



INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2005

NÁRODNÍ KONFERENCE

s mezinárodní účastí

Svratka, Česká republika, 9. - 12. května 2005

LONG-TERM MONITORING OF DYNAMIC RESPONSE OF ENGINEERING STRUCTURES

Ing. Jan Záruba, CSc., Ing. Pavel Štemberk*

Summary: *Object of the contribution is a summary of outlook on topic „Long-term monitoring of dynamic response of engineering structures“. The contribution contains requirements and aspiration which determine contemporary advancement, application fields appropriate for utilization of particular method and specification of availability of technical appointment for realization.*

1. Úvod

Specifikou pozorování dynamické odezvy stavebních konstrukcí je velmi nízké frekvenční pásmo zájmu (zhruba $0,1 \div 500$ Hz) a její většinová aplikační oblast odpovídající podmínkám IN SITU. Pro realizaci experimentů je to potom zejména nejistota okamžiku, kdy k pozorovatelnému jevu dojde, velké rozměry pozorovaného objektu a nejistota vývoje teplotních, vlhkostních a dalších povětrnostních podmínek během pozorování, což je ovšem obecně charakteristické pro experimenty IN SITU.

Navíc, v případě stavebnictví, na zájmové pásmo dynamických pozorování navazuje prakticky plynule zájmové pásmo tepelné a vlhkostní dynamiky stavebních konstrukcí, které má rovněž frekvenční rozsah cca 4 řády ($5 \cdot 10^{-1} - 5 \cdot 10^{-5}$).

Klíčovým problémem experimentální dynamiky, zaměřené na dlouhodobá pozorování změn dynamických vlastností konstrukce a jejího zatížení, je ekonomická reálnost. A to zejména proto, že předpokládaná úroveň dynamického zatížení je u naprosté většiny staveb zlomkem úrovně statického zatížení, takže požadavek dlouhodobého experimentálního dynamického ověřování staveb je zatím výjimečný a tudíž i pořizovací cena spec. tech. vybavení pro experimenty je relativně vysoká.

Význam bezpečnostních dynamických pozorování spočívá především v tom, že jejich relativní citlivost, resp. rozlišovací schopnost určení změn rozsahu poruch je obvykle větší, než lze dosáhnout statickými experimenty, a to zejména při pozorování vnitřních poruch konstrukce, a také v tom, že nabízí možnost testovat stavební konstrukci pozorováním změn odezvy na provozní zatížení (neboli bez potřeby provozní výluky).

*Ing. Jan Záruba-Pfeffermann, Ing. Pavel Štemberk: Kloknerův ústav, České vysoké učení technické v Praze; Šolínova 7, 166 08 Praha 6; tel.: 02-24353524, 02-24353509, fax: 02-24310736; E-Mail: stem@klok.cvut.cz

Z obecnějšího historického pohledu je zřejmé, že pro základní rozvoj experimentální dynamiky byly rozhodující požadavky vzešlé z potřeb strojírenství. Hlavní podíl na rozvoji teoretické dynamiky potom přinesla skutečnost, že teorie elektrických obvodů pracuje s analogickým matematickým aparátem. Stavební dynamika proto v těchto oblastech poznatky a zkušenosti zatím spíše jen přebírá a přizpůsobuje svým potřebám. Od stavebnictví lze ovšem předpokládat, že bude iniciovat rozvojové aktivity v oblastech svých specifických požadavků, což je zejména rozvoj ON LINE pracujících experimentálních systémů v nízkofrekvenční zájmové oblasti a to při extrémních nárocích na frekvenční rozsah vyhodnocení, resp. v oblasti, kterou se tento příspěvek zabývá.

Zejména z ekonomických důvodů je objem dosud realizovaných dlouhodobých dynamických experimentů ve stavebnictví obecně velmi malý, a to i relativně vůči objemu nepochybně užitečných a žádoucích potřeb, které ve stavebnictví průběžně vznikají.

Z obecného pohledu se diskutované a doporučované experimentální metodiky prakticky neliší v požadavcích na výchozí část měřicího řetězce – soubor čidel pozorovaných veličin sloužících pro získání výchozích informací ve formě digitalizovaného signálu vhodného pro dálkový přenos. Vedle požadavků na metrologické parametry se zejména jedná o obdobné požadavky na způsobilost funkce v reálných podmínkách IN SITU, jejich funkční životnost a přiměřenost hmotnosti vlastních čidel a jejich upínacích zařízení hmotnosti měření stavební konstrukce.

