

SYSTÉMY NA MERANIE NÁKLONU STAVEBNÝCH OBJEKTOV A TECHNOLOGICKÝCH ZARIADENÍ

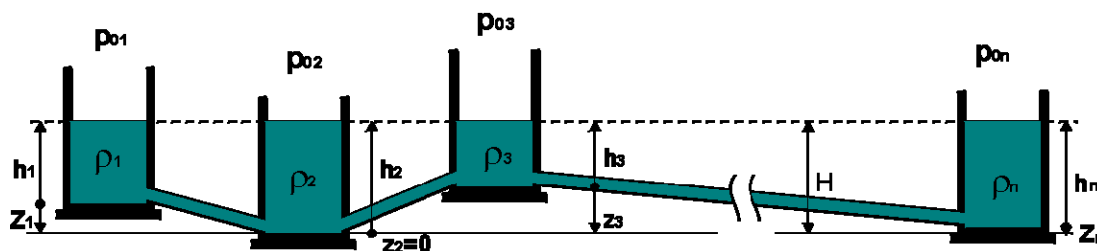
Lubomír Ondriš¹, Dušan Krušínský², Štefan Lukáč³

1 ÚVOD

Znalosť priestorovej polohy rozmernejších stavebných objektov a technologických zariadení počas ich výstavby, výroby, či montáže je častou požiadavkou praxe. Rovnako sa vyžaduje aj dlhodobé meranie priestorovej polohy, resp. náklonu takýchto objektov po ich odovzdaní do používania alebo uvedení do prevádzky. V prípade jadrových elektrární ide vlastne o zachovanie prevádzkovej bezpečnosti jadrových reaktorov typu VVER, pri ktorých sú relatívne prísne požiadavky na dodržanie zvislej polohy nádoby reaktora. V iných prípadoch ide o udržanie funkčnej spôsobilosti stavebných objektov a technologických zariadení. Vhodnými metódami na dlhodobé kontinuálne meranie náklonu objektov sú **hydrostatická nivelácia a pendametria**. Na Ústave merania (ÚM) SAV v spolupráci s Katedrou geodézie Stavebnej fakulty STU bolo navrhnutých a vyvinutých niekoľko generácií takýchto systémov, ktoré sú úspešne inštalované a prevádzkované v jadrových elektrárnach na Slovensku a v Spojenom ústave jadrových výskumov v Dubne (Ruská federácia), na urýchľovači NUCLOTRON. U predmetných meracích systémov bola na zmeranie polohy hladiny kvapaliny v snímačoch pre hydrostatickú niveláciu a polohy vlákna kyvadla v prípade pendametrie použitá optoelektronická meracia metóda s využitím CCD snímačov.

2 HYDROSTATICKÁ NIVELÁCIA

Hydrostatická nivelácia sa zakladá na využití princípu spojených nádob, znázornenom na obr.1.



kde p_{0n} - atmosférický tlak
 ρ_n - hustota kvapaliny

Obr.1 Metóda hydrostatickej nivelácie

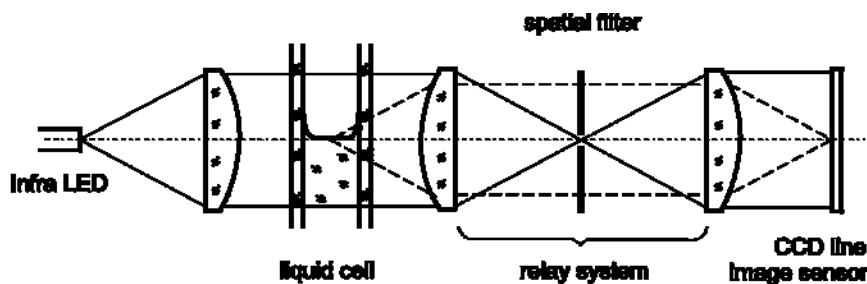
V prípade ak $p_{01} = p_{02} = \dots = p_{0n}$ a $\rho_1 = \rho_2 = \dots = \rho_n$, potom hladiny kvapaliny v nádobách ležia v jednej vodorovnej rovine a je ich možné použiť ako referenčnú rovinu na

¹ Ing. Lubomír Ondriš, PhD., Ústav merania SAV, e-mail: Lubomir.Ondris@savba.sk

² Ing. Dušan Krušínský, Ústav merania SAV, e-mail: umerkrus@savba.sk

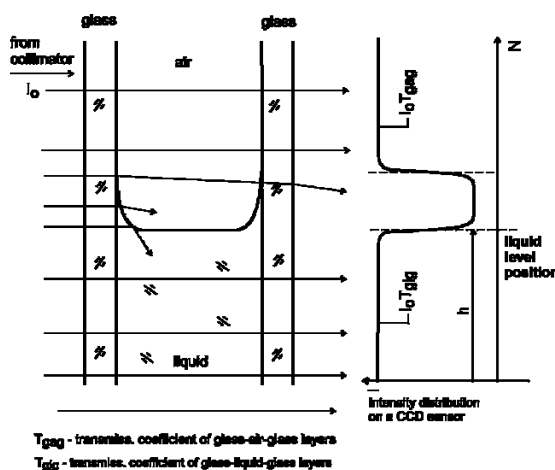
³ Ing. Štefan Lukáč, Katedra geodézie SvF STU Bratislava, e-mail: stefan.lukac@stuba.sk

meranie výškových rozdielov bodov, na ktorých sú položené snímače. Meranie výškových rozdielov bodov sa takto transformuje na meranie výšky kvapaliny v snímačoch. Na tento účel je možné použiť celý rad metód. V ÚM SAV boli do štádia realizácie dovedené elektromechanická metóda a optoelektronická metóda. Princíp optoelektronickej metódy je znázornený na obr.2. Nádoby s kvapalinou, ktoré sú súčasťou systému spojených nádob majú sklenené bočné steny, sú presvecované paralelným svetelným zväzkom. Svetelný profil, ktorý vznikne za touto nádobou sa prenáša cez zobrazovaciu sústavu na CCD senzor.



