

„Výzkum kmitání lopatek vodní turbíny s ohledem na poskytnutí rozšířeného pásma regulace pro zajištění stability a bezpečnosti energetické soustavy“

Výzkumná zpráva

Měření vlivu výstupní hrany lopatky na vznik samobuzeného kmitání

Tvůrci výsledků: Prof. Ing. Václav Kopecký, CSc., Ing. Michal Kotek, PhD., Ing. Darina Jašíková, PhD., Doc. Ing. Pavel Rudolf, PhD.

V Liberci dne 30.12.2019

Podpis:

Měření proudění v okolí vetknuté lopatky - experimentální uspořádání

Na TUL byly v roce 2019 řešeny dvě základní části projektu popisující chování proudění v okolí lopatky. Nejprve probíhala pilotní měření na pracovišti TUL. Následně byly navržené metody nasazeny přímo na hlavní experimentální trati v laboratořích VUT. Zde již bylo zkoumáno chování několika typů navržených optimalizovaných lopatek s různými tvary odtokové hrany. Předpokládaný charakter proudění měl při odtrhávání proudu na odtokové hraně lopatky vybudit vibrace v lopatce. Tyto vibrace byly měřeny zároveň s proudovým polem.

Pro měření proudění vody v okolí lopatky byla zvolena metoda Time Resolved Particle Image Velocimetry (TR PIV). Tato metoda je založena na kvantitativní vizualizaci stopovacích částic unášených v proudu vody. Částice jsou ve sledované rovině ozářeny laserovým řezem z pulzního laseru Litron FDY300 s opakovací frekvencí 1000Hz. Scéna je následně snímána na vysokorychlostní digitální kameru. Pro každý záznam bylo vytvořeno 8000 snímků, z kterých se následně počítaly vektorové mapy proudu. Byla vytvořena celková statistika středního proudového pole, nicméně byly rovněž dále analyzovány jednotlivé okamžiky a jejich vektorové mapy pro identifikaci vírových struktur v proudu.

Experimentální zařízení společně s vetknutou lopatkou bylo navrženo a realizováno spoluřešiteli z VUT v Brně. Vzhledem k požadovaným průtokům kolem lopatky bylo nutné provádět měření proudových polí přímo u nich v laboratoři s napojením experimentálního zařízení na výkonné místní technologie. Měřicí systém TR PIV byl synchronizován s generálním spouštěcím signálem. Tento signál byl zaveden do všech využitých měřicích zařízení pro sledování průtoků, tlaků a vibrací lopatky. Proudové pole a vírové struktury je tak nyní možné přiřadit ke konkrétním hodnotám a stavům sledovaného děje. Předpokládaným problémem pro použití metody PIV se jevilo nasycení značného objemu vody v experimentálním okruhu. Vzhledem k potřebnému plnění jednotlivých potrubí a přepouštěcích nádrží pro odčerpání vody během výměny lopatky dosahoval objem vody v celém okruhu 20 000 litrů. Pro toto množství byly namíchány základní částice z polyamidu o velikosti 50 μ m. Při seřizování a pilotních testech PIV systému na okruhu byla ve vodě zjištěna přítomnost částic rzi. Provozní voda je v okruhu využívána opakovaně delší dobu, okruh je tvořen ocelovým potrubím. Během provozu se vnitřní stěny potrubí odlupují a kousky rzi putují okruhem. Na čerpadlech a dalších prvcích okruhu jsou pak průběžně rozmělněny. Při studiu vody z okruhu pod mikroskopem bylo potvrzeno, že částice rzi dosahují žádané velikosti 20 μ m - 50 μ m a samy od sebe tvoří ideální stopovací částice. Rovněž koncentrace částic byla napuštěním vhodného objemu čisté vody optimalizována. Pevné šupinky rzi dokáží ideálním způsobem rozptylovat laserové světlo a poskytují tak vhodný signál pro kamery a následné PIV zpracování.