2. Přehled metodických přístupů

Základní metodické rozdíly vyplývají z rozdílných cest řešení problému extrémních objemů odečtených informací, posloupnost jejich třídění na cestě k získání požadovaných výstupních informací a formě registrace výstupů pro potřeby další analýzy a jejich praktického využití.

Rozčlenit lze dosud aplikované a pro budoucnost doporučitelné experimentální metodiky dlouhodobého pozorování dynamické odezvy stavební konstrukce následujícím způsobem:

A. Opakované pořizování vzorků průběhu měřených veličin charakterizujících odezvu konstrukce na zvolený podnět

Jedná se o metodiku založenou na prostém opakovaném využití základní varianty dynamických vícekanálových ústředí, jejichž výstupem jsou prosté záznamy průběhů měřených veličin.

Charakter dlouhodobého pozorování (ne jen soubor jednorázových zkoušek) dodává této metodice zejména to, do jaké míry se nám podaří zajistit shodné parametry a funkční vlastnosti měřicího systému (včetně jeho instalace), a to, do jaké míry budou zachovány podmínky a parametry vybuzení konstrukce, jehož odezva je při opakovaných experimentech zajišťována.

Aplikace této metodiky je nejčastěji volena jako orientační měření v situaci, kdy ještě nemáme koncepční představu o tom, co a jakou cestou chceme pozorováním dynamické odezvy zjistit nebo potvrdit.

Jako konečné a plnohodnotné pozorování je tato metodika vhodná pouze při pozorování periodických dějů obsahujících pouze složky v soudělitelných frekvencích (jako např. ve zdravotnictví pořizování záznamů EKG).

B. Opakované pořizování záznamů ve formě předzpracovaných vzorků odezvy konstrukce na zvolený podnět

Typickou aplikací této metodiky je opakované posouzení stavební konstrukce cestou modální analýzy při použití spektrálních analyzátorů.

Výstupem nemusí být pouze frekvenčně amplitudové charakteristiky v plném rozsahu pozorování, ale např. podle potřeby frekvenčně fázové charakteristiky nebo další spec. charakteristiky dynamické odezvy.

Metodiky A a B jsou prakticky v plném rozsahu převzaty ze strojírenství a byly vyvinuty pro potřeby posuzování stavu sériově vyráběných výrobků. Ve stavebnictví se s aplikacemi tohoto typu setkáváme již odnepaměti, např. při posuzování stavu (resp. kvality) cihlářských výrobků na základě zvukové odezvy na poklep. Při jejich aplikaci na unikátních nebo malosériových stavbách zpravidla chybí dostatečně věrohodná specifikace přípustných parametrů odezvy, ale komplikace je zejména to, že tyto metodiky vyžadují (obdobně jako statické zatěžovací zkoušky) provozní výluky stavby během experimentálního pozorování. Tímto vzniká často nepřekonatelná ekonomická překážka a je třeba aplikovat jiné metodiky přebírané z oblasti např. seismologie.

C. Vzorkové pozorování a záznam odezvy na provozní zatížení

Při těchto pozorováních se vedle odezvy na provozní zatížení zpravidla registruje i alespoň hlavní složka provozního, resp. reálného dynamického zatížení stavební konstrukce.

Ve stavebnictví je tento metodický přístup využíván zpravidla pro střednědobá orientační pozorování za účelem upřesnění parametrů v rámci přípravy rozsáhlejšího dlouhodobého experimentu nebo v zájmu snížení rizika, že se při návrhu dynamické ochrany stavební konstrukce nedocení některý reálný rizikový faktor.

Problém omezení nároků na paměťovou kapacitu systému pozorovacího řetězce je zpravidla řešen tak, že k připojování záznamové jednotky dochází až v okamžiku překročení zvolené meze u některé z pozorovaných veličin.

