

Experimentální **A**nalýza **N**apětí **2003**

ELECTRO-HYDRAULIC VIBRATION EXCITER FOR DYNAMIC TESTS OF BRIDGES

ELEKTROHYDRAULICKÝ BUDIČ KMITÁNÍ PRO DYNAMICKÉ ZKOUŠKY MOSTŮ

Jaromír Král¹

The vibration exciter was developed for the modal analysis of civil engineering structures of very low natural frequencies, vibrating mostly in vertical direction, such as bridges or foundation slabs. The characteristic amplitude of harmonic force for 1 Hz frequency is about 5 kN. The vibration exciter can be used for the loading by a random history force, harmonic excitation force of constant frequency, or continuous frequency sweep within a certain frequency band, and repeated pulses.

The principal vibration exciter characteristics are: weight of mass as many as 2000 kg (basic variant), linear hydraulic actuator of rated force of 40 kN and rated stroke of ± 125 mm, pump of 25 l/min. flow capacity. The MTS TestStar control unit controls movement of the mass in accordance with the commands of the superior PC either by means of built-in generator of functions or by means of prepared programmes. The whole equipment is adjusted for use on-situ structures and requires a power connection or a 380 V/ 25 kW power supply unit for its operation. Direct measurement of force on the structure is assured by three force sensors, while an acceleration sensor serves indirect measurements. The basic configuration does not require fastening to the measured structure and can be used effectively within the 0 – 20 Hz frequency band. The maximum excitation force frequency for the minimum weight mass was verified up to 60 Hz. The excitation force amplitude for the frequencies exceeding 1 Hz can be extended further by an auxiliary base, or by vibration exciter fastening to the tested structure and by the application of a higher capacity oil pump.

The vibration exciter could be built only on the basis of association of funds provided by several research project and the maximum use of existing facilities. The electro-hydraulic system, the electronic control, and the measuring lines were assembled of the facilities of the testing plant and the laboratories of the Klokner Institute, normally used for the tests of building materials and components of civil engineering structures. The power centre was provided by the Civil Engineering Faculty CTU in Prague.

Keywords

Bridge, modal analysis, exciter, dynamic, force, structure.

Úvod

Elektrohydraulický budič (dále jen budič) byl vyvinut Kloknerově ústavu ČVUT pro modální analýzu stavebních konstrukcí, které mají velmi nízké vlastní frekvence a kmitají převážně ve svislém směru. Například mostů nebo základových desek. Budič je vhodný i pro dynamické

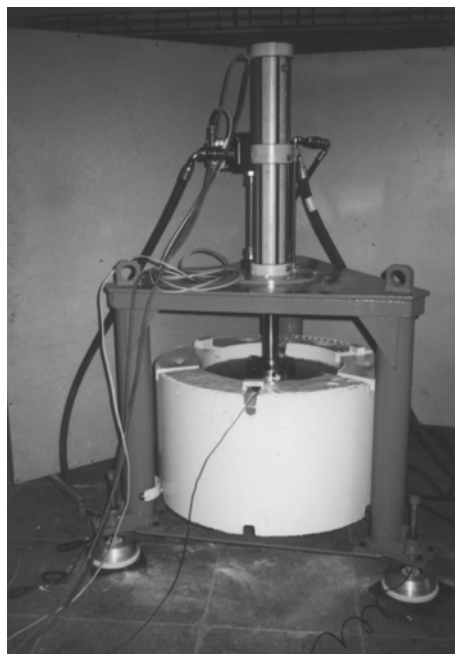
¹ Ing. Jaromír Král, CSc.: Kloknerův ústav ČVUT; Šolínova 7, 166 08 Praha 6, tel.: +420-224 353 544, e-mail: jkral@klok.cvut.cz

informativní zkoušky podobných staveb podle ČSN 73 2044 Dynamické zkoušky stavebních konstrukcí. Předpoklady pro vývoj a realizaci budiče byly vytvořeny v roce 1999 sdružením finančních prostředků tří výzkumných projektů a orientací na využití existujících zařízení zkušebny Kloknerova ústavu ČVUT. Budič byl doposud využit pro modální analýzu deseti mostů.