TR PIV byl v laboratoři VUT sestaven tak, by umožňoval zachycení proudového pole v těsné blízkosti lopatky a dále za ní po proudu vody. Měřicí prostor byl vyroben z průhledného polykarbonátu s optickým přístupem ze třech stran. Zadní stěna byla ponechána neprůhledná kovová. V této stěně byla vetknuta lopatka, včetně mechanismu jejího naklápění. Vrchní stěna obsahovala přípojný bod pro tlakové senzory, proto byl laserový řez zaveden přes optická zrcátka ze spodu. Kamera pak sledovala scénu z čelního pohledu.

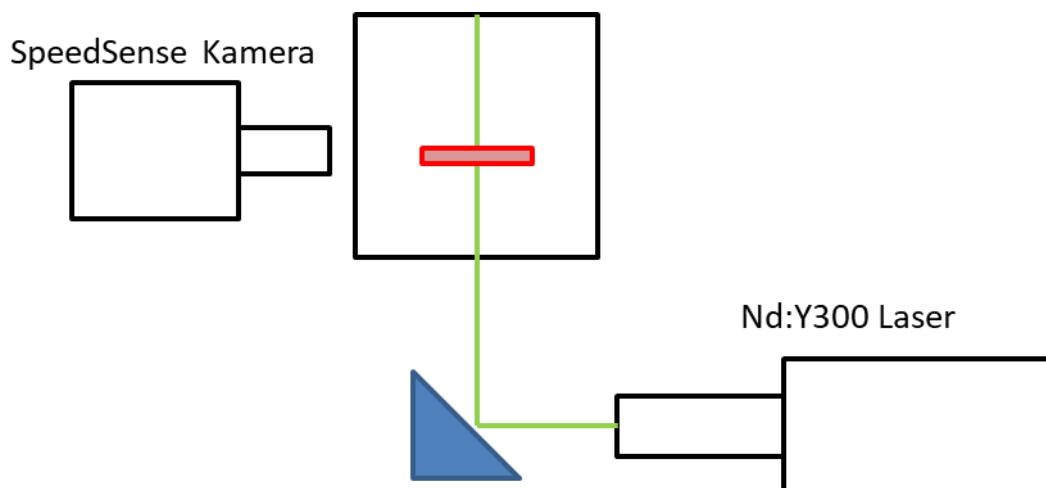
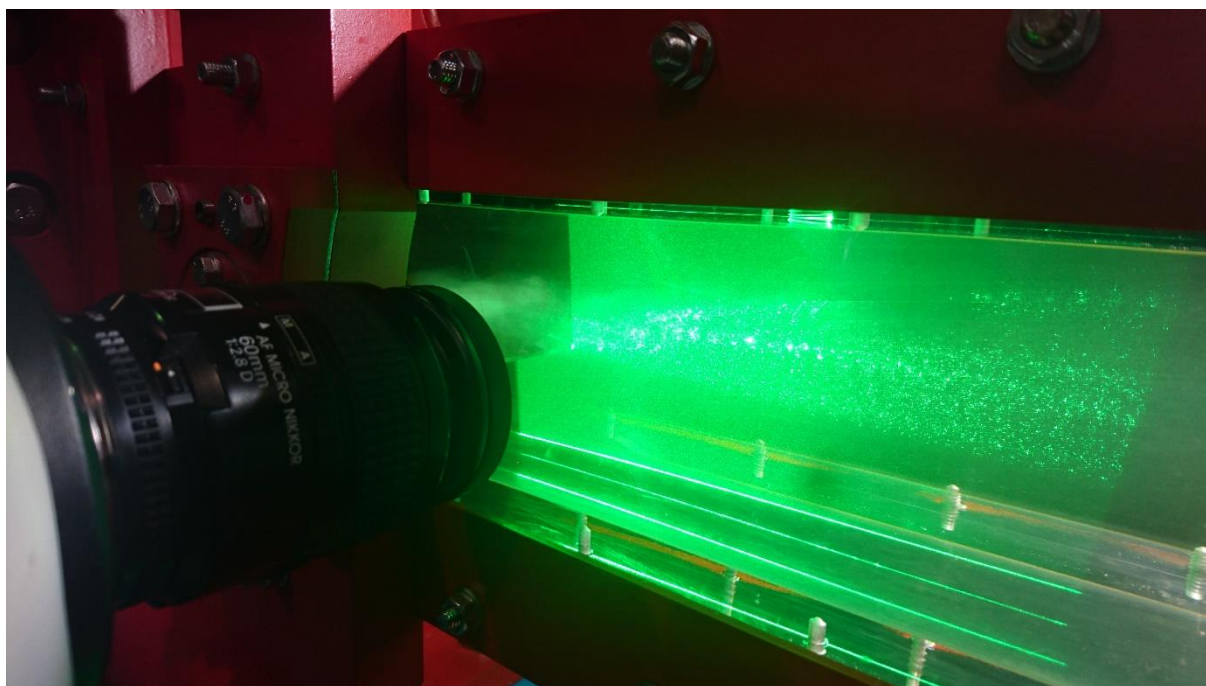