D. Průběžné pozorování s metodikou registrace na principu „černé skřínky“

Zejména při řešení problémů ochrany stavební konstrukce před havárií způsobenou dynamickým přetížením je zpravidla důležitější zaregistrovat, co předcházelo dynamickému přetížení konstrukce, než jak se chová tato konstrukce po poškození přetížením. V takovémto případě je obvyklé a zavedené udržovat průběžně záznam v operační paměti řetězce, pořízený v předcházejícím intervalu a teprve až dojde k jevu, který je předmětem zájmu pozorování, je obsah operační paměti přepsán do výstupní paměti monitorovacího řetězce. Návazně je tento záznam, získaný přepisem, obvykle rozšířen o vzorkový záznam obdobného záznamu získaného metodikou C. Vnější podoba záznamu je obdobná a liší se jen posunem počátku záznamu na časové ose.

E. Průběžné dynamické pozorování se statickým vyhodnocením souboru koeficientů funkcí statistické dynamiky

Důvodem selhání mechanické funkce stavební konstrukce je překročení meze pevnosti u některého z rozhodujících prvků této konstrukce. Základní nejčastější příčinou postupných změn reálné meze pevnosti jsou „únava“ stavebních materiálů a další příčiny jeho stárnutí (např. chemické a biologické). Pro údržbu a plánování oprav je potom klíčovým parametrem tzv. „zbytková životnost“, kterou lze během existence stavby pouze odhadovat, a to zejména na základě odhadu míry únavy konstrukčních prvků stavby, neboli posuzováním důsledků dosavadní historie zatížení stavby a očekávaného způsobu dalšího využívání stavby.

Kvalita odhadu je obecně charakterizována jeho nejistotami. I intuitivní odhad má charakter statistického vyhodnocení získaných informací a cesta k dalšímu zvyšování kvality odhadu vede vždy přes zdokonalování statistické analýzy a rozšiřování souboru vyhodnocovaných informací. Z toho vyplývá pro dlouhodobé pozorování dynamické odezvy stavební konstrukce na provozní zatížení (prováděného za účelem upřesnění odhadu zbytkové životnosti) zájem o plnou statistickou analýzu plného vzorku pozorování.

Technicko-ekonomická náročnost takovéhoho maximálního přístupu nutí ke kompromisním řešením, jejichž prvním stupněm je výstupní registrace omezená pouze na vybraný soubor průběžně vyhodnocovaných koeficientů statistických charakteristik, jejichž výběr ovšem předpokládá vyjasněnou představu o způsobu využití těchto dlouhodobým pozorováním získaných informací.

Dalším možným korpem jak snížit nákladnost průběžného dlouhodobého pozorování je náhrada průběžného pozorování periodicky opakovanými střednědobými pozorováními tak, aby jedním experimentálním vybavením bylo možné postupně obsloužit větší počet paralelně probíhajících dlouhodobých experimentů. Takto pojatý přístup je ideovým základem současných vývojových aktivit Kloknerova ústavu ČVUT v této vědní oblasti.

F. Cyklické testovací pozorování odezvy konstrukce na provozní zatížení s průběžným vyhodnocením zvoleného souboru koeficientů statistických charakteristik

Klíčovým předpokladem úspěšnosti tohoto metodického přístupu je zajištění reprodukovatelnosti funkčních parametrů pozorovaného systému nebo alespoň necitlivost zvolené metodiky vyhodnocení na případné nedostatky reálně zajištěné míry shody parametrů pozorovacího systému při opakovaných pozorováních.

Zvýšený rozsah metodikou z vyhodnocení definitivně vyřazovaných informací vede současně ke zvýšeným nárokům na kvalitu odhadu pozorovaného a kontrolovaného předmětu pozorování. V souvislosti s tímto dochází zejména při ekonomických rozvahách o optimálním rozsahu monitoringem zajišťovanému rozsahu pozorování (ve snaze předejít nebo alespoň minimalizovat ztráty při porušení, havárii nebo jiném selhání mechanické funkce stavební konstrukce) k nutnosti řešit často protichůdné zájmy.

Na rozdíl od obvyklé sériové výroby strojních konstrukcí testovaných za účelem odhadu technického stavu (resp. odhadu zbytkové životnosti), se setkáváme ve stavebnictví většinou s unikátními konstrukcemi, nebo v nejlepším případě s typizovanými konstrukcemi vyrobenými většinou z nehomogenních materiálů, jejichž mechanické vlastnosti jsou obvykle specifikovány hodnotami s charakterem statistických průměrů, mezi apod..

