram realizácie meraní,
 - spôsob spracovania výsledkov meraní,
 - rozpočet nákladov na vybudovanie meracích zariadení.

4.1 VYŽADOVANÁ PRESNOSŤ MERANÍ

Presnosť merania posunov závisí najmä od veľkosti a charakteru posunov. Vo všeobecnosti za dostatočnú presnosť merania posunov možno považovať takú presnosť, ktorá zaručí dosiahnutie cieľa pri minimálnych nákladoch na meranie. Vo veľkej väčšine prípadov je projektantom alebo technickým predpisom určená maximálna hodnota očakávaného posunu alebo petvorenia. Potom na určenie strednej chyby merania posunu môžeme použiť pomer medzi očakávanou celkovou hodnotou posunu p (s) a základnou strednou chybou merania σ_p (σ_s). Norma [11] určuje hodnotu tohoto pomeru na 1/15, môže však nadobúdať aj hodnoty 1/5, 1/10 alebo 1/20. Ďalšie spôsoby určenia presnosti merania posunov uvádza napríklad [6].

Pri meraní posunov objektov už odovzdaných do používania, ovplyvnených stavebnou činnosťou v okolí, hodnota základnej strednej chyby nemá prekročiť hodnotu $\sigma = 1/5 s_k$, kde s_k je kritická hodnota posunu, pri ktorej môže dôjsť k ohrozeniu funkčnej spoľahlivosti objektu [11].

V stavebnej a priemyselnej praxi prichádza najčastejšie do úvahy meranie zvislých posunov objektov alebo technických zariadení. Pre zakladanie stavieb spravidla stačí merať posuny so strednou chybou $\sigma_p = 1,0$ mm, pre statické výpočty sa požaduje presnosť o rád vyššia – maximálne však so strednou chybou $\sigma_p = 0,3$ mm. Pre vedecké experimenty sa zvyčajne vyžaduje presnosť 1% z veľkosti teoretických hodnôt posunov, pre technické (praktické) účely spravidla stačí presnosť merania posunov na úrovni 5% až 10% z očakávaných hodnôt posunov.

Pri stavbách založených na súdržných pevných zeminách tvoria zvislé posuny základov počas výstavby cca 70% konečných hodnôt. Pri tvárliвых súdržných zeminách len 50% konečných vypočítaných hodnôt posunov.

Dodržanie vyžadovanej presnosti merania sa kontroluje výpočtom a testovaním výberových (jednotkových) stredných chýb pri každom meraní. V prvom prípade sa odhadne hranica (intervalový odhad), v ktorej sa hodnota strednej chyby nachádza s pravdepodobnosťou $1 - \alpha$

$$P(t_1 \cdot \sigma \leq \sigma_0 \leq t_2 \cdot \sigma) = 1 - \alpha, \quad (1)$$

kde α je hladina významnosti, obvykle $\alpha = 0,05$,

t_1, t_2 sú kritické hranice konfidenčného intervalu (pre $\alpha = 0,05$),

σ_0 je empirická (jednotková) stredná chyba meraného posunu,

σ je základná stredná chyba merania posunu.

Dolné t_1 a horné t_2 hranice konfidenčného intervalu pre $P = 0,95$ ($\alpha = 0,05$) uvádza napríklad STN 73 0405 v prílohe 2. Dôležitá je najmä hodnota hornej hranice, ktorá nemá byť prekročená (s rizikom $\alpha = 0,05$)

$$P(\sigma_0 > t_2 \cdot \sigma) = \alpha. \quad (2)$$

V druhom prípade sa výberová stredná chyba testuje pomocou vhodnej testovacej štatistiky. Aj tu má význam najmä horná hranica, ktorá nemá byť prekročená (s rizikom $\alpha = 0,05$)

$$P(\sigma_0 > \sigma(1 + \sqrt{\frac{2}{k}})) = \alpha, \quad (3)$$

kde k je počet stupňov voľnosti.

