

## AUTOMATIZACE MĚŘENÍ PŘI STATICKÝCH ZATĚŽOVACÍCH ZKOUŠKÁCH MOSTŮ

Doc. Ing. V. Havlůj, CSc., Stavební fakulta ČVUT Praha

Ing. J. Kubeš, CSc., TZÚS Praha, pracoviště 04, Teplice

Ing. M. Pícek, TZÚS Praha

Ing. L. Bartoušek, TZÚS Praha

Ing. J. Záruba, CSc., Stavební ústav ČVUT Praha

Každá stavební konstrukce je komplexním dílem teoretiků, konstruktérů, technologů a dělníků. Její kvalita a užité vlastnosti jsou závislé na úrovni jednotlivých etap jejího vzniku. V tomto procesu je obvykle nutná celá řada kompromisů a zjednodušení, které lze jen obtížně postihnout předomem. Z tohoto hlediska je nezbytnou součástí zrodu konstrukce i experimentální ověřování užitečných vlastností konstrukcí jako celku nebo alespoň některých jejích významných dílů. Jeho smyslem je posoudit vliv kompromisů a zjednodušení na kvalitu konstrukce.

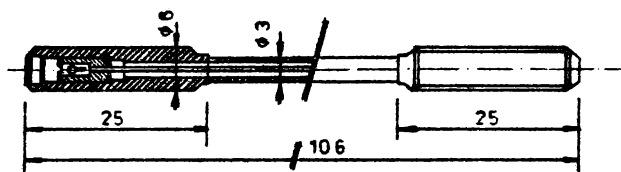
Experimentální ověřování vlastností konstrukcí je značně náročné a nákladné. V dnešní době nástupu elektroniky do všech oborů lidské činnosti je možné některé postupy měření při experimentech plně automatizovat, a tím je do značné míry zefektivnit.

Příkladem je automatizovaný systém, který vznikl příkladnou spoluprací stavební fakulty ČVUT Praha, Stavebního ústavu ČVUT Praha, TZÚS, pracoviště 04, Teplice v Čechách a TZÚS VAS Praha. Tento systém byl vyvinut pro měření posunů pomocí potenciometrických snímačů dráhy a pro měření poměrných deformací. Metodika měření posunů byla publikována v [6,7,8,9], a proto se v tomto příspěvku soustředíme na metodiku měření poměrných deformací.

Na základě dlouholetých zkušeností s různými metodami měření poměrných deformací při zatěžovacích zkouškách nejrozličnějších konstrukcí dospěl kolektiv pracovníků uvedených organizací k závěru, že v tomto oboru je perspektivní metoda strunové tenzometrie. Strunové tenzometry se již delší

dobu úspěšně používají pro různá měření v laboratorních podmínkách i přímo na stavebních konstrukcích. Existuje celá řada více či méně úspěšných konstrukcí tenzometrů, z nichž některé byly nebo dokonce jsou průmyslově vyráběny. Velmi pokročilou konstrukci tenzometru vyvinul Ing. Jan Záruba, CSc. ze Stavebního ústavu ČVUT Praha. Tato konstrukce tvoří základní prvek dále popisovaného automatizovaného systému.

Automatizace postupu měření a vyhodnocování výsledků umožnila nový přístup nejen k vlastnostem strunových tenzometrů, ale i k samotné metodice měření. Je nutno zdůraznit, že popisovaný automatizovaný systém je sestaven výlučně z domácích součástek. V současné době žádná firma na světě nevyrábí obdobný automatizovaný systém.



Obr. 1. STRUNOVÝ TENZOMETR

#### Metodika měření poměrných deformací strunovými tenzometry upravenými pro automatizovaný systém

Dosavadní způsob měření poměrných deformací pomocí strunových tenzometrů využívá jako základní měřicí element příčně kmitající strunu (umístěnou ve strunovém tenzometru), pevně spojenou s objektem. Deformace objektu se přenáší na strunu a transformuje se na změnu frekvence jejich kmitů.

Změna frekvence je tedy nositelem informace o stavu deformace měřené konstrukce. Obecně se deformace skládá ze složky vyvolané zatížením a ze složky vyvolané teplotními změnami, přičemž složka deformace vyvolaná teplotními změnami je příčinou chyby ve výsledcích měření.