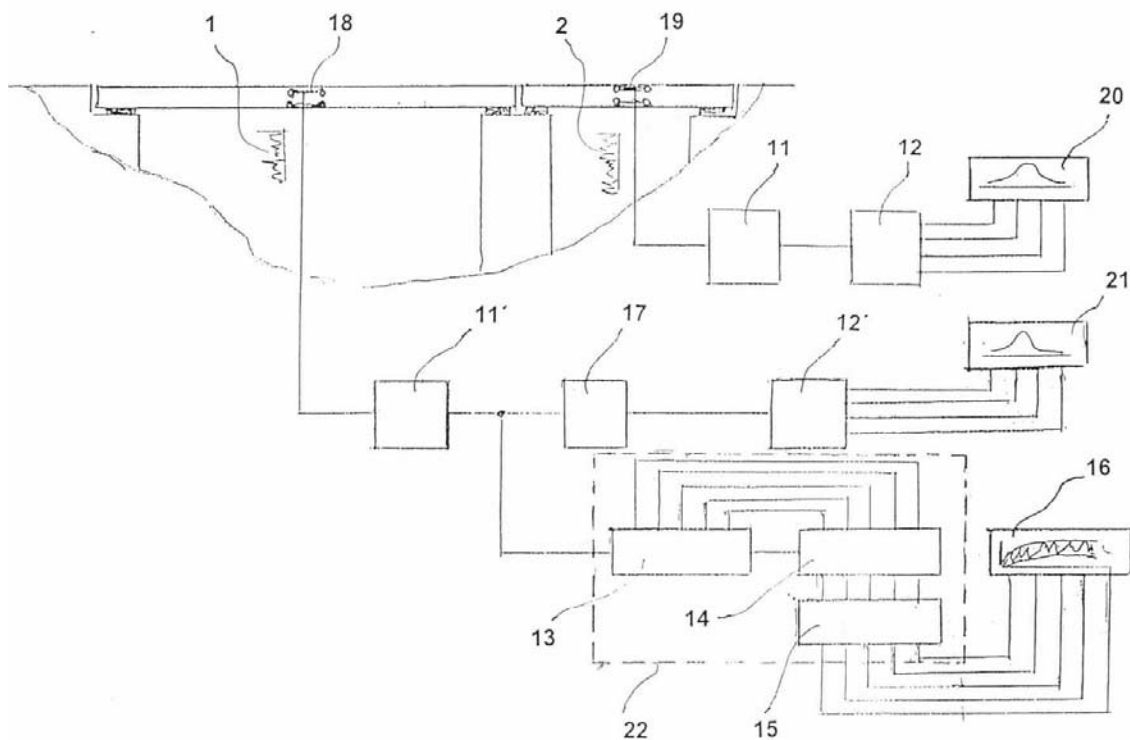
Specifikou stavebnictví je i relativně velké procento staveb strategického významu, resp. staveb, jejichž neplánové selhání vede ke ztrátám katastrofálního rozsahu. Podobně, jako např. v případě Nuselského mostu, často zatím chybí řešení problému přijatelně spolehlivého

odhadu zbytkové životnosti, resp. zdroje věrohodných podkladů pro ekonomické plánování oprav staveb s extrémní nákladností provozních výluk.

Právě v těchto, zatím přijatelně nezvládnutých, oblastech jsou t.č. v Kloknerově ústavu rozvíjené metodiky nepochybně nejnadějnější koncepční cestou.

3. Kloknerovým ústavem ČVUT doporučené technické vybavení pro realizaci reprodukovatelných staticko dynamických testů s ON LINE prováděnou analýzou odezvy na provozní zatížení za účelem indikace změn mechanické funkce stavby.

Jak již bylo v předchozím uvedeno, Kloknerův ústav vkládá největší naděje řešení problematik z oblasti odhadu zbytkové životnosti do dlouhodobého pozorování dynamické odezvy stavební konstrukce, založeného na reprodukovatelně opakovaných střednědobých testech využívajících pro analýzu a vyhodnocení změn mechanické funkce stavby, metody statistické dynamiky. Nejaktuálnější potřebu získávání aplikačních zkušeností vidí v oblasti údržby a ochrany dálniční sítě (zejména mostních konstrukcí). Startovací varianta tech. řešení testovacího systému je proto prezentována na dálničním mostu s více typy konstrukčního řešení mostních polí.