Popis budiče

Celý systém sestává z mechanické jednotky, hydraulického agregátu, řídicí elektroniky a elektrocentrály. Mechanickou jednotku tvoří ocelový rám, přímočarý hydromotor INOVA se jmenovitou silou 40 kN a jmenovitým zdvihem 250 mm (± 125 mm) a závaží s hmotností až 2000 kg (základní varianta). Hmotnost závaží lze měnit ve stupních po 50 kg až do 500 kg, dále je možné přidat prstenec s hmotností 1500 kg. Standardně je používán hydraulický agregát HA25 INOVA s kapacitou 25 l/min, napáječ a servoventil Moog 56 l/min. Silový účinek budiče lze dodatečně zvýšit použitím hydraulického agregátu s vyšším dodávaným množstvím tlakového oleje. Elektronická řídicí jednotka MTS TestStar ovládá pohyb pístu hydromotoru podle příkazů z nadřazeného PC buď pomocí vestavěného softwarového generátoru funkcí nebo podle programů vyvinutých řešiteli pro tento účel.

Elektrohydraulický systém, řídicí elektronika MTS a měřicí linky byly sestaveny ze stavebnicového zařízení zkušebny a laboratoří Kloknerova ústavu, které se obvykle využívá pro zkoušky stavebních materiálů a prvků stavebních konstrukcí. Celé zařízení je upraveno pro operativní použití na skutečné konstrukci. Ke své funkci vyžaduje standardní elektrickou přípojku nebo elektrocentrálu 380 V/25 kW (zajišťuje FSv ČVUT). K manipulaci s budičem (nakládání a skládání) je třeba jeřáb s nosností 2500 kg.



Obr. 1 Elektrohydraulický budič

Základní konfigurace budiče se závažím 2000 kg nevyžaduje mechanické upevnění budiče k měřenému objektu. To výrazně zvyšuje operativnost při použití budiče. Lze ji efektivně využít v pásmu frekvencí do 20 Hz. Přímé měření síly na konstrukci je zajištěno třemi snímači síly s kulovými klouby, k měření setrvačné síly závaží se používá snímač zrychlení.

Charakteristická amplituda harmonické síly při frekvenci 1 Hz je 5 kN. Maximální amplituda harmonické síly roste s frekvencí až do 20 kN (viz obr.3). Pro minimální hmotnost závaží byla ověřena funkce budiče až do 60 Hz. V tomto pásmu frekvencí je však efektivnější použití jiných druhů budičů. Generování velkých budících sil (větších než je tíha budiče) vyžaduje připevnění budiče k betonovému základu nebo upevnění budiče přímo na měřený objekt. Tyto případy budou časté při použití menších závaží a vyšších frekvencí budící síly. Amplitudu harmonické budící síly lze dále zvětšit použitím hydraulického agregátu s vyšší kapacitou tlakového oleje, použitím hydromotoru s vyšší dovolenou rychlostí pohybu pístu, zvýšením hmoty závaží.

Na obr.2 je fotografie celé sestavy zařízení budiče na mostě. Vpředu je mechanická jednotka, za ní auto použité jako dočasné měřicí pracoviště s měřicí a řídicí elektronikou, v pozadí je hydraulický agregát a elektrocentrála.