Tato chyba se dosud kompenzovala tak, že po celou dobu měření se sledovala referenční frekvence struny ve strunovém tenzometru umístěném na kompenzačním tělese ze stejného materiálu jako měřená konstrukce. Kompenzační těleso bylo umístěno v bezprostřední blízkosti konstrukce, tedy do stejných teplotních podmínek, ale mimo vliv zatížení.

Případná změna teploty během měření tedy nutně vyvolá změnu referenční frekvence struny ve strunovém tenzometru umístěném na kompenzačním tělese. Velikost změny této frekvence je podkladem pro vyloučení nežádoucí složky měřených deformací způsobených změnami teploty z výsledků měření takto:

$$\Delta \epsilon = [c_a(f_{ai}^2 - f_{ao}^2) + b_a(f_{ai} - f_{ao})] - [c_k(f_{ki}^2 - f_{ko}^2) + b_k(f_{ki} - f_{ko})] \quad (1)$$

kde  $\Delta \epsilon$  je teplotně kompenzovaná poměrná deformace,

$c_a; b_a$  - konstanty aktivního snímače,

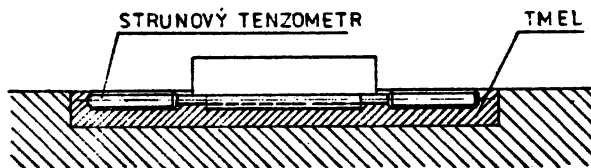
$f_{ai}$  - frekvence aktivního snímače v libovolné době měření,

$f_{ao}$  - frekvence aktivního snímače na začátku měření,

$c_k; b_k$  - konstanty kompenzačního snímače,

$f_{ki}$  - frekvence kompenzačního snímače v odpovídající době měření,

$f_{ko}$  - frekvence kompenzačního snímače na začátku měření.



OBR. 3. UCHYCENÍ STRUNOVÉHO TENZOMETRU NA MĚŘENOU KONSTRUKCI ZATMELNĚNÍM

Pro každé místo, kde je umístěn měřicí strunový tenzometr, mělo by být v těsné blízkosti jedno kompenzační těleso, aby byl zaručen požadavek stejných teplotních podmínek. Při měření velkých stavebních konstrukcí, zejména mostů, bývá nutno aplikovat značný počet měřicích strunových tenzometrů a teoretický požadavek jednoho kompenzačního tělesa pro každý měřicí strunový tenzometr nelze dodržet. V současné praxi se jedno kompenzační těleso používá pro určitou skupinu strunových tenzometrů, které bývají více či méně vzdáleny. Vlivem proudění vzduchu, osluněním a dalšími nerovnoměrnostmi (tedy dynamikou teplot) vznikají jisté rozdíly v teplotních podmínkách měřicích snímačů a k nim příslušného kompenzačního tělesa. Tyto rozdíly způsobují nedostatky v kompenzaci, i když jsou dodrženy podmínky pro měření stanovené ČSN 73 2030.

V automatizovaném systému je možno nedostatky omezit tak, že každý měřicí strunový tenzometr na měřeném objektu je párován s teplotním snímačem, který je instalován v jeho těsné blízkosti ve společné elektronické části. Jsou zde jednak obvody zajišťující rozkmitání struny ve strunovém tenzometru, jednak obvody oscilátoru, jehož kmitočet je závislý na teplotě teplotních snímačů. Stejný teplotní snímač je umístěn i na kompenzačním tělese. Dojde-li během měření ke změně teplotních podmínek měřicího strunového tenzometru vzhledem k teplotním podmínkám kompenzačního tělesa, údaje příslušných teplotních snímačů lze použít ke korekci tohoto jevu:

$$K_T = \frac{T_{ai} - T_{ao}}{T_{ki} - T_{ao}} \quad (2)$$

kde  $K_T$  je součinitel teplotní korekce,

$T_{ai}$  - teplota konstrukce v místě aktivního snímače v libovolné době měření,

$T_{ao}$  - teplota konstrukce v místě aktivního snímače na začátku měření.