Obr. 1

Systém testování využívá mostovku s předpokládanou vyšší životností jako součást čidla provozního zatížení, takže systém pozorování obsahuje dva analogické řetězce s výstupním průběžným integračním vyhodnocováním histogramu amplitudy, nebo případně prvního pravděpodobnostního momentu amplitudy. S ohledem na tuto analogii lze snadno zaměnit úlohy mostovek (srovnávací a pozorovanou) podle toho, do kterého řetězce zapojíme větev vyhodnocování statistické charakteristiky vyššího stupně). Rozběhová varianta předpokládá vyhodnocování koeficientů charakteristiky typu autokorelační funkce s tím, že dosud nejobvyklejší formu (frekvenčně amplitudové spektrum) odpovídající výstupům získávaným modální analýzou bude v případě potřeby možné zajistit dodatečným přepočtem.

Trvale registrovanou výstupní informací tedy budou soubory periodických odečtů okamžitých stavů výstupních integrátorů odpovídajících jednotlivým koeficientům vyhodnocovaných statistických charakteristik (min. 2 histogramy + 1 autokorelační funkce). Předpokládá se, že pravděpodobnostním porovnáním těchto histogramů bude možné získat informaci blízkou tomu, co se v současnosti získává cestou opakovaných statických zatěžovacích zkoušek se stupňovitým zatěžováním, a že prostřednictvím analýzy časového vývoje autokorelační funkce bude možné jednak kvantifikovat míru zatížení konstrukce v minulosti a na základě výraznějších změn a anomálií ve vývoji této charakteristiky by potom mělo být možné získat s minimálním zpožděním např. informace o novém ohrožení konstrukce, a to jak v důsledku nového zdroje významného dynamického přetížení, tak v důsledku změny mechanické funkce konstrukce v souvislosti se vznikem únavové poruchy.

Právě potřeba hledat zákonitosti těchto souvislostí vede k potřebě zásadně rozšířit objem experimentálních pozorování na reálných konstrukcích, neboli též hledat technická řešení, která minimalizují nákladnost příslušných experimentů a testů. Je rovněž potřeba upřesňovat formy výstupů tak, aby svým obsahem dostačovaly potřebám upřesňování vyvíjené metodiky odhadu zbytkové životnosti.

Kloknerův ústav hodlá pro tuto první fázi výzkumného programu aplikovat následující tech. řešení:

- čidla měřených veličin

Dlouhodobé statistické pozorování odezvy stavebních konstrukcí kladou obdobné nároky na funkční parametry čidel jako každá jiná dlouhodobá telemetrická pozorování mechanických veličin v podmínkách IN SITU. Pro Kloknerův ústav je samozřejmě ekonomicky nejdostupnější aplikace strunové měřicí techniky, jejímž vývojem a výrobou pro potřeby stavebnictví ČR se Kloknerův ústav již tradičně zabývá.



Obr. 2.

Aplikační řada čidel odvozená od strunového tenzometru (viz obr.2) má pro tento účel navíc specifické výhody spočívající v tom, že mechanickou část s měrnou strunou (mechanickým analogo-frekvenčním převodníkem) lze ponechat jako trvalou součást kontrolované konstrukce a „oživovat“ měřicí řetězec při testovacím pozorování přiložením elektromechanického měniče, zařazeného jako součást přenosného vysílače výstupního frekvenčního signálu čidla.

Mimo zobrazeného tensometru obsahuje odvozená řada strunových čidel (alespoň na funkčních vzorcích v minulosti v Kloknerově ústavu odzkoušených) ještě akcelerometr, náklonoměr, siloměry, extensometr, anemometr, tlakoměr a snímač hladiny.

- vysílač signálu

U střednědobých opakovaných instalací experimentálního pozorování v podmínkách IN SITU je žádoucí nahradit pracné a snadno zranitelné kabelové propojení čidla s měřicí ústřednou radiopojítkem. V případě aplikace strunového (akustického) měřicího systému se nejedná o technický problém, ale téměř výhradně jen o ekonomický problém technickosprávní. Jedná se zejména o potřebu kompromisního výběru dostupného typu radiopojítka a míry správním systémem zajišťované ochrany před vnějším rušením provozu na příslušné vlnové délce radiospojení (resp. tomuto odpovídající správní poplatek a pořizovací náklady).