Obr. 2 Sestava budiče na mostě

Řízení budiče

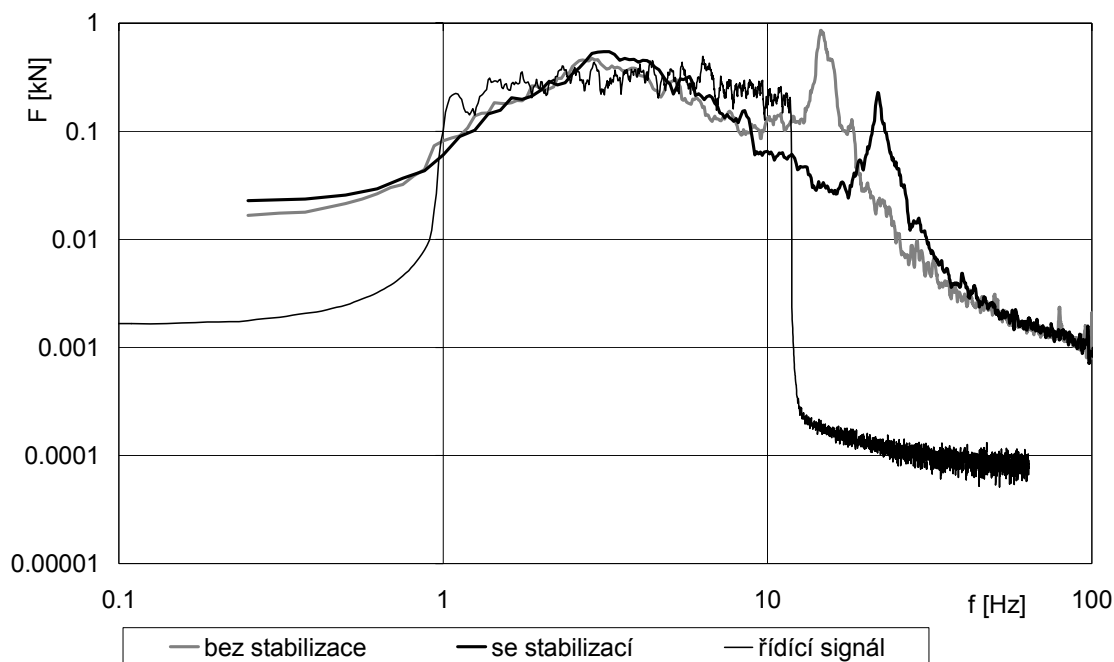
Základním prvkem standardní řídicí elektroniky MTS TestStar je PIDF regulátor s možností volby řídicí veličiny (posunutí, síla, tlak apod.), zajišťující pohyb pístu přímočarého hydromotoru podle příkazů nadřazeného programu. V případě konfigurace s volnou hmotou budiče je možné pouze řízení polohy závaží, tedy posunutí pístu hydromotoru z výchozí polohy, které je u novějšího typu řídicí elektroniky doplněné možností stabilizace řídicí smyčky měřením tlaků oleje ve válci hydromotoru. Standardní součástí řídicí elektroniky je softwarový generátor funkcí. Lze jej s výhodou použít při buzení harmonickou silou s nastavitelnou frekvencí a amplitudou nebo pro vytvoření opakovaných silových pulsů (např. ve tvaru obdélníku, sinusových pulsů apod.). Novější veze elektroniky umožňuje obdobným způsobem generovat náhodný šum. Pro ostatní požadované časové průběhy budící síly je dosud nutné vytvořit vhodné řídicí soubory. Na základě poznatků z literatury a požadavků řešených projektů jsme připravili řídicí soubory pro zatěžování:

- silou s náhodným průběhem v čase a spojitým spektrem v určitém pásmu frekvencí, např. v pásmu od 1 do 12 Hz (přibližně růžový šum);
- silou se sinusovým průběhem, konstantní amplitudou a s plynulou změnou frekvence určitého pásmu frekvencí (frekvenční „sweep“ např. od 1 do 12 Hz);
- opakovaným silovým pulsem ve tvaru sinusové půlvlny.

Tyto programy definují pohyb závaží tak, aby bylo dosaženo požadovaného časového průběhu nebo frekvenčního spektra síly. Současně potlačují vliv rezonance soustavy, tvořené hmotou a hydraulickým systémem, a omezují velikosti rychlostí a zrychlení pohybu na přípustné hodnoty. Hardwarové a softwarové vlastnosti používaného řídicího systému umožňují vytvářet časové průběhy síly cca 20 s dlouhé, které je však možné opakovat.