4.2 METÓDY NA MERANIE POSUNOV

Posuny stavebných objektov možno určovať rozličnými fyzikálnymi meracími metódami (mechanickými, optickými, elektronickými a pod.), medzi ktorými majú významné miesto geodetické metódy. Elektronizáciou geodetických prístrojov a možnosťou rozsiahlej automatizácie procesu merania pri využívaní geodetických metód vo všeobecnosti sa otvára priestor na výraznú integráciu geodetických metód s inými metódami na meranie fyzikálnych veličín. Dôsledkom je vznik a implementácia integrovaných meracích systémov, najmä na veľkých stavbách a technologicky náročných investičných celkoch, u ktorých tvoria geodetické metódy jednu z mnohých súčastí integrovaného celku, ktorý je často projektovaný a neskôr aj riadený zástupcami iných profesií. Geodeti sú tak konfrontovaní novým postavením, v ktorom geodézia a geodetické metódy strácajú pozíciu výhradného nositeľa informácie o stave objektu. Na druhej strane, práve automatizácia procesu merania v geodézii najčastejšie meraných veličín (dĺžok, uhlov a prevýšení), vznik veľkopriestorových 3D skenovacích technológií a možnosť záznamu údajov vysokou frekvenciou (až na hranici 500 kHz), umožňuje geodetickým metódam zotrvať v pozícii „neopomenuteľného partnera“ aj pri implementácii automatizovaných meracích systémov v súčasnosti [2], [5].

Integrácia viacerých meracích metód a zariadení vyžaduje zjednotenie časových stôp pri zázname meraných údajov na všetkých pozíciách celku. Pri nasadení meracích technológií pracujúcich s frekvenciou merania na úrovni viac ako 100 Hz, to vyžaduje veľmi náročné a precízne riešenia. Uspokojivé riešenie tohto nového fenoménu môže byť niekedy až neprekonateľnou prekážkou pri návrhu a projektovaní meracieho systému. Výsledky výskumu v oblasti implementácie rozsiahlych integrovaných meracích systémov na mostných objektoch prinášajú spoľahlivé riešenie práve na báze geodetických technológií, využitím GNSS údajov [5].

V ostatných rokoch dochádza k určitému preskupeniu metód používaných na meranie posunov. Dôvodom je na jednej strane aplikácia nových výkonnejších prístrojov a technológií, na druhej strane snaha o zvýšenie efektívnosti pri realizácii meraní (najmä znižovanie potreby pracovnej sily). Do popredia sa tak dnes dostávajú metóda polárna, metóda prechodného stanoviska ale aj terestrické laserové skenovanie (TLS) a digitálna fotogrametria, ako aj metódy využívajúce optické vlákna, rôzne druhy tenzometrov, snímače

naklonenia, snímače zrýchlenia a ďalšie. O využití metódy rozhoduje prvom rade vyžadovaná presnosť merania, čas potrebný na realizáciu merania (rýchlosť), komplexnosť informácie (3D, 4D), ale aj možnosť automatizácie procesu merania.

Oblasť merania posunov na vodohospodárskych stavbách patrí medzi najkonzervatívnejšie spomedzi všetkých oblastí, kde sa vyžaduje meranie posunov a pretvorení. Príchodom kvalitných a výkonných UMS síce evidujeme nahradenie trigonometrických metód polárnou metódou, aj to však len v polohe (2D) najmä pri meraní posunov priehradných telies alebo iných externých hydrotechnických objektov (odberné objekty, prepady, obtokové kanály, plavebné komory a pod.). Otázka zvislých posunov naďalej zostáva doménou geometrickej nivelácie a naklonenie objektov sa meria prevažovaci. Samostatné meranie a interpretácia vodorovných a zvislých posunov je aj dnes pravidlom, ktoré silne determinuje výber metód na meranie posunov. Vzhľadom na skutočnosť, že veľká väčšina VS bola uvedená do prevádzky pred polstoročím, je logické, že aj metódy využívané na meranie posunov na týchto objektoch zodpovedajú danej dobe. Zotrvanie pri ich využívaní do dnes je často opodstanené najmä z dôvodu zabezpečenia kontinuity meraní a vybudovanými trvalými stabilizáciami a signalizáciami meracích bodov na objektoch.

Na meranie **zvislých posunov** sa najčastejšie používa známa metóda *geometrickej nivelácie* (veľmi presná alebo presná nivelácia). Princíp metódy je všeobecne známy, založený na periodicky sa opakujúcich niveláciách pozorovaných bodov, umiestnených na meranom objekte. Nivelácia sa veľmi zhospodárnila zavedením kompenzátorových nivelačných prístrojov, neskôr digitálnych kompenzátorových nivelačných prístrojov. Nevýhodou kompenzátorových nivelačných prístrojov je, že sú v prostredí s otrasmi nepoužiteľné. Digitálne nivelačné prístroje nie je možné používať v prostredí s umelým osvetlením, resp. sú použiteľné len za podmienky dostatočného osvetlenia latového úseku veľkosti 0,6 až 1,0 m. Pri meraniach sa dodržiava postup geometrickej nivelácie. Pri meraniach realizovaných v obmedzených priestoroch alebo za zvláštnych podmienok (priemyselné haly, priestory) je treba použiť neštandardné postupy (zámery stranou, rozdielne dĺžky zámer a pod.). V takýchto prípadoch zavádzame do výsledkov merania korekcie.