$T_{ki}$  - teplota kompenzačního tělesa v odpovídající době měření,

$T_{ko}$  - teplota kompenzačního tělesa na začátku měření.

Za předpokladu, že:

1.  $T_{ai} \neq T_{ao}$ , tzn., že v místě aktivního snímače skutečně působí vliv změny teploty konstrukce,

2.  $T_{ki} \neq T_{ko}$  (v opačném případě strunový snímač na příslušném kompenzačním tělese nevykazuje žádnou změnu frekvence vlivem změny teploty tohoto tělesa a druhá část rovnice (1)  $c_k(f_{ki}^2 - f_{ko}^2) + b_k(f_{ki} - f_{ko}) = 0$ ) výsledná proměnná deformace je dána rovnicí

$$\Delta \varepsilon = [c_a(f_{ai}^2 - f_{ao}^2) + b_a(f_{ai} - f_{ao})] - k_T [c_k(f_{ki}^2 - f_{ko}^2) + b_k(f_{ki} - f_{ko})] \quad (3)$$

Navržený automatizovaný systém tedy pracuje se známou teplotní kompenzací stejně jako dosud používaná zařízení, ale podstatně omezuje jejich nevýhody tím, že umožňuje vykonat popsanou korekci.

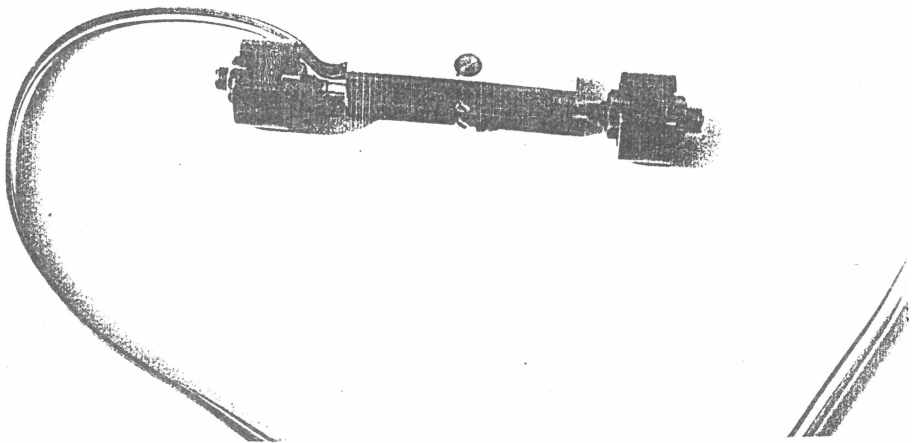
### Použitý strunový tenzometr

Budicí a snímací cívky tenzometru (obr. 1) jsou umístěny v pouzdře, které se nasazuje přímo na krycí mosaznou trubičku (obr. 2). Tenzometr se na měřenou konstrukci uchytlí dvěma způsoby:

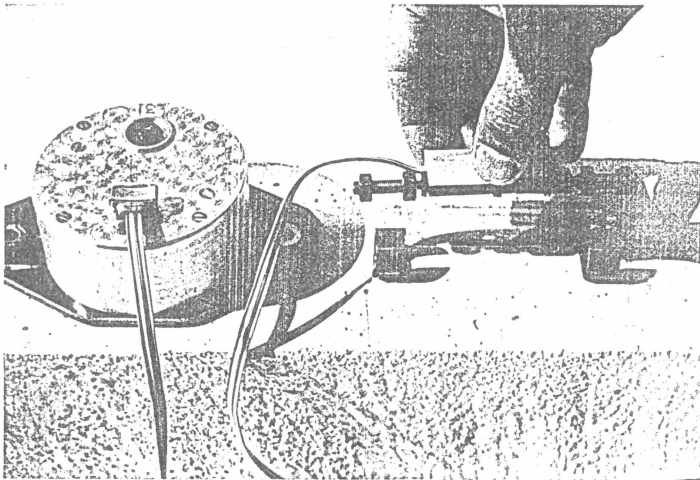
a) zatmelením přímo do připraveného vybrání v konstrukci (obr. 3),

b) na příchytky tmelené ke konstrukci (obr. 4).