Omezení délky segmentu generovaného průběhu síly lze v případě potřeby překonat použitím modernější řídicí jednotky.

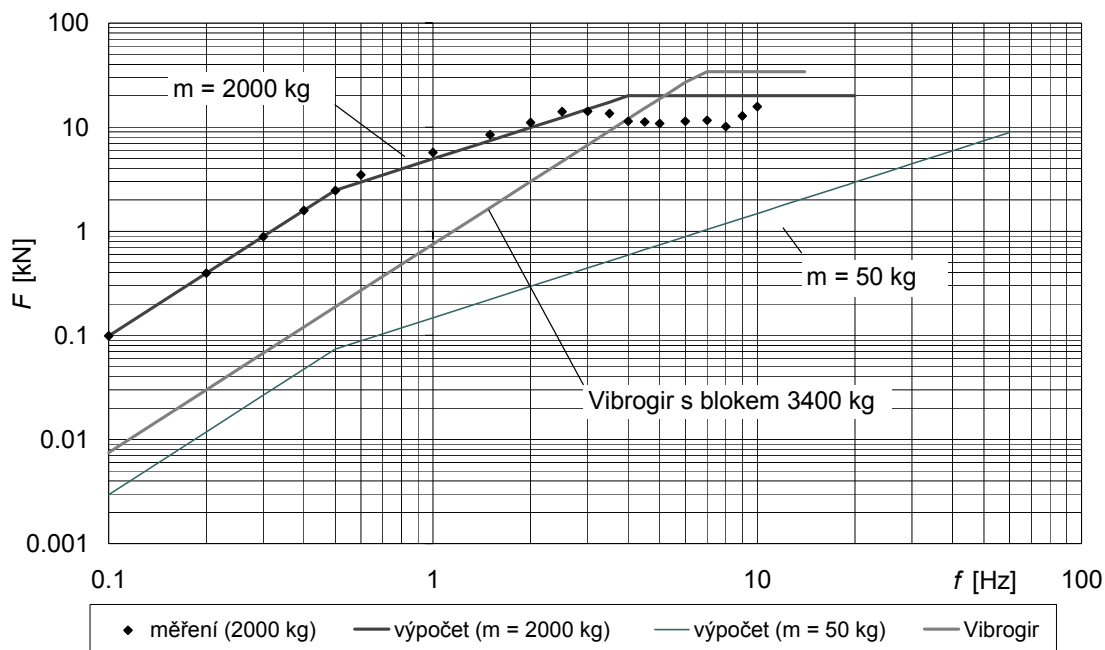
Na obr. 3 je spektrum řídicího signálu pro buzení silou s náhodným časovým průběhem v pásmu frekvencí 1 až 12 Hz. Signál byl navržen pro starší řídicí jednotku bez možnosti stabilizace řídicí smyčky tak, aby byl potlačen vliv rezonance pohyblivé hmoty budiče na sloupci oleje. A obr. 3 jsou dále uvedena naměřená spektra budící síly při použití starší řídicí jednotky a novějšího typu řídicí jednotky se stabilizací regulační smyčky pomocí měření tlaku ve válci.



Obr. 3 Spektrum řídicího signálu a naměřená spektra náhodných sil pro řídicí jednotky bez a se stabilizací regulační smyčky.

