

**MEASUREMENT OF SMALL DYNAMIC STAGNATION FORCES OF
HIGH-SPEED FLUID JET - METHOD AND EQUIPMENT
ZPŮSOB A ZAŘÍZENÍ K MĚŘENÍ MALÝCH DYNAMICKÝCH
TLAKOVÝCH SIL OD ZASTAVENÍ VYSOKORYCHLOSTNÍHO
TEKUTINOVÉHO PROUDU****Vala M., Sitek L.**

A method and equipment for measurement of small dynamic stagnation forces of high-speed fluid jets are described in this paper. The design of the device for suppressing of noise interference is delineated. Experimental tests were performed to verify device characteristics, such as frequency response and natural frequency. An example of record of measured stagnation forces is presented.

ÚVOD

Vysokorychlostní vodní paprsek (VVP) je poměrně novým prvkem v oblasti rozpojování pevných hornin a podobných materiálů, od kterého se očekává vyšší efektivnost rozpojovacího procesu. V této oblasti je však k dispozici stále málo poznatků o fyzikálním mechanismu působení VVP na rozpojovaný materiál. V základním výzkumu je proto intenzivně usilováno o prohloubení znalosti o působení vysoce koncentrované energie VVP na rozpojovaný materiál. Toto úsilí logicky vede k požadavkům na znalost parametrů VVP nejen z hlediska jeho generování a řízení, ale především těch parametrů, které co nejvíce postihují jeho fyzikální podstatu. Zjišťování těchto parametrů vyžaduje jejich měření, které se musí uskutečnit v podmínkách extrémní koncentrace hydraulického výkonu. Tím jsou měření velmi komplikovaná a sporadicky zveřejněné práce se tímto tématem zabývají jen okrajově.

Současné možnosti měření, které by umožnily postihnout dynamiku a strukturu paprsku resp. distribuci jeho energie na plochu řezu jsou velmi omezené. Měření tlakové síly od zastavení VVP je jednou z mála metod, která umožňuje současně postihnout jak účinek jeho rychlosti tak i hmotnosti. Toto měření naráží však na potíže vyvolané malými průměry používaných paprsků, jejich vysokou destrukční schopností a požadavkem na měření malého podílu dynamické složky silového účinku s

vysokým kmitočtem. Vyjdeme-li z rovnice pro tlakovou sílu F , kterou působí paprsek na kolmou stojící desku

$$F = \frac{1}{4} \pi \rho d^2 c^2 \eta,$$

pak při dosažení pro minimální parametry vodního paprsku, které jsou při výzkumu jeho aplikací ještě běžné (průměr $d = 0,17$ mm, rychlost $c = 300$ m/s, měrná hmotnost $\rho = 1000$ kg/m³), a to i při max. účinnosti přeměny rychlostní energie na tlakovou $\eta = 1$ (ideální nestlačitelná kapalina bez vnitřního tření) bude tlaková síla od zastavení VVP jen cca 2 N. Velikosti měřených tlakových sil se tedy budou pohybovat řádově v jednotkách až desítkách Newtonů.

MĚŘENÍ TLAKOVÉ SÍLY OD ZASTAVENÍ VVP

Známe snímače pro měření malých tlakových sil využívají celou řadu principů převodu tlakové síly na údaj o její velikosti. Zpravidla jde o relativní měření, kdy měřená tlaková síla působí na snímač, který je pro zachycení její reakce upevněn na podstavu, od které se vyžadují vlastnosti relativně klidného tělesa. To vyplývá z principu relativního snímače, který naměřenou hodnotu vztahuje k určitému, předem stanovenému základu. Problém zde nastává při požadavku na měření malých dynamických sil, ležících uvnitř širokého spektra sil s velkou dynamikou. Vezmeme-li dále v úvahu, že podíl dynamické složky z měřené síly od zastavení VVP v některých částech frekvenčního spektra nepřesáhne často ani 10% a že tento podíl je třeba měřit s přesností alespoň několika málo procent, pak je nejen zcela vyčerpána rozlišovací schopnost nejmenších dostupných piezoelektrických snímačů síly (např. Kistler 9301A), která je cca 0,01 N, ale měření probíhají hluboko pod jmenovitým rozsahem, který je ve zmíněném případě 2 500 N. To klade vysoké nároky na klid v základně, která musí i při měření nejmenší požadované úrovně sil zaručovat potřebný odstup rušivého signálu od měřeného. Přitom zdrojem neklidu v základně je nejen neklid přicházející z okolního prostředí, (chod výkonného hydraulického agregátu s multiplikátorem nebo pístovými čerpadly v bezprostřední blízkosti měření), ale i neklid vybuzeň v základně nebo jejím okolí působením měřených dynamických sil. Tento neklid může přitom v základně nebo jejím okolním prostředí přetrvávat formou tlumených kmitů i v době, kdy již měřená síla nepůsobí. Na tento neklid pak snímač tlakové síly reaguje jako absolutní snímač vibrací, když setrvačná hmota absolutního snímače je zde dána nutnou armaturou snímače a konstrukcí pro zavedení síly do tohoto snímače (tzv. seismická hmota).