Tento způsob uchycení je velmi efektivní a značně snižuje oracnost při přípravě měření.



OBR. 2. UMÍSTĚNÍ BUDÍCÍCH A SNÍMACÍCH CÍVEK V POUZDŘE NASAZENÉM  
PŘÍMO NA MOSAZNOU KRYCÍ TRUBIČKU STRUNOVÉHO TENZOMETRU



OBR. 4. UCHYCENÍ STRUNOVÉHO TENZOMETRU NA MĚŘENOU KONSTRUKCI POMOCÍ  
PŘITMELENÝCH PŘÍCHYTEK

## Elektronika systému

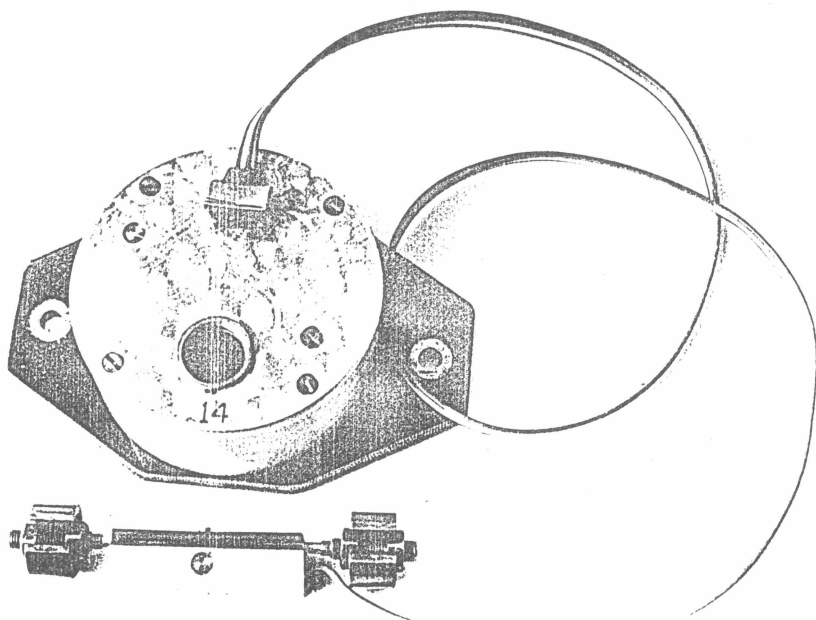
Strunový tenzometr je krátkým kabelem propojen s elektronickou částí snímače (obr. 5), společnou pro strunový tenzometr i polovodičový snímač teploty. Elektronická část je připojena do kruhového pouzdra s izolační základnou, v níž je zabudován snímač teploty. Na měřenou konstrukci se upevňuje obdobně jako strunový tenzometr. Toto uspořádání umožňuje měřit povrchovou teplotu konstrukce v místě upevnění elektronické části, tj. v těsné blízkosti strunového tenzometru. Blokové schéma elektronické části snímače je na obr. 6.

K napnuté struně v krycí trubičce tenzometru je přiložen jednak budicí, jednak zpětnovazební obvod 1. Tyto obvody jsou čtyřdrátově propojeny se zesilovačem 2. Zesilovač se strunovým rezonátorem ve zpětné vazbě tvoří oscilátor, jehož frekvence je dána rezonanční frekvencí struny. Výstupní signál zesilovače 2 je připojen na jeden ze vstupů přepínače 3.

Na druhý vstup přepínače 3 je přiveden výstupní signál zesilovače 5, který je rovněž zapojen jako oscilátor. Jeho kmitočet řídí polovodičový snímač teploty 4.

Výstupní signály obou zesilovačů jsou periodické, obdélníkového tvaru, s frekvencí ovládanou měřenou veličinou. Přepínač těchto signálů 3 je ovládán polaritou napájecího napětí elektroniky snímače, které se přivádí kabelem z napájecího dílu 7. K napájení snímačů je využito napáječe řídicího počítače, samozřejmě přes komutační člen - relé, které ovládá, co má snímač měřit, zda deformaci nebo teplotu.