Polárna metóda sa v praxi používa zvyčajne na súčasné meranie zvislých a vodorovných posunov, resp. na zisťovanie priestorových zmien v polohe pozorovaných bodov, a to v relatívnych a absolútnych hodnotách. Zvislé posuny bodov sa určujú zo vzťahných bodov na základe zmeny výškových uhlov, meraných pri základnom a etapovom meraní pozorovaných bodov objektu. Meranie sa vykoná z dvoch, lepšie troch vzťahných bodov – stanovísk prístroja. Aplikácia metódy je limitovaná vzdialenosťou pozorovaných bodov od stanovísk prístrojov a vyžadovanou presnosťou. Pri obvykle vyžadovanej presnosti v určení posunov 1 mm až 2 mm, nesmie vzdialenosť pozorovaných bodov od stanoviska prístroja prekročiť hodnotu prib. 60 m.

Z *fotogrametrických metód* prichádza do úvahy najmä metóda pozemnej fotogrametrie s časovou alebo reálnou priestorovou základnicou. Prednosťou fotogrametrickej metódy je možnosť rýchlo, prakticky súčasne zaregistrovať veľkú množinu pozorovaných bodov objektu na snímke. Nevýhodou fotogrametrickej metódy je, že výsledky merania nie sú hneď k dispozícii, ale až po spracovaní a vyhodnotení snímok. Jej presnosť podstatne závisí od snímkovej mierky a kvality použitých kamier. Novú éru a nevídané možnosti núka využitie metód digitálnej fotogrametrie. Niektoré veľmi úspešné aplikácie na meranie posunov objektov uvádza [1] a [6].

V zahraničí sa na meranie zvislých posunov objektov vo veľkej miere používa elektronická, plne automatizovaná *hydrostatická nivelácia*. V súčasnosti sú známe viaceré technologické variácie využívajúce princíp hydrostatickej nivelácie:

- systémy s priamym čítaním polohy hladiny (s elektronickou dotykovou ihlou, so snímacím zariadením na báze CCD snímačov),
- systémy s nepriamym čítaním polohy hladiny (plavákové systémy).

Metódou hydrostatickej nivelácie je možné určiť prevýšenie, resp. odchýlku od zvislice so strednou chybou 0,01-0,005 mm. Na Slovensku aplikuje hydrostatickú niveláciu Ústav merania SAV v Bratislave [9] na meranie naklonenia reaktorov Atómovej elektrárne v Jaslovských Bohuniciach a v Mochovciach. Výskumný ústav geodetický topografický a kartografický v Zdíboch (Česká republika) vyvinul merací systém HYNI na meranie zvislých posunov turbogenerátorov [15].

Na meranie **naklonenia** objektov sa používajú optické prevažovače, napr. Zeiss PZL100 (Nemecko), Leica ZNL (Švajčiarsko), ktorými je možné dosiahnuť presnosť v určení naklonenia objektov na úrovni 2 mm/ 100 m. Podľa konštrukcie prístroja je možné pri meraní umiestniť prevažovač pod alebo nad pozorovaným bodom. Odklon objektu od zvislého smeru kontrolujeme v dvoch navzájom kolmých smeroch. S prevažovačmi vybavenými s dvojosovým kompenzátorom vykonáme meranie v dvoch polohách prístroja navzájom otočených okolo zvislej osi o 100 gonov. Ak sú prevažovače vybavené jednosovým kompenzátorom je potrebné meranie vykonať v štyroch polohách navzájom otočených okolo zvislej osi o 100 gonov. Podrobnosti uvádza napríklad [6] a prospekty výrobcov geodetických prístrojov.