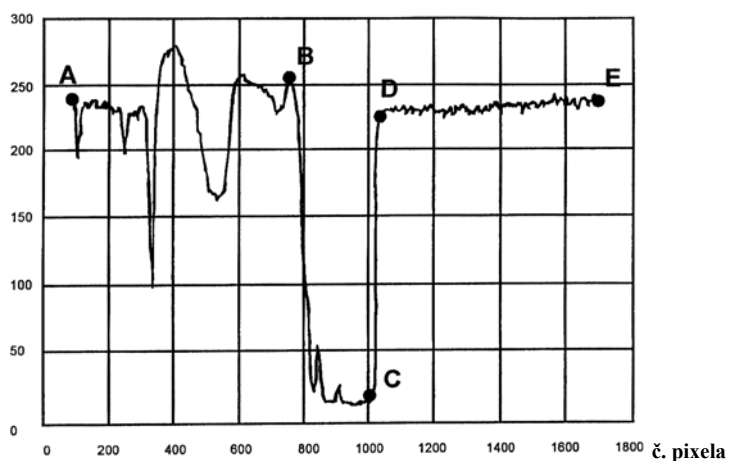
Obr.2 Princíp optoelektronickej metódy

V dôsledku refrakcie a reflexie svetla na menisku, vytvorenom pri styku kvapaliny so stenami nádoby vzniká za nádobou v mieste hladiny pokles intenzity svetla. Svetelný profil, ktorý vznikne za touto nádobou sa prenáša cez zobrazovaciu sústavu na CCD senzor. Výstupný signál CCD senzora sa digitalizuje a následne prenáša do počítača na ďalšie spracovanie a výpočet polohy hladiny kvapaliny.



Obr.3 Prechod paralelného svetelného zväzku cez nádobu senzora

Nameraný svetelný profil je dokumentovaný na obr.4. Časť svetelného profilu medzi bodmi C a D zodpovedá polohe hladiny kvapaliny.

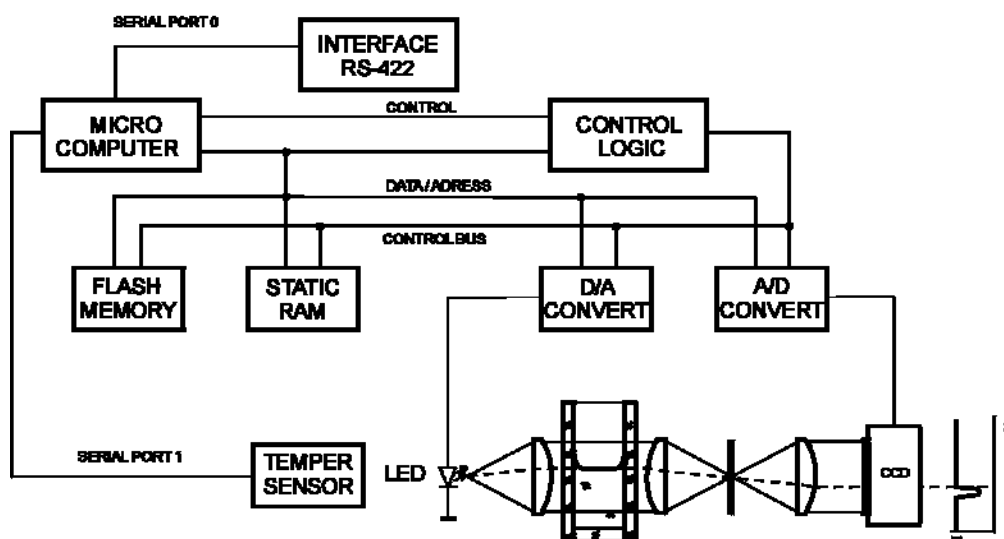


Obr.4 Nameraný priebeh osvetlenia CCD senzora.

Na zvýšenie rozlišovacej schopnosti a presnosti merania je táto časť priebehu osvetlenia nahradená parametrickou funkciou a výška hladiny kvapaliny zodpovedá inflexnému bodu tejto funkcie. Pre lepšiu aproximáciu nameranej krivky pri výpočte je použitý Marquard-Levenbergov algoritmus. Určenie polohy hladiny z nameraného priebehu pomocou tejto metódy je lepšie ako 0,1 vzdialenosti medzi susednými pixelami CCD senzora. Táto vzdialenosť je v nami použitých CCD senzoch obvykle 14 μm .