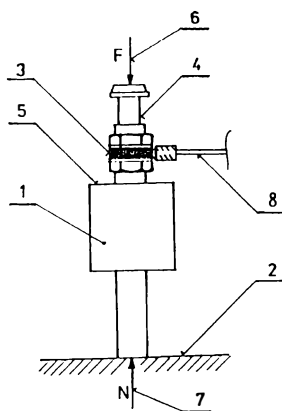
Je známo více způsobů potlačení rušivého neklidu v základně tlakového snímače síly, jejichž princip zpravidla spočívá v použití základny o co největší hmotnosti, která se případně od okolního neklidu odizolovává různými tlumicími prvky. Nevýhodu takového řešení lze pak spatřovat v tom, že zvyšování hmotnosti podstavy nevede vždy k očekávanému výsledku, protože pro dosažení dostatečného odstupu se rozměry základny stávají nejen neúměrnými k měřeným silám, ale s tím spojené zvětšování rozměrů podstavy vede v mnoha případech k posunu jejího rezonančního kmitočtu do měřené oblasti, což prakticky měření znemožní.

Další problém spočívá v tom, že skutečné podstavy jsou jen přibližně lineární, když nelinearity se v nich vyskytují nejčastěji u pružných a tlumících členů. Základní nepříjemnou vlastností nelineární soustavy je neplatnost principu superpozice (takovou soustavu můžeme pokládat za složenou z většího počtu oscilátorů vzájem-

ně vázaných, kde záznamně nevznikají rozladěním oscilátorů, ale jejich vazbou - Horák a kol. 1954). To znamená, že vlastní a vynucené kmitání se vzájemně ovlivňují. U vynuceného kmitání nelze prostě budící sílu rozložit do harmonických složek a jejich dílčí odezvy superponovat. Ještě složitější poměry nastávají při buzení signálem obsahujícím deterministickou složku a složku náhodnou, kde podle velikosti poměru těchto složek může soustava skokově přecházet do předrezonanční nebo zarezonanční oblasti (Juliš a kol. 1987).

Řešení tedy spočívá v realizaci podstavy pro montáž snímače tlakové síly, která by zaručovala minimálně nutný odstup rušivých signálů od měřeného. To znamená, že podstava:

- musí co nejvíce zamezit pronikání neklidu z okolí ke snímači,
- musí mít vlastní rezonanční kmitočet, stejně jako harmonické a parazitní kmitočty mimo požadovaný rozsah měření,
- nesmí se svým vlastním rezonančním kmitočtem a s vlastním rezonančním kmitočtem snímače síly zatíženého seismickou hmotou vytvářet záznamně, které by spadaly do požadovaného rozsahu měření.



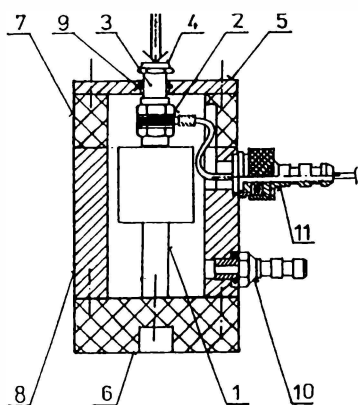
Obr. 1. Laděný mechanický transformátor jako podstava

Při vývoji snímače tlakové síly od zastavení VVP bylo navrženo a proměřeno několik desítek různých podstav. Výsledkem těchto prací je původní řešení způsobu potlačení rušivého neklidu při měření malých dynamických tlakových sil. Podstata řešení spočívá v použití laděného mechanického transformátoru amplitudy na realizaci podstavy pro instalaci vlastního piezoelektrického snímače síly (viz obr. 1). Princip tohoto řešení spočívá v tom, že do dráhy rušivému neklidu N, přicházejícímu z okolního prostředí na snímač síly 3, se vloží mechanický laděný transformátor 1 tak, že na straně vyššího převodu amplitudy se spojí s okolním prostředím a na stranu nižšího převodu, který realizuje vlastní funkci relativně klidné základny 5, se upevní snímač síly. Potlačení rušivého neklidu je dosaženo využitím principu mechanické rezonanční transformace, u které mimo rezonanční frekvenci je dosahováno výrazného útlumu. Přenos s největší účinností je možný jen na rezonanční frekvenci, přičemž ve směru od okolního prostředí ke snímači je amplituda rušivého

neklidu snižována transformačním poměrem. U stupňovitěho typu, který byl v konkrétním případě vybrán pro největší selektivitu a největší poměr n transformace amplitudy, je dán poměrem ploch průřezů jednotlivých stupňů.