Na určenie naklonenia objektov sú okrem prevažovačov vhodné aj hydrostatické meracie systémy a prístroje pracujúce na báze kvapalinových, kyvadlových alebo optických snímačov (napr. elektronické libely alebo pendametre). Na meranie naklonenia a relatívnych zvislých posunov stavebných objektov možno úspešne použiť napríklad elektronické libely AE 2 DN (VEB Feinmeswerkzeugfabrik Suhl - Nemecko), Niveltronic (Tesa - Švajčiarsko), Minilevel a Leveltronic (Leica – Švajčiarsko), sklonometry (inklinometre), tenzometre, mikrometre a iné. Relatívne hodnoty posunov možno určovať spravidla s presnosťou 0,1 mm/1 m až 0,01 mm/1 m.

Príčiny **vodorovných posunov** spočívajú v pôsobení vonkajších síl na objekt merania (tlak vetra, vodného stĺpca a pod.). Na meranie vodorovných posunov sa z geodetických metód používajú metóda zámernej priamky, trigonometrická metóda, metóda trilaterácie, metóda polárna, fotogrametrické metódy, TLS, polygonometria a metódy GNSS [6]. Výber metódy je determinovaný najmä vyžadovanou presnosťou, efektivitou a v súčasnosti často aj možnosťou automatizácie procesu merania.

Metóda *zámernej priamky* sa používa na meranie vodorovných posunov pozorovaných bodov. Princíp metódy je všeobecne známy. Metóda je vcelku jednoduchá a rýchla. V praxi sa najčastejšie používa spôsob pomocou posuvného zámerného terča s lineárnym meradielkom alebo spôsob meraním paralaktických uhlov medzi vzt'aznými a pozorovanými bodmi. Presnosť určenia posunov je 0,2 mm až 0,4 mm. Podrobnosti sú v [6]. V posledných rokoch sa na meranie posunov stále častejšie používajú laserové prístroje. Metóda zámernej priamky spojená s optoelektronickým odčítaním laserovej stopy sa stáva výhodnejšou než ostatné geodetické metódy, pretože podstatne skraca čas merania a umožňuje úplnú automatizáciu procesu merania. Presnosť merania sa pohybuje na úrovni 0,1 mm až 0,5 mm.

Trigonometrická metóda je v porovnaní so zámernou priamkou pracnejšia, nákladnejšia a náročnejšia na odbornú úroveň a zručnosť pracovníkov. Má však oproti zámernej priamke výhody v tom, že poskytuje informácie o posune v dvoch, resp. vo viacerých smeroch. Umožňuje určiť posun objektu, resp. jeho častí aj na neprístupných miestach. Na základe mnohých a dlhoročných skúseností s aplikáciou tejto metódy možno očakávať presnosť určenia posunov z intervalu 0,5 mm až 1,0 mm. Rozhodujúcim faktorom pri aplikácii trigonometrickej metódy je tvar a spôsob stabilizácie siete vzťažných bodov, resp. presnosť určenia jej parametrov. Nemenej dôležitá je vzdialenosť vzťažných bodov od objektu merania.

Na meranie posunov s vysokou presnosťou (0,05 mm až 0,3 mm), vyžadovanou najmä v oblasti strojárstva, sa využívajú meracie systémy vybavené špeciálnymi doplnkami (terče, samolepiace fólie, prípravky a pod.) a softvérom. Na dosiahnutie úplnej automatizácie procesu merania a presnosti pod hranicou 0,1 mm sa používajú v špeciálnych prípadoch na meranie dĺžok interferometre. Vznikajú tak dynamické meracie systémy, schopné sledovať cieľ pohybujúci sa v priestore rýchlosťou až $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [3].

Meranie posunov *polárnou metódou* je možné v prípade, ak máme k dispozícii univerzálne stanice s charakteristikami presnosti $\sigma_S = 1+1 \text{ ppm}$ a $\sigma_\alpha = 3''$, a dĺžky zámer nepresiahnu hodnotu 100 m. Pri použití prístroja s motorizovaným pohonom osí (servo pohon) je možné meranie plne automatizovať. Polárna metóda nachádza využitie najmä v oblasti merania posunov menších objektov, resp. konštrukcií.