Schéma měření systémem Time Resolved PIV

Proudové pole bylo měřeno v ose vyšetřované oblasti, odpovídající i středu lopatky. Zde je výsledné proudové pole idealizováno jako dvoudimenzionální. Složku kolmou na laserový řez zanedbáváme.

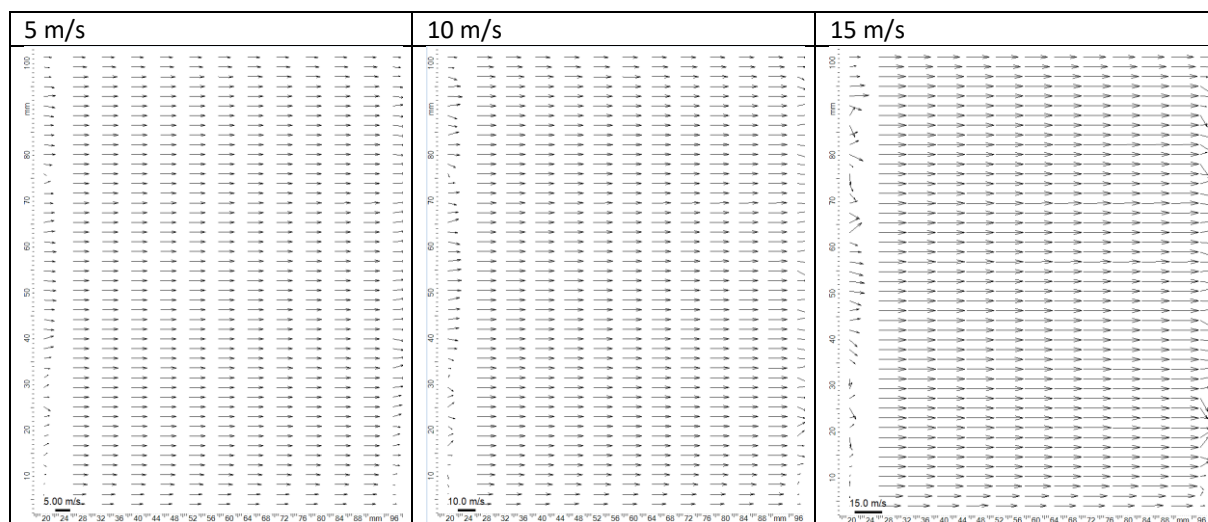


Vizualizace měření proudového pole v okolí lopatky systémem Time Resolved PIV

Měření proudění v okolí vetknuté lopatky - výsledky měření

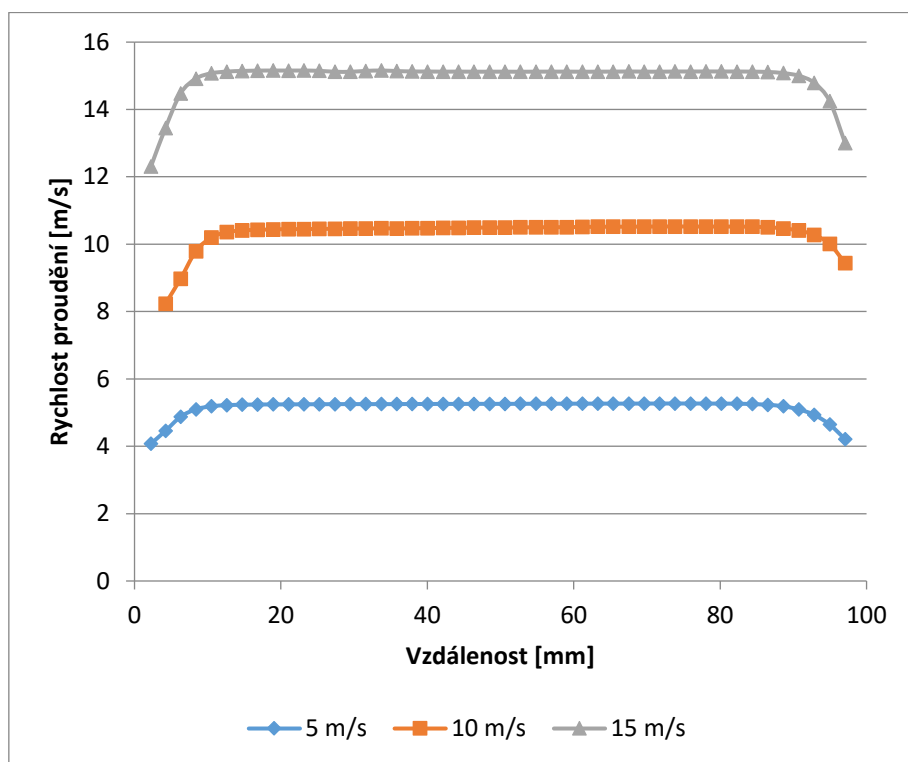
K měření bylo připraveno šest základních typů lopatek vyrobených v Litostroj Engineering a na VUT v Brně. Lopatky byly postupně proměřeny metodami TR PIV i souběžně laserovým vibrometrem a tlakoměry.