V opačném směru tj. ze snímače síly do okolního prostředí je pronikání impulsu měřené síly S s největší účinností rovněž možné jen na vlastním rezonančním kmitočtu f_{sk} snímače zatíženého seismickou hmotou m (tj. konstrukcí 4 pro zavedení síly), který je při tuhosti snímače c dán vztahem

$$f_{sk} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m}}.$$

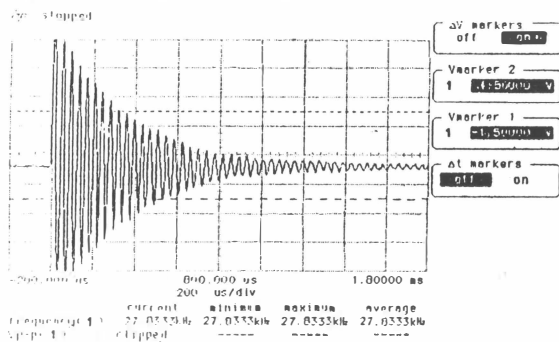


Obr. 2. Schema zařízení pro měření malých dynamických tlakových sil od zastavení papsrku.

do okolního prostředí, když činitel propustnosti této kombinace je 0,12 (Obraz 1976). V opačném směru je pronikání neklidu kompenzováno transformačním poměrem, který byl navržen na přibližně stejnou hodnotu 10:1.

OVĚŘOVÁNÍ METROLOGICKÝCH VLASTNOSTÍ

K ověřování metrologických vlastností snímače bylo použito rázu, protože podle teorie platí, že rázy mohou vybudit do rezonančních kmitů libovolnou mechanickou



Obr. 3. Oscilografický záznam tlumených kmitů snímače tlakových sil.

jména pak na složitější soustavy s více rezonancemi (Navrátil & Pluhař 1986). Krátkým rázem lze tedy s dostačující přesností určit amplitudovou odezvu soustavy, na

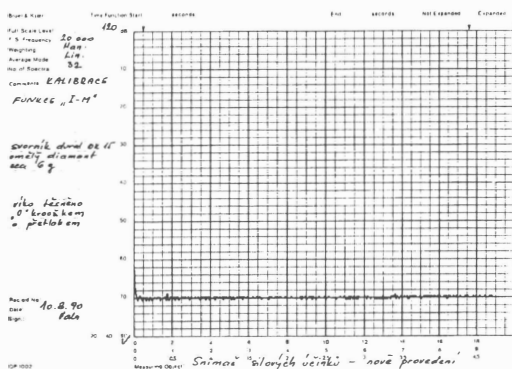
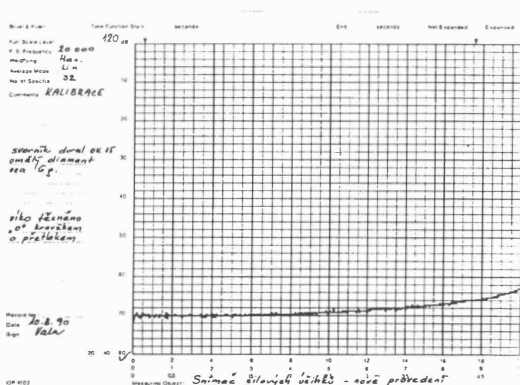
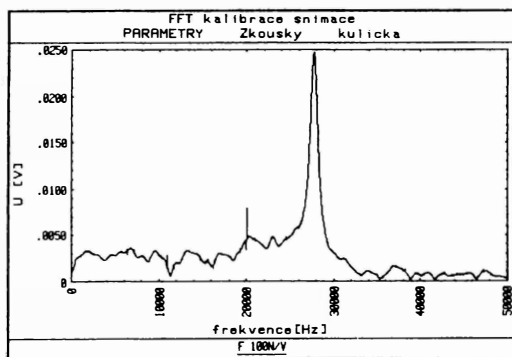
Pro zamezení kmitočtových interferencí s vlastní rezonanční frekvencí laděného transformátoru f_s , která je při rychlosti podélného vlnění c_l a délce l jedné z jeho válcových částí dána vztahem

$$f_s = \frac{c_l}{4l},$$

byly obě frekvence navrženy tak, aby $f_{sk} > f_s$, protože frekvenčně-amplitudové charakteristiky mechanických transformátorů mají za rezonanční frekvenci vyšší hodnoty útlumu.