Bloková schéma snímača pre hydrostatickú niveláciu je uvedená na obr. 5. Činnosť snímača je riadená mikropočítačom. Funkcie vykonávané snímačom sú nasledovné:

- riadenie zdroja osvetlenia ,
- riadenie činnosti CCD snímača,
- meranie svetelného profilu,
- uloženie nameraných údajov do lokálnej pamäte,

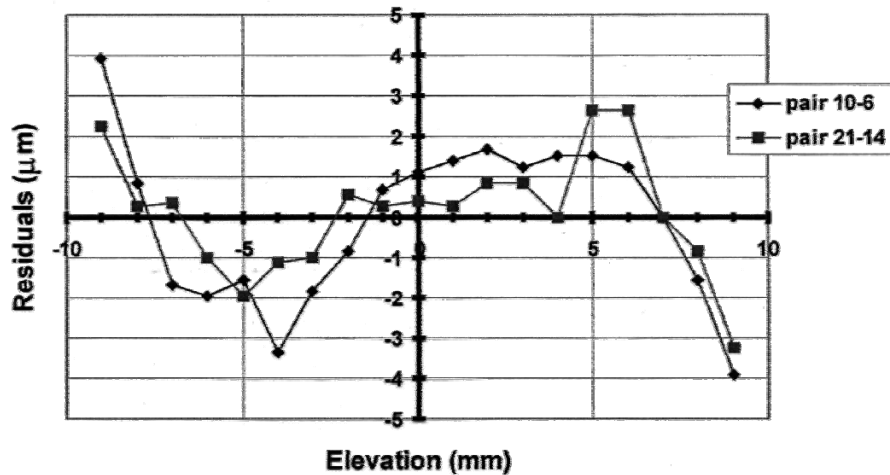


Obr.5 Bloková schéma snímača pre hydrostatickú niveláciu

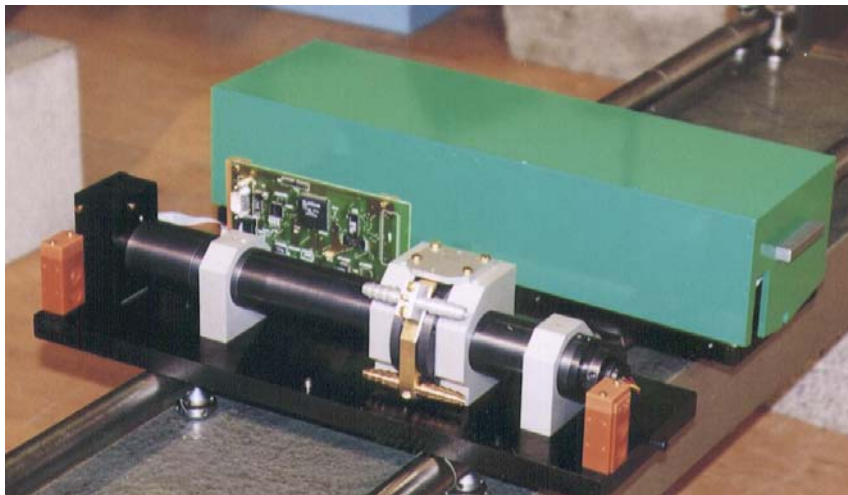
- meranie teploty,

- komunikácia s meracím počítačom.

Pre ilustráciu presnosti systému uvádzame na obr.6 kalibračné krivky dvoch dvojíc snímačov pre hydrostatickú niveláciu. Presnosť merania v rozsahu -10 mm až $+10$ mm je lepšia ako ± 5 μm .



Obr.6 Kalibračné krivky dvojíc snímačov pre hydrostatickú niveláciu



Obr.7 Snímač pre hydrostatickú niveláciu.

Ako je zrejmé z predchádzajúceho textu, na ustálenie hladín v snímačoch do jednej vodorovnej roviny, má vplyv rovnakosť atmosférického tlaku nad hladinami kvapaliny v snímačoch a tiež rovnaká hustota kvapaliny v snímačoch. Prvá podmienka je v systéme splnená tým, že uzatvorené priestory nad hladinou v snímačoch sú všetky vzájomne prepojené a tento spoločný priestor je prepojený na atmosférický tlak na jednom mieste. V

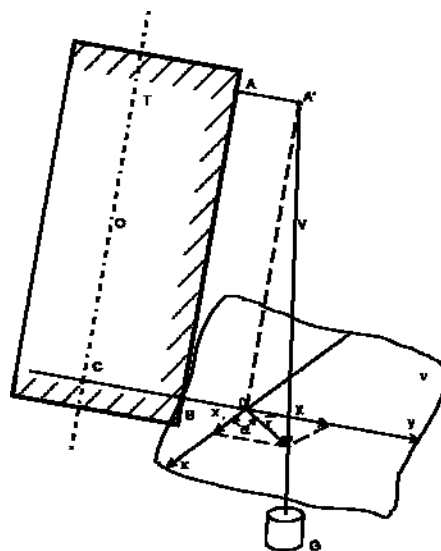
celom systéme je použitá jedna kvapalina a tak jej hustota v jednotlivých snímačoch závisí iba od jej teploty. Keďže rovnakosť teplôt kvapaliny vo všetkých snímačoch nie je jednoduché zabezpečiť, na odstránenie vplyvu nerovnakých hustôt kvapaliny v snímačoch meriame jej teplotu a výsledky merania prevýšení korigujeme na tepelnú rozťažnosť kvapaliny. Základné parametre hydrostatickej nivelácie:

počet snímačov: 3
 merací rozsah: ± 10 mm
 presnosť merania: ± 5 μ m
 rozlíšenie merania: cca 1 μ m

Na určenie náklonu reaktora je potrebné merať vzájomné prevýšenia v troch bodoch objektu reaktora. Týmito bodmi sa preloží rovina a vypočíta sa jej náklon. Počet snímačov je možné pri iných objektoch a zariadeniach meniť, resp. zvýšiť podľa potreby. Obdobne aj merací rozsah je možné v obmedzených hraniciach pri vývoji a konštrukcii meracieho systému upraviť podľa projektom predpokladaných posunov.