První měření měla za úkol popsat proudové pole v celé měřicí oblasti a to při náběhu na lopatku. Zde bylo sledováno, jestli vlivem potrubí není proudové pole nějakým způsobem deformováno a zda na lopatku nabíhá symetricky. V opačném případě by mohlo dojít k nesteromernému přilnutí a odtrhnutí proudu na lopatce.



Vektorová mapa proudění na vstupu do měřicí oblasti

Na proudovém poli na obrázku výše je potvrzena symetrie vstupního proudu. Tu prokazují i symetrické proudové profily při jednotlivých rychlostech na dalším grafu.

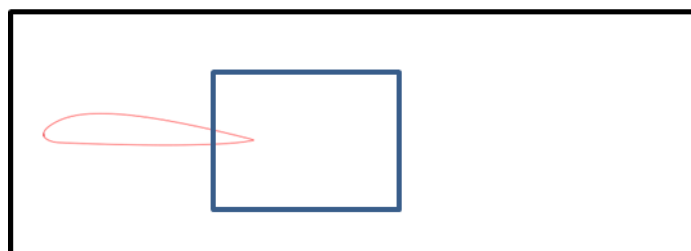


Rychlostní profily proudu na vstupu do měřicí oblasti

Nyní lze tedy sledovat chování proudu v okolí samotné lopatky a vírové struktury po jeho odtržení.