Výstupní signál z přepínače 3 je upraven a zesílen zesilovačem 6. K propojení elektroniky snímače s ústředním dílem - počítačem - tedy postačí třížilový kabel. V našem případě jsme použili kabel LYS 3x0,75 mm<sup>2</sup> na cívkách v délkách 50 nebo 100 m. Kabeláží je signál veden do měřicího vozu AVIA 30. V tomto voze je umístěna měřicí ústředna pracující na bázi mikropočítačového systému SAPI 1, s využi-



OBR. 5. SPOLEČNÁ ELEKTRONICKÁ ČÁST STRUNOVÉHO TENZOMETRU  
A POLOVODIČOVÉHO SNÍMAČE TEPLoty



vstup vynulovaného čítače 9. Na obr. 9 je ovládací signál vyznačen čárkovaně. Normálová frekvence  $f_N$  je řádově několikanásobně vyšší než frekvence signálu z měřicího systému. Propojením přepínače měřicích míst 2, dalšího přepínače 3 a přednastavitelného čítače 8 se sběrnicí 10 počítače lze programově ovládat přepnutí typu měření, výběr kanálu a dobu, tj. počet period měřeného signálu, po kterou bude procházet normálová frekvence  $f_N$  do čítače 9. Prodlužováním této doby se sice prodlužuje doba měření, současně se však zvyšuje jeho přesnost.

Načítáním daného počtu period výstupního signálu měřicího systému generuje přednastavitelný čítač 8 blokovací signál pro fázovací obvod 5, který rozepne spínače 6 a 7. Současně je generován signál o ukončení měření, který slouží na programové řízení. Počet period normálové frekvence  $f_N$ , načítaný čítačem 9, je předán počítači, který jej matematicky zpracuje buď na hodnotu deformace, jestliže byla měřena frekvence struny, nebo na teplotu, jestliže byla měřena frekvence odpovídající teplotě.

#### **Programové vybavení systému .**

Programové vybavení je orientováno na problematiku měření při statických zatěžovacích zkouškách stavebních konstrukcí. Umožňuje jednak měření délek potenciometrickými snímači, jednak tenzometrická měření strunovými tenzometry.

Je tedy možno volit tyto typy měření:

- měření délek potenciometrickými snímači,
- tenzometrická měření bez kompenzace,
- tenzometrická měření s kompenzačním snímačem a teplotní korekcí,
- měření teplot.

U tenzometrických měření s kompenzací a korekcí celý přepočet probíhá automaticky podle vzorců uvedených v předchozích odstavcích. Jako výchozí veličina pro teplotní korekci je využit údaj z teplotního snímače. Všechny typy měření mohou probíhat současně.

Z hlediska praktického využití systému byl stanoven maximální počet snímačů libovolného typu na 96. S tím souvisí značné nároky na kapacitu operační paměti mikropočítače, kde jsou ve formě tabulek uloženy nejen všechny změřené hodnoty, ale i koeficienty snímačů potřebné pro výpočet hodnot odpovídajících fyzikálních veličin.

Operátor může předem, ale i v průběhu měření měřená místa rozdělit podle požadavků až do deseti samostatných skupin. Každé skupině je v programu přiřazena tabulka, do níž má operátor přístup pomocí klávesnice. Jsou zde obsaženy všechny potřebné informace, zejména:

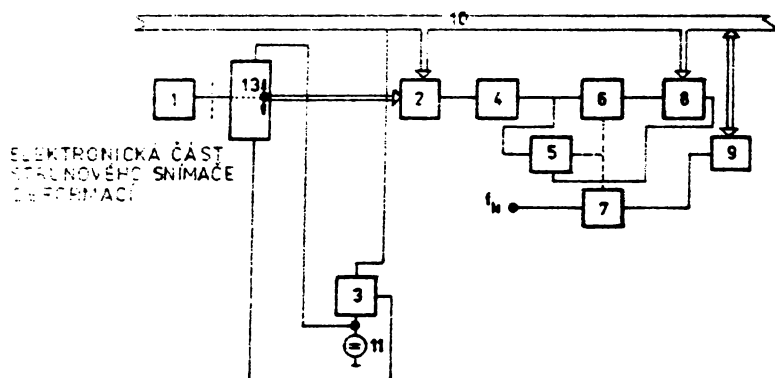
- typ snímače,
- typ měření,
- zda jde o měření při nezatížené nebo odlehčené konstrukci, z čehož vyplývá způsob zpracování,
- zda se má udělat závěrečné vyhodnocení,
- zda skupina má být měřena v zadaných časových intervalech nebo dočasně z měřicího cyklu vyřazena.