3 PENDAMETRIA

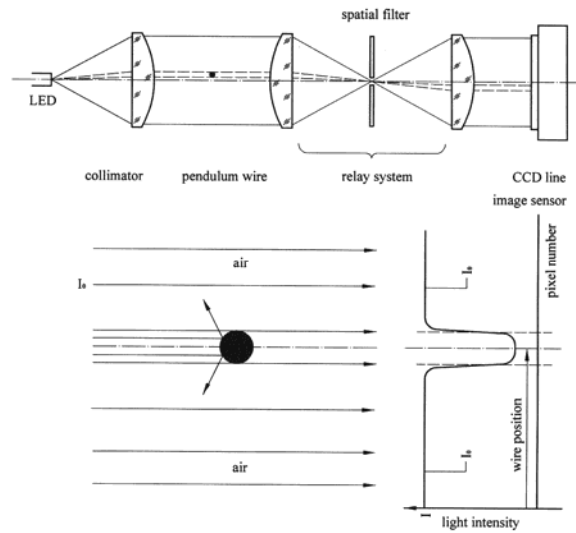
Táto meracia metóda je založená na meraní polohy vlákna zatlmeného kyvadla z dvoch kolmých smerov v horizontálnej referenčnej rovine. Pre tento účel je možné použiť praktický identickú optoelektronickú metódu. Kyvadlo je zavesené na meraný objekt, ako je to ukázané na obr.8, pričom dĺžka vlákna nemusí byť zhodná s výškou objektu, ale je výrazne kratšia. V prípade reaktorov jadrových elektrární táto dĺžka vlákna predstavuje 2 m.



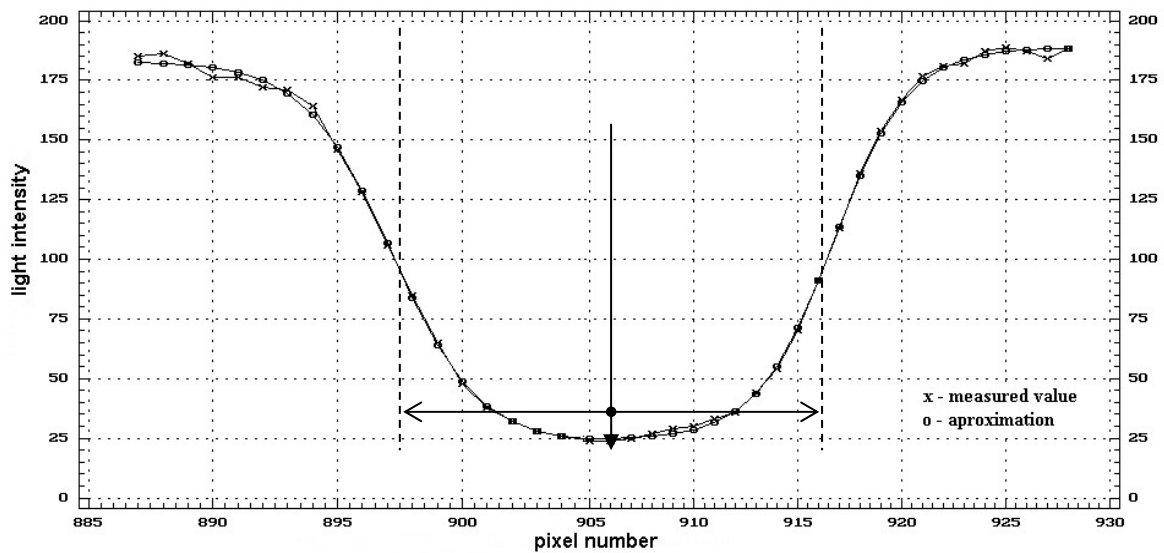
Obr.8 Princíp pendametrie

Na obr.9 je ukázané meranie polohy vlákna optoelektronickou metódou v jednej súradnicovej osi vrátane nameraného priebehu osvetlenia CCD senzora. Na určenie polohy vlákna je v tomto prípade potrebná regresia oboch náklonov nameraného svetelného profilu a určenie polohy ich inflexných bodov. Poloha vlákna je v strede medzi nimi - obr. 10. Poloha vlákna