Princíp *polygonometrickej metódy* merania posunov spočíva v presnom meraní uhlov a dĺžok vhodne umiestneného polygónového ťahu na meranom objekte. Polygónový ťah vedieme po pozorovaných bodoch. Najvhodnejšie sú priame, obojstranne pripojené a orientované polygónové ťahy s rovnakými dĺžkami. Posuny pozorovaných bodov vypočítame z odchýlok vrcholových uhlov a dĺžok, resp. súradníc medzi základným a etapovým meraním. Metódu je možné použiť na meranie vodorovných posunov väčších stavebných objektov, resp. zosuvných území. Presnosť metódy je možné charakterizovať strednou chybou v určení posunov $\sigma_p = 5 \text{ mm}$.

Metódy *GNSS* sú vhodné na meranie posunov v prípade, že je treba určiť posuny s presnosťou $\sigma_p = 5 \text{ mm}$ a časový interval medzi jednotlivými etapami nie je kratší ako 15 až 30 minút. Vzťažné aj pozorované body musia byť umiestnené tak, aby umožňovali observáciu satelitov (vyžaduje sa elevačný uhol 15°). Splnenie tejto podmienky kladie vo väčšine prípadov najväčšie nároky na realizátora meraní. Na druhej strane metódy nevyžadujú zabezpečenie viditeľnosti medzi bodmi. Vypracovaním postupu využívajúceho rádiového spojenia medzi aparatúrami je možné skrátiť interval medzi dvomi observáciami na 1 až 2 minúty. Doba merania je potom závislá na počte meraných bodov, počte aparatúr, ktoré sú k dispozícii a na čase, potrebnom na presun medzi meranými bodmi. Využitie služby *SKPOS* umožňuje výrazným spôsobom zracionalizovať merania metódami GNSS. Využitie služby na určovanie posunov je v súčasnosti predmetom výskumu. Vyžadovanú presnosť je možné dosiahnuť využitím dlhodobých observácií viazaných na najbližší bod siete *SKPOS*.

TLS je najmladšia metóda na zber priestorových (3D) údajov. Systémy pracujú na báze polárnej metódy s odrazom laserového zväzku lúčov od povrchu meraného objektu. Vďaka veľkej rýchlosti merania (dosahujúcej až 500 tisíc bodov/s) je vhodné meranie realizovať nie v konfigurácii množiny vybraných (charakteristických) bodov objektu ale smímaním celej plochy vybranej časti objektu. Vzhľadom na vysoký stupeň automatizácie procesu merania, nie je možné zvyšovať jej presnosť úpravou metodiky. Výrobcovia ponúkajú

v podstate len možnosť zvýšenia hustoty záznamu, prípadne využitie dodatočnej informácie o odrazovosti alebo farebnosti povrchu. Jediný reálny spôsob na zvýšenie presnosti je opakovanie celého merania, čo však je časovo značne máročné a nie vždy realizovateľné. Vo svetle uvedeného je pri plánovaní meraní laserovými skenermi rozhodujúce pre splnenie požiadavky vyžadovanej presnosti výber vhodného skeneru a jeho umiestnenie (výber stanovísk) vzhľadom na objekt merania. Pri využití priameho odrazu zväzku laserových lúčov od povrchu meraného objektu je rozhodujúca intenzita odrazu, ktorá je intenzívne ovplyvnená materiálom na povrchu, jeho štruktúrou, farbou ale často aj vlhkosťou. Práve vlhkosť (stekajúca voda) môže pri meraní VS realizované laserovými skenermi úplne znehodnotiť až znemožniť. Presnosť deklarovaná výrobcami skenerov sa pohybuje v rozmedzí 2 mm až 5 mm v 3D polohe jednotlivých bodov meraných na povrchu objektu. Geometrická presnosť častí povrchu, tvarových charakteristík, rozmerov a pod. môže dosiahnuť úroveň 1 mm v závislosti na podmienkach merania a použitého skeneru. Pri použití odrazových prvkov (terčov, gulí a pod.) dodávaných výrobcami je možné dosiahnuť presnosť v určení polohy ich geometrického stredu 1 mm a lepšiu. V tomto prípade je však meranie realizované v miestach ich umiestnenia na objekte a metodológia merania je takmer zhodá s aplikáciou polárnej metódy s využitím UMS [2].

Prednosťou geodetických metód je, že poskytujú informácie o správaní sa konštrukcií objektov vo všetkých potrebných smeroch v danom čase a to v relatívnych a absolútnych hodnotách. Väčšina geodetických metód však vyžaduje vybudovanie meracích zariadení, ktoré tvoria vzťažné a pozorované body (meračské značky) na objekte v predstihu [6], [7].