Charakteristika budiče

Charakteristikou budiče je pro potřeby tohoto příspěvku nazvána závislost maximální amplitudy harmonické budící síly na frekvenci za předpokladu, že zkreslení pohybu je minimální. Při výpočtu teoretické křivky je třeba vzít ohled na kapacitu čerpadla, zdvih pístu, maximální přípustnou rychlost pístu a maximální přípustné zrychlení závaží (budič nesmí poskakovat). Na obr. 4 jsou vypočtené charakteristiky popsaného budiče pro závaží 50 kg a 2000 kg porovnávány s naměřenými hodnotami a charakteristikou dosud používaného budiče Vibrogir se základovým blokem s hmotností 3400 kg. V pásmu frekvencí do 5 Hz umožňuje výše popsaný budič dosažení vyšších sil než dosud užívaný budič Vibrogir se základovým blokem. Při dané konfiguraci zařízení lze dosáhnout i vyšších amplitud sil na dané frekvenci, ale časový průběh síly se postupně změní na přibližně trojúhelníkový a vzrůstá podíl vyšších harmonických složek. Příčinou je zejména omezená kapacita hydraulického agregátu. Použitím hydraulického agregátu s větším dodávaným množstvím tlakového oleje lze tuto hranici posunout směrem k vyšším frekvencím a silám.



Obr. 4 Vypočtené a naměřené závislosti amplitudy harmonické budící síly na frekvenci pro popsany budič s dosud užívaný budič Vibrogir.

Měření síly

Pro měření síly jsou k dispozici dvě metody - měření zrychlení hmoty budiče a přímé měření sil mezi rámem budiče a mostovkou. Podle existujících zkušeností ovlivňuje pohyb mostovky výsledky měření. Řešitel konkrétního projektu se může rozhodnout pro jednu z metod nebo může použít obě metody současně. Z hmotností pohybujících se hmot (cca 2000 kg) a zrychlení lze stanovit velikost a časový průběh setrvačné síly.



Obr.5 Snímač síly s kulovým kloubem

K přímému měření síly mezi stavěcími šrouby na rámu budiče a mostovkou se používají tři standardní snímače síly fy HBM typ C9B (20 kN), zabudované do skříní se samostavitelnými kulovými klouby – viz obr. 5. Společně s výškově stavitelnými opěrnými šrouby zajišťují možnost rektifikace budiče do svislé polohy na skloněné mostovce a spolehlivé měření sil. Snímače jsou připojeny na tři kanály měřicího zesilovače KWS 673.A2 a součet tří analogových signálů provádí po digitalizaci elektronika řídicí jednotky v reálném čase. Na výstupu je k dispozici součtový analogový signál, odpovídající citlivosti 3 kN/V. Signály jednotlivých snímačů je možné také zaznamenat současně s měřeními veličinami a použít pro vyhodnocení po provedeném měření.

Závěr

Celé zařízení bylo možné postavit pouze na základě sdružení prostředků ze tří výzkumných projektů: interního projektu IG ČVUT č. 30990807 „Budič kmitání stavebních konstrukcí ve svislém směru“, komplexního projektu GA ČR č.103/96/K034 „Životnost náhodně zatížených tenkostěnných konstrukcí s tvarovými a materiálovými imperfekcemi“ a výzkumného záměru J04/98:210000029 „Rizikové inženýrství a spolehlivost technických systémů“.

Elektrohydraulický systém, řídicí elektronika a měřicí linky byly sestaveny ze zařízení zkušebny a laboratoří Kloknerova ústavu, která se standardně využívají pro zkoušky stavebních materiálů a prvků stavebních konstrukcí. Elektrocentrálu zajišťuje FSv ČVUT v rámci spolupráce.

Budič byl v průběhu tří let úspěšně použit při deseti zkouškách mostů různé velikosti a konstrukčního provedení. Pro řešení projektu MDS č.803/120/112 „Využití modální analýzy pro hodnocení mostních konstrukcí“ byl modernizován systém řízení a pokračuje vývoj řídicích programů. Autor děkuje spolupracovníkům z Kloknerova ústavu ČVUT za pomoc při řešení projektu.

Literatura

- [1] *Dokumentace firmy MTS ke zkušebnímu stroji MTS 810 500 kN*, 1991, 2002
- [2] *Dokumentace firmy Inova k hydraulickému agregátu HA250*, 1999
- [3] Král, J.: *Elektrohydraulický budič kmitání*. KÚ ČVUT, 2001, Praha