Další měření detailu vírových struktur za lopatkou byla provedena v detailním pohledu středové oblasti za odtrhovou hranou lopatky. Nejsou zde zaznamenány okrajové oblasti vyšetřované oblasti, kde je proudění lopatkou ovlivněno zcela minimálně. Vzhledem k tomu, že prostorové rozlišení systému PIV je omezené a závislé na použité kameře, byla dána přednost přesnějšímu proměření detailu vírových struktur před celkovým pohledem. Velikost a umístění vyšetřované oblasti je na následujícím nákresu.

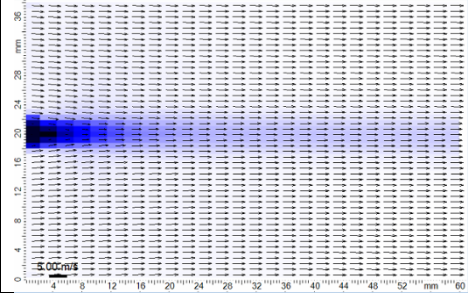
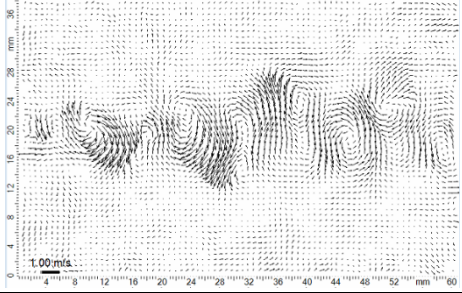
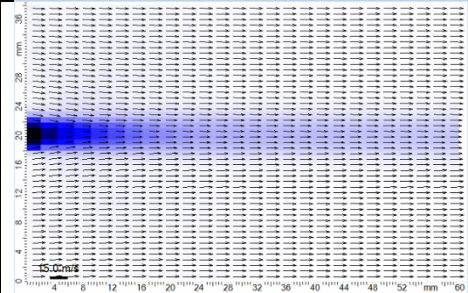
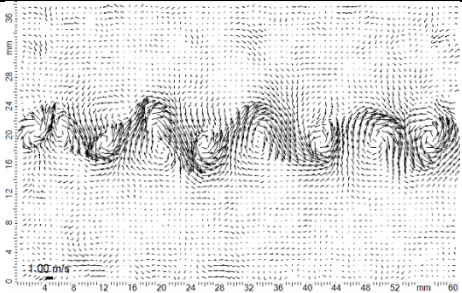
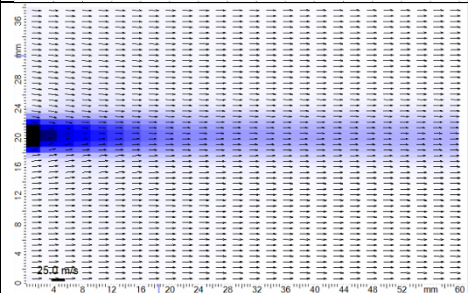
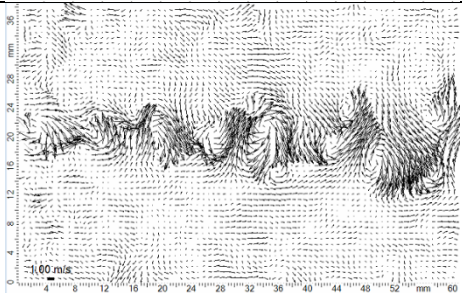
Vyhodnocovaná oblast (60x37) mm



Rozměry a umístění měřené oblasti v detailu za lopatkou

První měřená lopatka nesla označení ČKD01. Proudové pole je vykresleno pro tři základní vstupní rychlosti proudu 2,5 m/s, 7,5 m/s a 12,5 m/s. Bylo opět snímáno 8000 záznamů se snímkovací frekvencí 1 kHz. Jednotlivé vektorové mapy byly validovány a z nich bylo vypočteno střední proudové pole. Toto proudové pole je znázorněno vždy na levých obrázcích. Pro zřetelnější reprezentaci vírových struktur putujících po odtržení proudem byla z vektorové mapy z každého vektoru odečtena hlavní translační