4.3 STABILIZÁCIA A SIGNALIZÁCIA BODOV

Na geodetické meranie posunov stavebných objektov je potrebné okrem vybudovania pozorovaných bodov na objektoch vybudovať aj sieť vzťažných bodov, ku ktorým sa vzťahujú výsledky merania posunov pozorovaných bodov objektu. Lokalizácia a stabilizácia vzťažných bodov v priestore staveniska má byť taká, aby stabilita bodov nebola ohrozená stavebnou činnosťou, porastom, neskôr prevádzkou samotného objektu alebo inými vplyvmi na stavenisku. Pri aplikácii metód GNSS je potrebné zabezpečiť voľný priestor nad bodmi s elevačným uhlom 15° vo všetkých smeroch (najmä však južným smerom).

Na stabilizáciu vzťažných bodov sa celkom dobre osvedčila hĺbková stabilizácia betónovými blokmi alebo zavrtanými pažnicami, ktorých zhlavie sa upravujú podľa typu bodu. Hĺbka stabilizácie je minimálne 2,5 m pod úrovňou terénu (na pevnú skalu, resp. až 0,5 m pod hladinu podzemnej vody). Výškové body sa stabilizujú klincovou alebo čapovou značkou. Polohové vzťažné body sa stabilizujú formou oceľových platničiek zabetónovaných v hlave pilierov, resp. pažníc na závislé dostredenie prístroja, resp. terča [6], [9], [12].

Pozorované body na meranie zvislých posunov sa vybudujú v miestach určených projektom merania posunov (v niektorých prípadoch to môže byť určené normou alebo iným predpisom). Na stabilizáciu sa používajú obvykle špeciálne klincové alebo čapové značky [6], [12], ktoré sú vyhotovené z antikorozných materiálov. Počet a rozmiestenie pozorovaných bodov určí projektant, resp. statik. Má byť taký, aby sa mohli spoľahlivo určovať posuny staticky dôležitých základových alebo nosných častí objektu. Body na objektoch musia byť nenápadné, stabilné a lokalizované na objekte tak, aby poskytovali dostatočne presné a objektívne informácie o prebiehajúcom procese pretvorenia meraných konštrukcií objektu [6],

[7]. Pozorované body sa označia a chránia proti zničeniu a poškodeniu krytom (poklopami) [6], [7], [12]. Pozorované body (značky) na meranie posunov trigonometrickou, fotogrametrickou metódou, TLS alebo polárnou metódou je vhodné stabilizovať špeciálnymi terčami umožňujúcimi automatizované vyhodnotenie meraní. Pri aplikácii fotogrametrie alebo TLS môžu vzniknúť situácie, kedy nie potrebné miesta pozorovaných bodov signalizovať. V takýchto prípadoch sa aplikujú osobitné postupy na spracovanie epochových meraní, ktoré zabezpečia určenie posunov a pretvorení v identických miestach na povrchu meraného objektu [2].

V priebehu výstavby sa zvyčajne stanú niektoré body na objektoch neprístupnými alebo sa zničia. V takýchto prípadoch sa vybudujú vo vhodnej dobe iné – náhradné body. Optimálnym riešením by bolo, aby bolo možné merať, najmenej v jednej etape nové body spolu s pôvodnými bodmi. Stabilita vzťahných bodov sa overuje pomocou testovacích štatistických hypotéz.

4.4 HARMONOGRAM MERANÍ A VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV MERANIA

Harmonogram realizácie meraní určuje projekt merania posunov alebo vyplýva z príslušných technických predpisov. Základné meranie treba vykonať v čase, kedy sú osadené všetky meračské značky na objekte [6], [7], [11].

Správnosť výsledkov meraní sa overí na stavenisku ihneď po meraní – kontrolou uzáverov, výpočtom prevýšení a pod. Pri aplikácii metód fotogrametrie a TLS sa snažíme správnosť merania priebežne kontrolovať vizualizáciu záznamu, jeho vybraných parametrov, detailov, rezov a pohľadov. Pri realizácii GNSS meraní plánovaním vopred času realizácie meraní zabezpečíme optimálnu konfiguráciu a počet satelitov nad horizontom. Priebežnou kontrolou záznamu merania zabezpečíme splnenie naplánovaných kvalitatívnych parametrov počas merania, v prípade ich nenaplnení je potrebné meranie na danom bode predĺžiť alebo opakovať v inom čase.