Nosným programem pro rozvoj technického vybavení Kloknerova ústavu v této oblasti je t.č. komplexní modernizace technického vybavení pro realizace statických zatěžovacích zkoušek mostů s vyvinutým radiopojítkem viz obr. 3.



Obr. 3

Věcně ovšem nejzávažnější část rozvojové etapy již v Kloknerově ústavu proběhla (1995-97) v rámci vývoje předpovědního systému povodňového ohrožení, jako součást ochrany elektronických aparatur systému před elektrickými výboji při bouřkách v okolí umístění srážkoměrů a dalších čidel předpovědního systému.

- vstupní jednotka aparatur vybavená přijímačem radiosignálu

Pro potřeby dlouhodobého pozorování odezvy stavebních konstrukcí lze také téměř bez úpravy převzít statickou měřicí ústřednu v podobě vyvíjené pro účely realizace statických zatěžovacích zkoušek, viz obr. 4, a to jako vstupní jednotku aparatury vybavené přijímačem radiosignálu (druhou stranou radiopojítka).



Obr. 4

Uvažovaná demonstrační realizace sice vyžaduje pro každý měřicí kanál samostatně takovouto statickou měřicí ústřednu, ale programový zásah do funkce těchto statických ústředí je jen minimální, zajišťující prakticky jen zvýšení frekvence odečtů snížením počtu period frekvenčního signálu, jejichž interval je při odečtu kontrolován.

- jednotka posuvného registru

Vyhodnocování ON LINE statistických funkcí a charakteristik vyššího řádu (jako je např. autokorelační funkce) vyžaduje průběžné uchovávání odečtů posledních sérií v operační paměti a to v rozsahu intervalu odpovídajícímu rozsahu časových zpoždění vyhodnocované autokorelační funkce. Z pohledu jednoduchosti algoritmů vyhodnocování by pro tuto aplikaci byl posuvný registr nejvhodnější formou příslušné operační paměti, ale s ohledem na orientaci hromadné výroby elektronické součástkové základny pro výpočetní techniku je vhodnější aplikace klasických (RAM) pamětí a funkci posuvného registru zajistit programovým řízením ukládání, mazání a čtení měřením získaných informací.

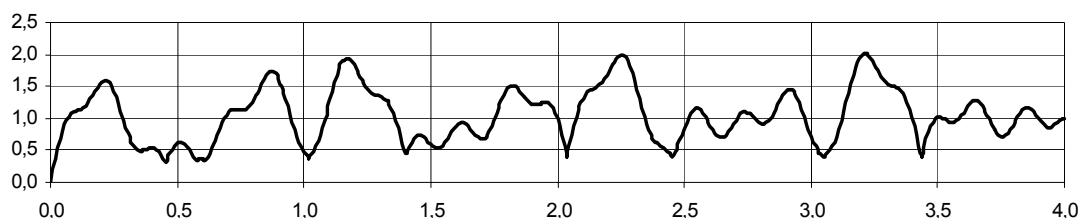
- jednotka ON LINE vyhodnocování statistické funkce autokorelačního typu

Výhodou vyhodnocování klasických korelačních funkcí je teoretická připravenost transformačních kroků, převádějících informační obsah zaregistrovaný formou korelační funkce na jiné charakteristiky. Obecně ale od této orientace očekáváme zejména naději na zřetelnější grafické znázornění vzájemných frekvenčních posuvů hlavních vlastních frekvencí

pozorovaných konstrukcí. Tyto posuvy pravděpodobně budou nejvěrohodnějším a proto nejnadějnějším podkladem pro posouzení významu poruchy nebo jiné změny mechanických funkcí konstrukce.

Důvodem naší snahy nahradit formu registrované statistické funkce jiným typem, který by byl pouze blízký autokorelační funkci jsou komplikace, které způsobuje nestabilita „nulového odečtu“ a snaha omezit nároky vyhodnocovacího programu na operační rychlost použité digitální výpočetní techniky.