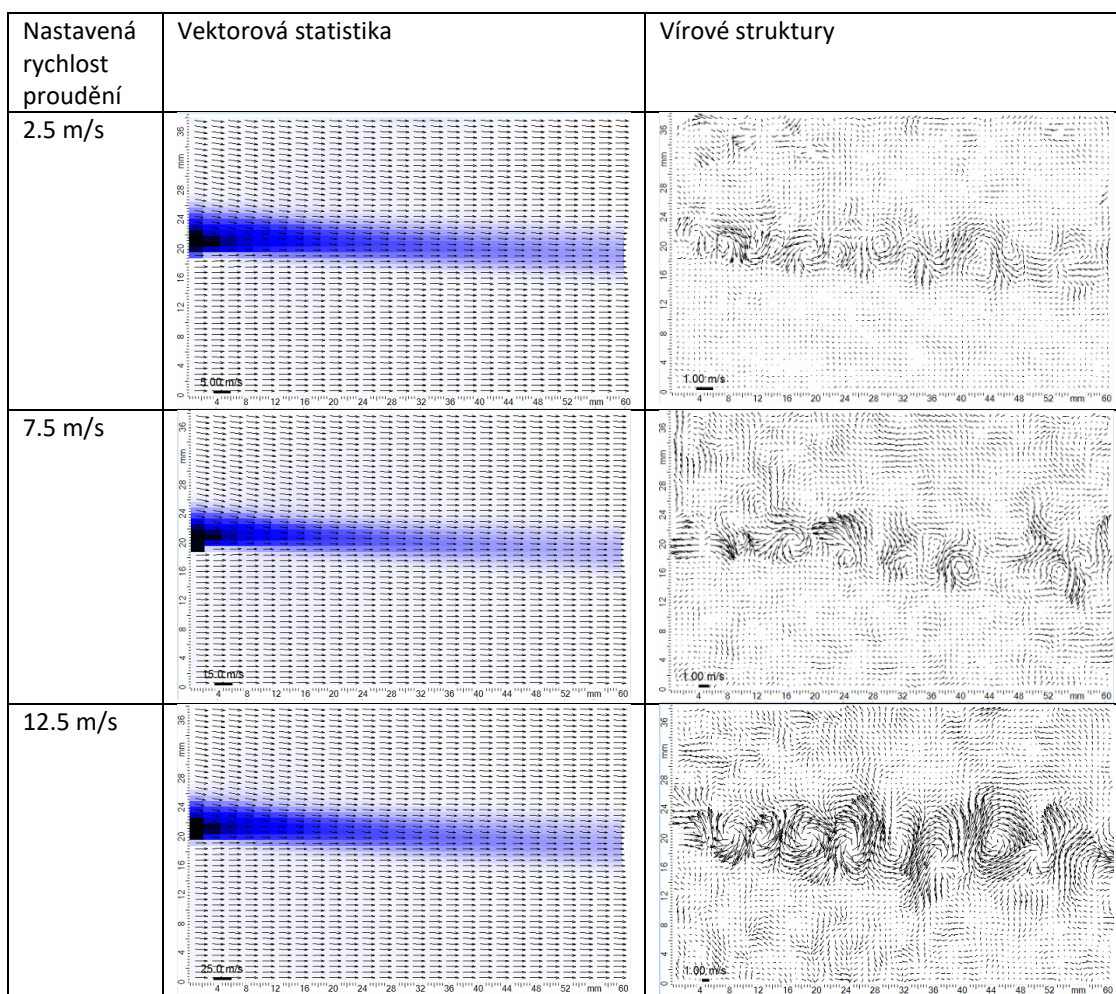
rychlost. Tato rychlost je vypočtena jako průměrná hodnota v oblasti mimo ovlivnění proudu lopatkou. Po odečtení jsou putující vírové struktury znázorněny na obrázcích v tabulce vpravo.