Vyrovnané hodnoty súradníc a výšok (odhad určených parametrov) sa získajú aplikáciou vhodnej odhadovacej procedúry. V geodézii najčastejšie používame procedúry zabezpečujúce optimálny nevychýlený odhad (napríklad metóda najmenších štvorcov), aplikácia ktorých však vyžaduje normálne rozdelenie chýb vo vektore meraných hodnôt. Dôležité je preto overiť rozdelenie chýb (štatistickými testami) a odľahlé merania z procesu spracovania vylúčiť. Po výpočte výškových zmien a posunov pozorovaných bodov sa vykoná rozbor a testovanie presnosti merania. Zväčšovaním sa počtu realizácií pri meraní posunov a skracovaním intervalu medzi etapami, vznikajú veľké súbory meraní obsahujúce veľké množstvo informácií. Novým trendom v oblasti spracovania meraní je prechod od statického modelu (určenie polohy objektu v priestore) k dynamickému modelu, ktorý poskytuje informácie aj o rýchlosti prípadne o zrýchlení meraného objektu [5]. Pri hodnotení výsledkov merania, treba uvážiť všetky vedľajšie faktory, ktoré pôsobia na veľkosť posunov a na presnosť výsledkov merania [4], [6], [7], [9]. Pôsobenie fyzikálnych faktorov (teplota, vlhkosť, tlak, geologické podmienky základovej pôdy a pod.) na objekt merania, vyjadrujeme formuláciou a odhadnutím parametrov fyzikálneho modelu. Na určenie miery vplyvu jednotlivých faktorov na správanie sa objektu, sa využívajú prostriedky viacfaktorovej analýzy. Úspešná aplikácia týchto procedúr predpokladá u geodeta vysokú odbornú erudovanosť a bohaté skúsenosti v oblasti merania posunov a pretvorení.

Spracovanie meraní realizovaných TLS alebo fotogrametrickými metódami vyžaduje osobitný prístup. Vo väčšine prípadov dochádza k tvorbe 3D modelu objektu, jeho povrchu alebo vybraných častí v každej epoche merania posunov. Zo zmeny tvaru modelu, jeho geometrických parametrov sa kvantifikuje veľkosť pretvorenia prípadne jeho posunu. Na tvorbu modelu sa obvykle využívajú algoritmy pracujúce na báze regresných odhadov. Na kvantifikáciu zmeny sa využívajú rozdielové modely, korelačné algoritmy alebo ortogonálne vzdialenosti medzi modelmi a ich časťami. V mnohých prípadoch tieto algoritmy nie sú dodávané výrobcami meracích systémov a je potrebné ich programovať, resp. údaje spracovávať v inom programovom prostredí [2].

Dôležitou otázkou z hľadiska interpretácie posunov a ich presnosti je, či meraním získaný údaj resp. jeho odhad vyjadruje skutočný pohyb, zmenu tvaru objektu alebo jeho konštrukčných častí, alebo ho možno vysvetliť pôsobením chýb merania. Odpoveď na túto otázku má kľúčový význam na analýzu a interpretáciu výsledkov merania a na overenie funkčnej spoľahlivosti a bezpečnosti objektu. Preukázateľnosť určených posunov sa posudzuje na základe vzťahu týchto hodnôt k ich konfidenčnému intervalu. Ak označíme p_x hodnotu posunu a σ_{p_x} strednú chybu posunu, potom pri zvolenom konfidenčnom koeficiente napr. $t = 2,0$ (na hladine významnosti $\alpha = 0,05$) za preukázaný posun s príslušným rizikom považujeme posun, ktorého hodnota prekračuje konfidenčný interval, čiže keď platí

$$|p_x| \geq t \cdot \sigma_{p_x} . \quad (4)$$

Vykonávateľ meraní dokumentuje meraním získané výsledky odovzdaním elaborátu. Elaborát o meraní posunov obsahuje najmä:

- a) čiastkovú (záverečnú) správu o meraní s výpočtami a rozbormi dosiahnutej presnosti, údaje o použitých vzťahných sústavách, použitých metódach a prístrojoch, údaje o fyzikálnych faktoroch prostredia ovplyvňujúcich stabilitu konštrukcií objektu, hodnoty posunov a pod.,
- b) výsledky merania vzhľadom na základnú etapu merania, zostavené číselne a graficky vo vhodnej forme (diagramy, izočiary, časové a polohové grafy a pod.) s vyznačením konfidenčného intervalu, resp. aj prognózy posunov, spolu s ďalšími údajmi určenými projektom merania posunov, ktoré môžu ovplyvniť geologické, geotechnické, statické a geodetické hodnotenie meraných posunov,
- c) geodetickú, geotechnickú a statickú interpretáciu výsledkov merania jednotlivých alebo vybraných bodov a etáp merania – odporúča sa, aby túto analýzu výsledkov merania spracoval kolektív v zložení: projektant stavby, statik, geológ, geodet, prípadne technológ.