Aby měřicí systém pružně reagoval na operátorské zásahy, byl zvolen multiprogramový přístup s postupným přidělováním času resp. časových kvant jednotlivým programům, které však mají společnou datovou bázi.

Časový sled programů řídí jednoduchý operační systém reálného času, který efektivně využívá přerušovaného systému použitého mikropočítače. Jde o tyto programy:

- obsluhu operátorské klávesnice,
- obsluhu hodin reálného času,
- měření (řídí se informacemi v tabulkách přiřazených jednotlivým skupinám snímačů) včetně matematického zpracování a záznamu na magnetickou pásku.

Operátor komunikuje s měřicím systémem způsobem dotaz-odpověď, což podstatně usnadňuje práci a urychluje zácvič obsluhu.



OBR. 9. BLOKOVÉ SCHÉMA ÚSTŘEDNY

## Závěr

Potřeba vyvinout automatizovaný systém měření deformací stavebních konstrukcí vyplynula z rostoucích, starými metodami a zařízeními již nezvládnutelných úkolů, spjatých s ověřováním kvality stavebních prvků a konstrukcí. Stejně významným podnětem pro vývoj tohoto systému byla skutečnost známá z jednání na úrovni RVHP, že takový ani podobný systém se dosud nevyrábí v žádné členské zemi a obdobu nelze najít ani na trzích nesocialistických zemí.

Na vývoj a realizaci systému byly použity vlastní prostředky ČVUT a TZÚS a mohou sloužit jako dobrý příklad týmové spolupráce pracovníků různých organizací a rychlého zavádění poznatků vědy do praxe.

Funkce systému popisovaná v tomto příspěvku zahrnuje všechny známé výhody metody strunové tenzometrie, jako je vysoká stabilita signálu, dobrá citlivost, velká odolnost proti rušivým signálům atd. Možnost automatické teplotní korekce však navíc značně zlepšuje kompenzaci rušivých te-

plotných vlivů na výsledky měření. Úplná automatizace umožňuje efektivní uskutečnění rozsáhlých experimentů. Snadná montáž a jednoduchá kabeláž tenzometrů velmi výrazně přispívá ke snížení pracnosti při experimentech, a tím i k zefektivnění celého procesu ověřování konstrukcí.

## LITERATURA

- 1 PETŘÍK, M. - KRATOCHVÍL, J. - ZÁRUBA, J.: Rozvoj strunové tenzometrie ve stavebnictví. Zpráva SÚ ČVUT 1975
- 2 REKTORYS a kol.: Přehled užité matematiky. SNTL 1968
- 3 ZÁRUBA, J.: Patent č. 188 763 a č. 155 445
- 4 HAVLUJ, V. a kol.: Přihláška vynálezu č. 2404-86; 2405-86; 2406-86
- 5 Firemní literatura Tesla SAPI
- 6 HAVLŮJ, V.: Využití potenciometrů ARIPOT pro měření průhybů při zatěžovacích zkouškách mostů. Sborník konference "Zaťažovacie skúšky mostov". Dům techniky ČSVTS, Žilina 1977
- 7 KUBEŠ, J.: Potenciometrické snímače pro automatizované měření průhybů mostních konstrukcí. Sborník konference "Metrologické problémy ve stavebnictví". Dům techniky ČSVTS Praha 1981
- 8 PICEK, M.: Měřicí ústředna pro automatizované měření průhybů mostních konstrukcí potenciometrickými snímači. Sborník konference "Modernizácia skúšobníctva v stavebníctve". Dom techniky ČSVTS Košice 1982
- 9 KUBEŠ, J. - DOBRÝ, O.: Posuzování statických charakteristik stavebních konstrukcí; mobilní ústředna pro statická měření deformací řízená procesorem JPR 12. Sborník konference "Modernizácia skúšobníctva v stavebníctve". Dom techniky ČSVTS Košice 1982.