Zařízení pro měření malých dynamických tlakových sil od zastavení vysokorychlostního tekutinového proudu v konečném provedení (viz obr. 2), má pak mechanický transformátor na straně vyššího převodu amplitudy upevněn na podložce z tvrdé pryže 6. Je zde tak vytvořeno rozhraní dvou prostředí s různými vlnovými impedancemi, které dále účinně zabraňuje pronikání impulsu síly

soustavu (obr. 3) díky tomu, že spektrum rázu je spojitě a obsahuje složky všech kmitočtů. Další výhodou této metody je, že z hlediska působení rázu na mechanické soustavy není zpravidla rozhodující časový průběh (tvar) rázu, nýbrž jeho energie. Proto i informativní spektrum rázu a přechodového jevu, které udává kmitočtové rozložení energie, poskytuje kvalitativní informace o jeho působení na mechanické soustavy, ze-



Obr. 4. Naměřená frekvenčně amplitudová charakteristika snímače tlakových sil: a) jednotlivý ráz, b) opakované rázy, c) s využitím funkce I-M (Input Minus Memory)

kteou působí (obr 4a). Posloupnost mechanických rázů působí pak na mechanickou soustavu obdobně jako periodické kmitání (obr. 4b).

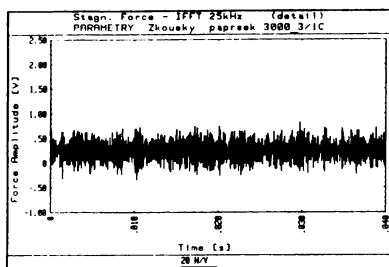
Navrženým řešením se podařilo dosáhnout v rozsahu minimálně do 20 kHz monotónní, a v souladu s teorií mírně exponenciálně stoupající frekvenčně-amplitudovou charakteristiku (obr. 4). Vzhledem k tomu, že frekvenční charakteristika v uvedeném rozsahu nevykazuje žádné excesy, je plně použitelná v celém rozsahu a umožňuje s výhodou využívat funkce I-M (Input Minus Memory) analyzátorů spekter, kdy je pak možno obdržet zcela vyrovnanou charakteristiku (viz obr. 4c).

Vlastní rezonanční kmitočet je přes 27 kHz. Činitel jakosti snímače, který byl stanoven z logaritického dekrementu útlumu vlastního rezonančního kmitočtu tlumeného kmitu, je pak cca 25.

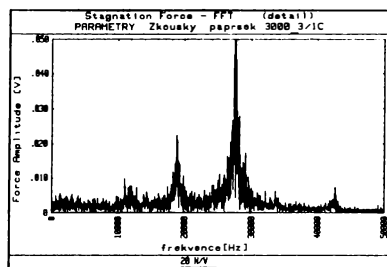
Příklady záznamu skutečných tlakových sil a jejich frekvenční charakteristika jsou uvedeny na obr. 5 a 6.

PODĚKOVÁNÍ

Autoři děkují Grantové agentuře České republiky za finanční podporu práce, která je předmětem tohoto článku, prostřednictvím projektů č. 202/93/2338 respektive 101/94/1429.



Obr. 5. Příklad záznamu skutečných tlakových sil od zastavení VVP.



Obr. 6. Frekvenční charakteristika záznamu z obr. 5.

LITERATURA

- Horák, Z., Krupka, F., Šindelář, V. 1954. Základy technické fyziky. Práce, Praha.
- Juliš, K., Brepta, R. a kol. 1987. Mechanika II. Dynamika. Technický průvodce sv. 66. SNTL, Praha.
- Obraz, J. 1976. Ultrazvuk v měřicí technice. Práce, Praha.
- Navrátil, M., Pluhař, O. 1986. Měření a analýza mechanického kmitání. Metody a přístroje. SNTL, Praha.

Miroslav Vala, Ing., CSc.¹

Libor Sitek, Ing.²

¹Ostravská Univerzita, Dvořákova 7, 701 03 Ostrava 1

Tel.: (069) 6222755, Fax: (069) 6222803, E-mail: vala@oudec.osu.cz

²Ústav geoniky AVČR, Studentská 1768, 708 00 Ostrava - Poruba

Tel.: (069) 6918651, Fax: (069) 6919452, E-mail: geonics@ugn.cas.cz