5 ZÁVER

Potreba merania posunov stavebných konštrukcií neustále narastá. Zvyšujú sa aj požiadavky na rozsah, obsah a kvalitu merania posunov geodetickými metódami. V budúcnosti treba očakávať, že do oblasti merania posunov preniknú automatizované meracie systémy. Stále dôležitejšou sa stáva otázka optimalizácie procesu merania a spracovania výsledkov. Významný kvalitatívny podiel na meraní posunov bude mať ďalší technologický rozvoj a výsum, ako aj rozvoj metrológie, ktorá tvorí základné predpoklady pre plnenie úloh v oblasti merania posunov stavieb s vyžadovanou kvalitou a efektívnosťou merania. Informácie získané diagnostikou konštrukcií stavebných objektov majú všestranný vedecký, technický a

praktický význam. Poskytujú podklady na hodnotenie technického stavu diagnostikovaných objektov alebo zariadení a vedú k objasneniu vzniku príčin anomálií v správaní sa stavebných objektov.

LITERATÚRA

- [1] Bartoš, P. – Kopáčik, A. – Gregor, V. – Vybíral, P.: Geodetické a fotogrametrické merania pri rekonštrukcii vrát plavebných komôr VD Gabčíkovo. In: I. medzinárodné slovensko-poľsko-české geodetické dni. Žilina 1995, s. 62 – 69.
- [2] Erdélyi, J.: Determination of Bridge Structure Deformation Using TLS. Reports on Geodesy No. 1 (90). s. 115-121. ISSN 0867-3179.
- [3] Kopáčik, A.: Dynamické meracie systémy. Geodetický a kartografický obzor, 38 (80) 1992, č. 9, s. 196 – 200.
- [4] Kopáčik, A. – Talarovič, M. – Hreha, M.: Programy na tvorbu dokumentácie vybraných inžiniersko-geodetických prác. Geodetický a kartografický obzor, 42 (84) 1996, č. 4, s. 68 – 76.
- [5] Lipták, I. - Kopáčik, A.: Frequency analysis of the bridge structure. In *14th FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis : Proceedings. Hong Kong, China, 2. - 4.11.2011.* [CD-ROM]. Hong Kong : Hong Kong Polytechnic University, 2011, 6 ps.
- [6] Michalčák, O. – Vosika, O. – Veselý, M. – Novák, Z.: Inžinierska geodézia I. Bratislava, Alfa 1985, s. 346 – 399.
- [7] Michalčák, O. – Lukáč, Š. – David, M.: Meranie deformácií základov objektov hlavných výrobných blokov jadrovej elektrárne V-1. Geodetický a kartografický obzor, 29 (71), 1983, č. 4, s. 92 – 103.
- [8] Michalčák, O. a iní: Geodetické problémy pri zaťažovacej skúške diaľnično-železničného mosta cez Dunaj v Bratislave. Geodetický a kartografický obzor, 31 (73) 1985, č. 4, s. 103 – 108.
- [9] Michalčák, O.: Poznatky z dlhodobého merania zvislých posunov objektov jadrovej elektrárne. Geodetický a kartografický obzor, 33 (75) 1987, č. 2, s. 48 – 50.
- [10] STN 73 0035 Zaťažovanie konštrukcií pozemných stavieb. 1978.
- [11] STN 73 0405 Meranie posunov stavebných objektov. 1986.
- [12] STN ISO 4463-2 Metódy merania v stavebníctve. Vytyčovanie a meranie. Časť 2: Meračské značky (73 0423). 2001.
- [13] STN 73 2030 Zaťažovacie skúšky stavebných konštrukcií. 1969.
- [14] STN 73 6209 Zaťažovacie skúšky mostov. 1980.

- [15] Automated Measuring & Information System for Vertical Displacements of Machines and Constructions. [Prospekt meracieho systému.] Zdiby, VÚGTK 1994.