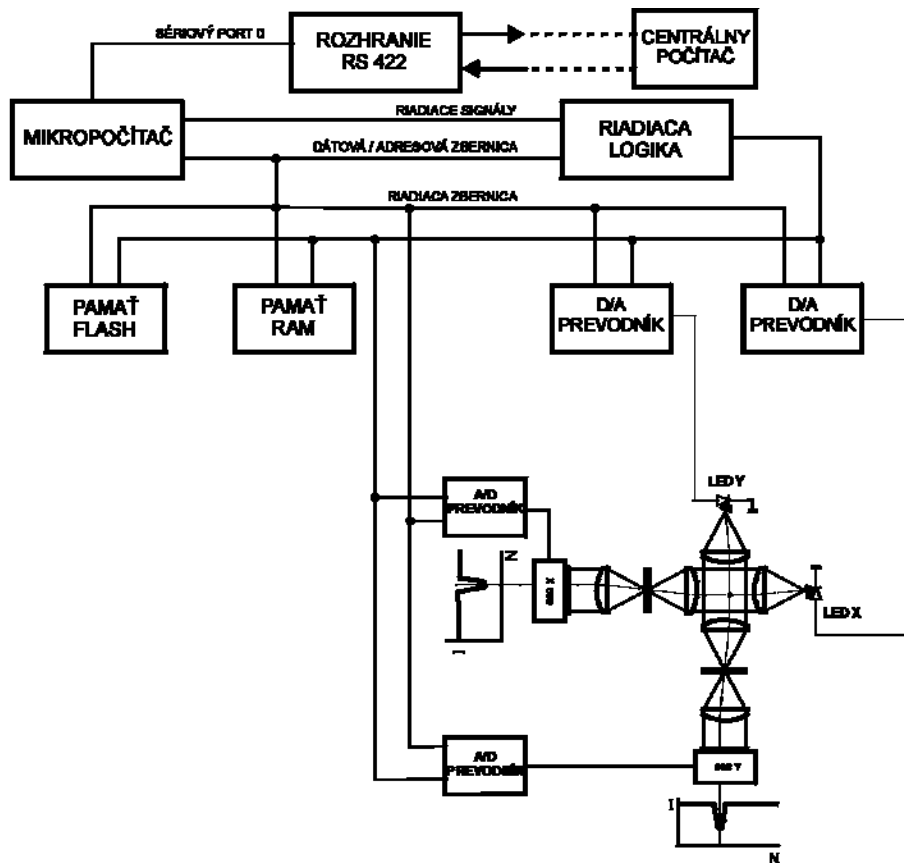
v druhej súradnicovej osi sa určí takou istou metódou. Spôsob určenia náklonu je zrejмый z obr.8.



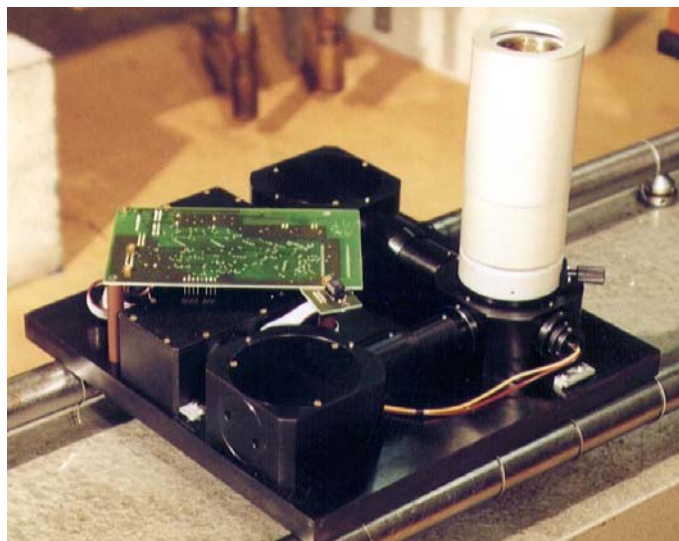
Obr.9. Prechod paralelného svetelného zväzku cez merací priestor pendametrického snímača s vláknom kyvadla



Obr.10 Určenie polohy vlákna v jednej súradnicovej osi.



Obr.11 Bloková schéma pendametrického snímača



Obr.12 Pendametrický snímač

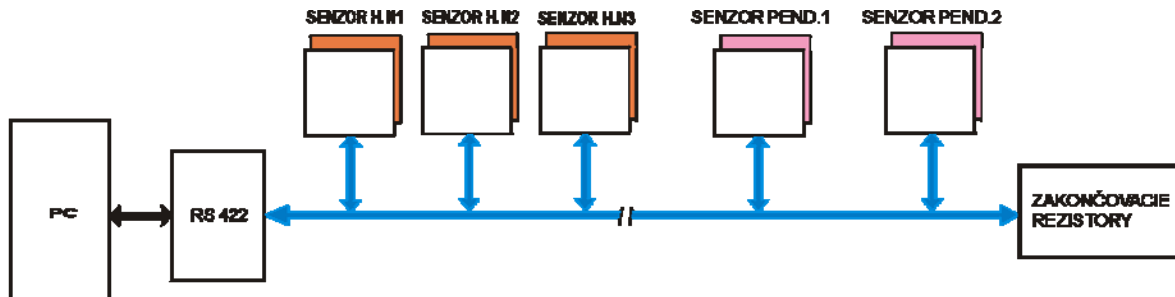
Základné parametre pendametrie:

počet snímačov: 2
 merací rozsah: ± 2 mm
 presnosť merania: $1 \mu\text{m}$
 rozlíšenie merania: $0.1 \mu\text{m}$

Merací rozsah pendametrického systému je možné pri vývoji a konštrukcii systému upraviť v obmedzených hraniciach pre konkrétny objekt, či technologické zariadenie v zmysle predpokladaných posunov, uvedených v projekte merania posunov.