Toto vedlo k rozhodnutí nahradit pro zkušební zaváděcí etapu této nové metodiky součin v autokorelační funkci rozdílem vzájemně zpožděných odečtů a navíc rozšířit možný rozsah zpoždění registrované funkce vyhodnocováním absolutních hodnot těchto rozdílů, čímž se dospěje ke grafickému znázornění, jehož příklad uvádí obr. 5.



Obr. 5

Očekáváme, že bude výhodou, že toto znázornění sice potlačuje rozlišitelnost šumů od nevýrazných frekvenčních složek, ale formou spodní obalové křivky grafu názorně charakterizuje jakousi celkovou úroveň šumu a naopak zvýrazňuje hlavní frekvenční složky, neboli ty, jejichž potlačení by mělo reálnou naději na omezení únavových faktorů konstrukce.

▪ výstupní jednotky systému

Výstupem vyhodnocovací jednotky je soustava integračních pamětí, příslušných jednotlivě vyhodnocovaným bodům (koeficientům vyhodnocované statistické funkce, přičemž úkolem výstupní jednotky systému je se zvolenou periodicitou přepsat okamžitý stav těchto integračních pamětí do výstupní registrační paměti. Obsahem výstupní jednotky je i vybavení, které umožňuje na požádání vyzískat informace uložené ve výstupní registrační paměti aparatury, a to třeba i aplikací modemu, umožňujícího dálkový přenos a zobrazení s využitím stávajících telekomunikačních sítí.

Je zřejmé, že se v případě výstupní jednotky jedná o řešení stejného problému s jakým se setkáváme u kterékoliv jiné vyráběné nebo vyvíjené měřicí ústředny.

4. Závěr

Problematikou, která je předmětem předkládaného textu, se Kloknerův ústav zabývá již dlouhodobě, ale zatím spíše jen studijně, a to formou neplánovaných výstupů řešení blízkých výzkumných úkolů.

K přesvědčení, že si budoucnost vynutí prezentovaný přístup k problému údržby extrémně vytížených staveb, vedlo již řešení úkolu III – 6 – 4/3 „Vypracování metody řešení kmitů vysokých konstrukcí“ v r. 1975.

Všechny později námi řešené úkoly proto již respektovaly zájem přispět ekonomické realnosti textem doporučovaného přístupu.

Nejedná se jen o nepřímou podporu vývoje aparatur a čidel využitelných i v systémech statistického pozorování dynamické odezvy na provozní zatížení, ale i o snahu o přímé řešení dílčích problematik tohoto záměru. (Využití mostních konstrukcí pro orientační měření nápravových tlaků, statistická kontrola provozního zatížení reálné dálniční sítě a další, ovšem jen na úroveň nabídky řešení dotažených problematik, jako např. systém kontroly opětovného porušení roštů pro roznesení lokálních zatížení při průjezdu vlaku metra Nuselským mostem, atd.).

5. Poděkování

V poslední době jsou dílčí problematiky diskutovaného záměru řešeny prakticky ve všech výzkumných záměrech řešených v Kloknerově ústavu ČVUT, resp. ve všech aktivitách rozvoje strunové měřicí metody (v roce 2004 se jednalo zejména o záměr CEZ: J04/98:210000015).

Tento text potom vznikl jako shrnutí koncepčních úvah, ke kterým vedlo řešení experimentální stránky problému posouzení rizik porušení stavebních konstrukcí při mimořádném zatížení (grantový úkol GAČR č. 103/00/0705) a zejména jako řešení záměru č. VZ6840770015.

6. Literatura

- [1] ZÁRUBA, J.: Metody vyšetřování statistických charakteristik náhodných procesů (studie), Výzk. zpráva, Praha 1972
- [2] ZÁRUBA, J. – ŠVANDA, J. – BOUŠKA, P. – ŠTEMBERK, P.: The technical resources in the process of the stochastic dynamic methods application for the audio frequency analysis in situ. Inženýrská mechanika 2000, vol. II, p. 173, Svratka 5.2000
- [3] ŠTEMBERK, P. – ZÁRUBA, J. – ŠVANDA, J.: Využitelnost mostní konstrukce pro kontrolu nápravových tlaků, EAN 2001, str. 305-312, Praha 2001
- [4] ŠVANDA, J. – ZÁRUBA, J. – ŠTEMBERK, P.: Aparatury pro dlouhodobé pozorování konstrukce, EAN 2001, str. 313-318, Praha 2001