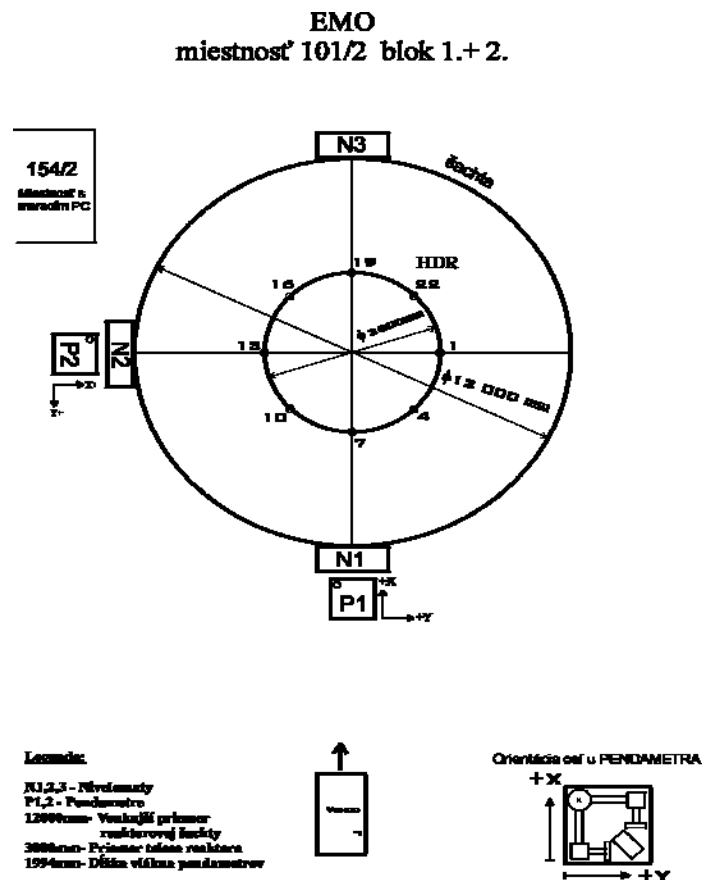
4 KONFIGURÁCIA MERACIEHO SYSTÉMU

Na zvýšenie vierohodnosti a spoľahlivosti meraní sú v systéme integrované obe vyššie popísané meracie metódy. Takáto redundancia umožňuje získať viac informácií o vlastnostiach meraného objektu, pretože tento nemusí byť monolitický tuhým telesom. Popisovaný systém je schématicky zobrazený na obr. 13. Ako bolo už spomenuté systém má tri snímače pre hydrostatickú niveláciu. Do hydraulického obvodu je pripojená aj vyrovnávacia nádoba. Systém obsahuje tiež dva dvojsové pendametrické snímače. Ako riadiaci, merací a vyhodnocovací počítač je použitý priemyselný PC, ktorý je spravidla umiestnený v riadiacom centre (vo veľine) jadrovej elektrárne.



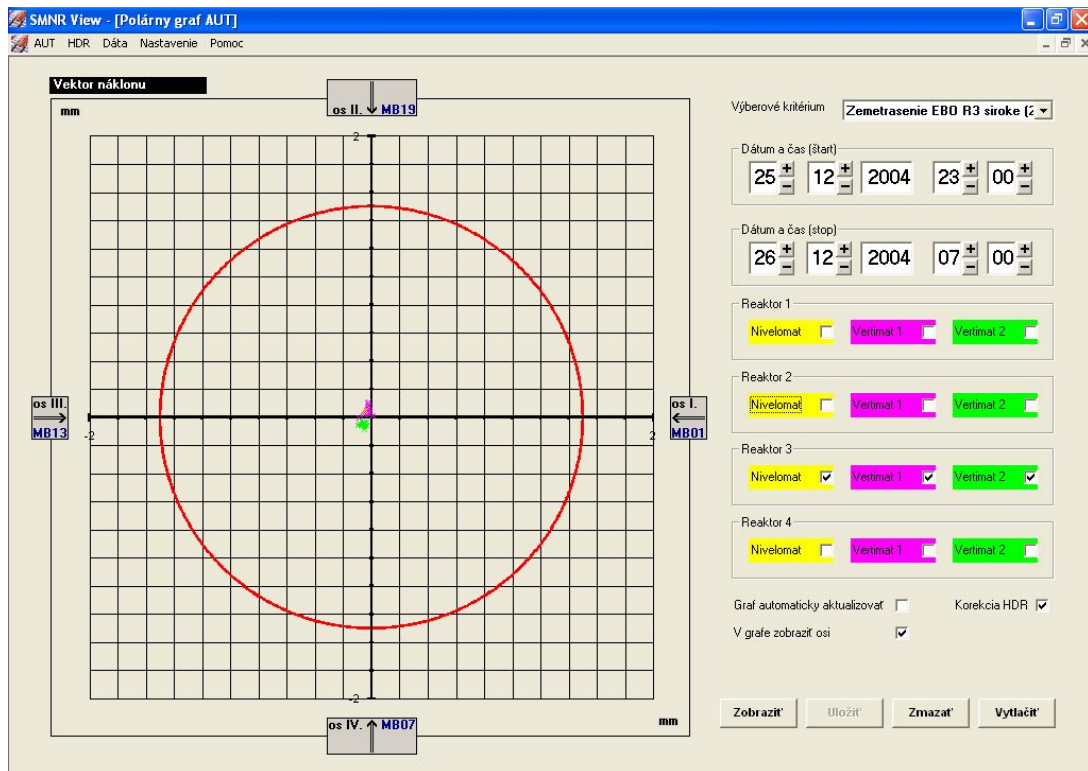
Obr. 13 Konfigurácia systému na meranie náklonu jadrových reaktorov

Snímače systému sú namontované na šachte reaktora podľa obr.14

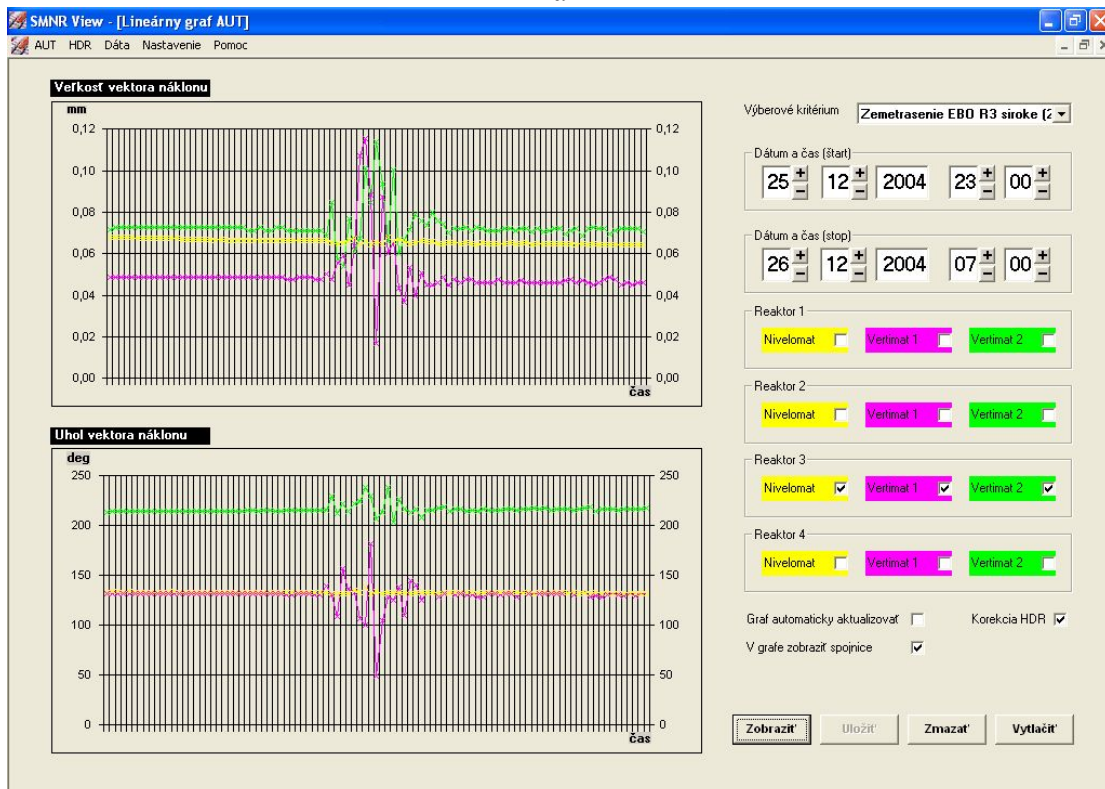


Obr.14 Umiestnenie snímačov meracieho systému na šachte reaktora

Systém meria náклон reaktora prakticky nepretržite, pričom periodicita meraní je 5 min. Výsledky merania sú prístupné vo forme polárneho (vektorového), alebo lineárneho grafu, resp. v tabuľkovej forme.



a



b

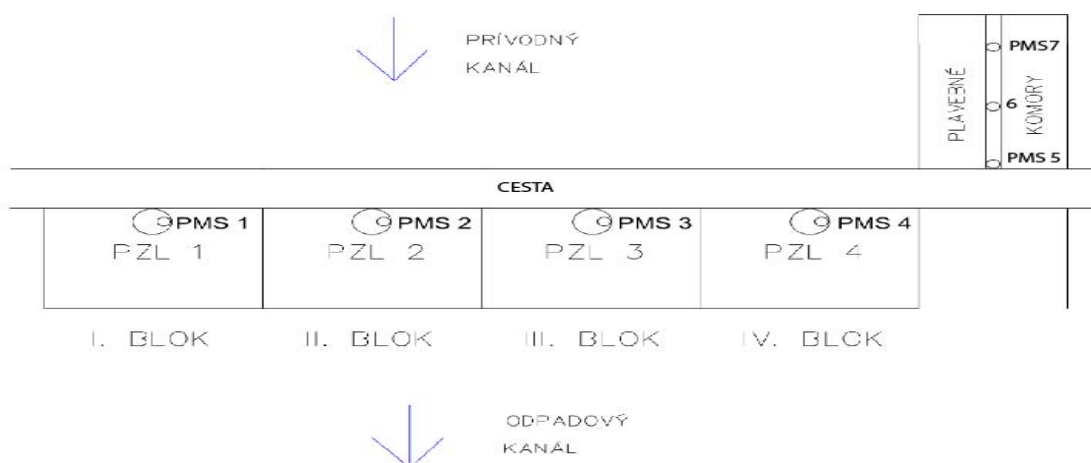
Obr.15 Namerané hodnoty náklonu vo forme polárneho (a) a lineárneho (b) grafu

5 MOŽNOSTI VYUŽITIA SYSTÉMOV NA VODNÝCH STAVBÁCH

V sedemdesiatych rokoch minulého storočia boli postupne na vodných stavbách I. kategórie v ČSFR vybudované meracie zariadenia na kontrolu zvislosti, resp. meranie náklonu objektov prístrojom Zeiss PZL 100, čo bol na tú dobu presný optický prevažovač s presnosťou určenia náklonu (/udanou výrobcom) 1 mm na 100 m výšky. Skutočná presnosť tohto prístroja je však na 100 m len okolo 2-3 mm. Tento prístroj sa v predmetnom období veľmi dobre uplatnil a úspešne využíval po desaťročia a využíva až dodnes. Avšak vzhľadom na starnutie priehrad a dlhoročnú prevádzku mnohých vodných stavieb je meranie týmto prístrojom veľmi sťažené až znemožnené presakujúcou vodou z nádrží.

Vzhľadom na nové trendy vo vývoji prístrojovej a spracovateľskej techniky na meranie posunov sa vo svete na vodných stavbách I. kategórie čoraz viac využívajú automatizované a motorizované meracie systémy, vybavené predovšetkým elektronickými prvkami, CCD snímačmi, prenosom elektrických impulzov a odčítacími zariadeniami s automatickým záznamom, umožňujúcim kontinuálne meranie posunov. Z uvedeného dôvodu by bolo vhodné, resp. žiaduce aj na vodných stavbách I. kategórie na Slovensku využiť a inštalovať takéto meracie systémy (hlavne pendametrické), navyše keď sú úspešne uplatňované na iných stavbách a technologických zariadeniach.

Preto navrhujeme, aby sa správcovia vodných stavieb zaoberali aj touto myšlienkou a pokúsili sa prostredníctvom svojich nadriadených presvedčiť vedenie SVP, š.p., resp. vedenie rezortu ministerstva o zavedení takýchto meracích systémov do praxe aspoň na najdôležitejších vodných stavbách v Slovenskej republike. Podľa nášho názoru a presvedčenia má zavedenie predmetných systémov ideálne uplatnenie na VD Gabčíkovo, kde by mohlo nahradiť štvoricu meracích zariadení pre prístroj PZL 100, ktoré sú umiestnené v každom zo štvorice dilatačných blokov stupňa Gabčíkovo – obr. 16. Uplatnenie pendametrických meracích systémov by bolo potrebné aj na objekte plavebných komôr, kde pri napúšťaní a vypúšťaní vody dochádza okrem iného aj k značným vodorovným a zvislým posunom a teda aj k náklonu deliaceho múra medzi plavebnými komorami (rádovo v desiatkách mm).



Obr. 16 Situácia rozmiestnenia meracích zariadení na meranie náklonu v jednotlivých dilatačných blokoch a plavebných komorách stupňa Gabčíkovo

6 ZÁVER

Predstavené meracie systémy sú nainštalované na všetkých prevádzkovaných reaktoroch v JE Bohunice a JE Mochovce už cca 15 rokov a bezproblémovo merajú náklon jednotlivých reaktorov. Tieto meracie systémy ÚM SAV získali v roku 2005 ocenenie Slovak Gold. Citlivosť uvedených meracích zariadení je možné demonštrovať na lineárnom grafe, prezentovanom na obr.15 b, kde bol zaznamenaný aj vplyv zemetrasenia v juhovýchodnej Ázii dňa: 24.12.2004 na jeden z reaktorov JE Bohunice.

Prednosťou predmetných meracích systémov merania náklonu stavebných objektov a technologických zariadení je prakticky kontinuálne monitorovanie prevádzkovej polohy objektov a jej počítačové vyhodnotenie, komfortná prezentácia a dlhodobá archivácia nameraných údajov. Doposiaľ meraný náklon vodných stavieb klasickou metódou prístrojom Zeiss PZL 100 je realizovaný v zmysle etapových meraní raz ročne. Pritom nevieme posúdiť ako sa chová vodná stavba, či priehrada medzi dvoma ročnými etapami merania. Predstavené meracie systémy tento nedostatok samozrejme odstraňujú a poskytujú vierohodný obraz o náklone vodnej stavby v priebehu celého roka. V takto určenom náklone sú zohľadnené, resp. premietnuté všetky ovplyvňujúce faktory merania (poveternostné podmienky, výška hladiny vody v nádrži, prevádzka elektrárne, atď.).

LITERATÚRA

- [1] BUJUKJAN,S.- VASJUTINSKIJ, I.: Videomeasuring Hydrostatic System. TS 22 Surveying in Industry and Construction. Working Week FIG, Paris 2003.
- [2] ONDRIŠ. L. a i.: An Optoelectronic Hydrolevelling System, Meas.Sci. Technol 1994. 5, pp. 1287 -1293.
- [3] ONDRIŠ. L. a i.: A Hydrolevelling System With Distributed Inteligence for the Nuclotron Accelerator, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 411, 1998, pp. 513-522
- [4] LUKÁČ,Š.: Modernizácia meracích zariadení a metód merania ako záruka bezpečnosti priehrad. In: Starnutie priehrad a hrádzí, vplyv na bezpečnosť a povodňovú ochranu.. Liptovská Mara, Slovenská vodohospodárska spoločnosť 2000. s.37-42.
- [5] ONDRIŠ,L.-RUSINA,V.-BUZASI,J.-TRUTZ,M.-PASKALA,M.-LUKÁČ,Š.-ŠKRABÁLEK,M.: Tilting at pressure vessels. In: Nuclear Engineering International. ISSN-0029-5507. Vol.50. No 609 (2005). s.14-17.