CKD 01, 0 st, 2 Bar		
Nastavená rychlost proudění	Vektorová statistika	Vírové struktury
2.5 m/s		
7.5 m/s		
12.5 m/s		

Střední proudová pole vlevo a odečtená proudová pole o translační rychlost pro znázornění vírových struktur vpravo, úhel náběhu 0°, lopatka ČKD01

Na vektorových mapách je jasný trend zesilování se vlivu vírových struktur a jejich ovlivnění proudu se zvyšující se rychlostí (průtokem). Zesilující se průvodní zvukový vjem kmitající lopatky rovněž potvrzoval zintenzivnění vírových struktur přímo úměrné na rychlosti proudění.

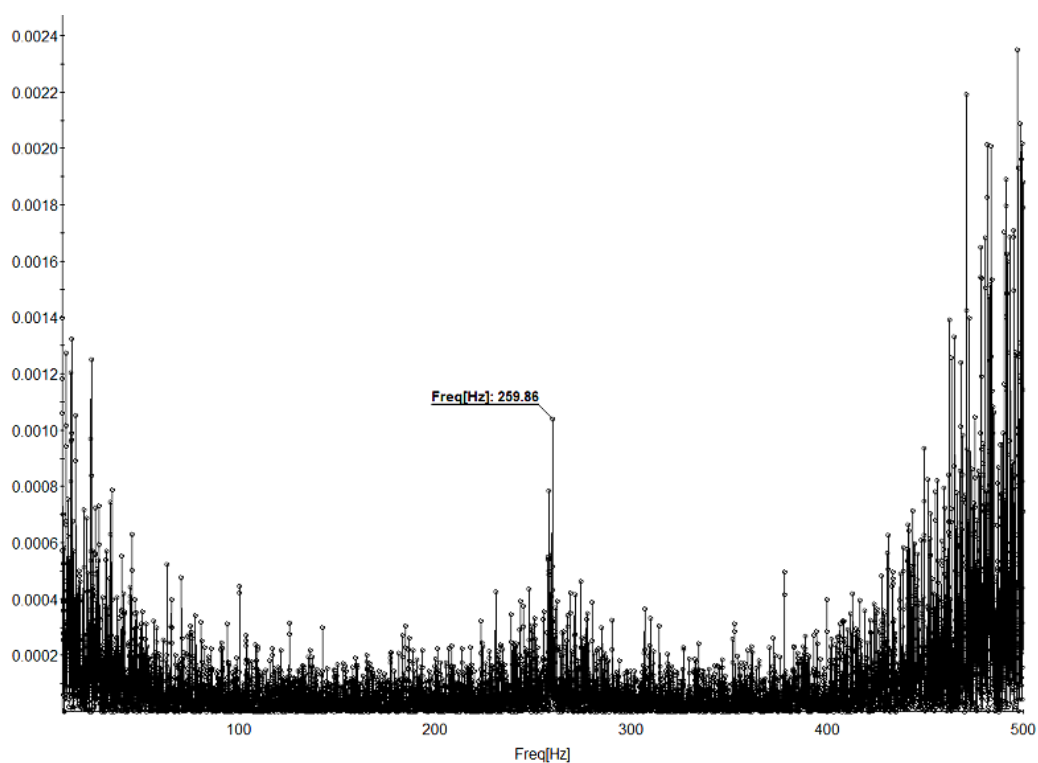
Výše znázorněné výsledky popisují proudová pole a vírové struktury při náběhovém úhlu lopatky 0°. Dále byla proudová pole měřena i při úhlu náběhu 5°. Výsledky tohoto měření pro lopatku ČKD01 ukazuje následující série výsledků.



Střední proudová pole vlevo a odečtená proudová pole o translační rychlost pro znázornění vírových struktur vpravo, úhel náběhu 5°, lopatka ČKD01

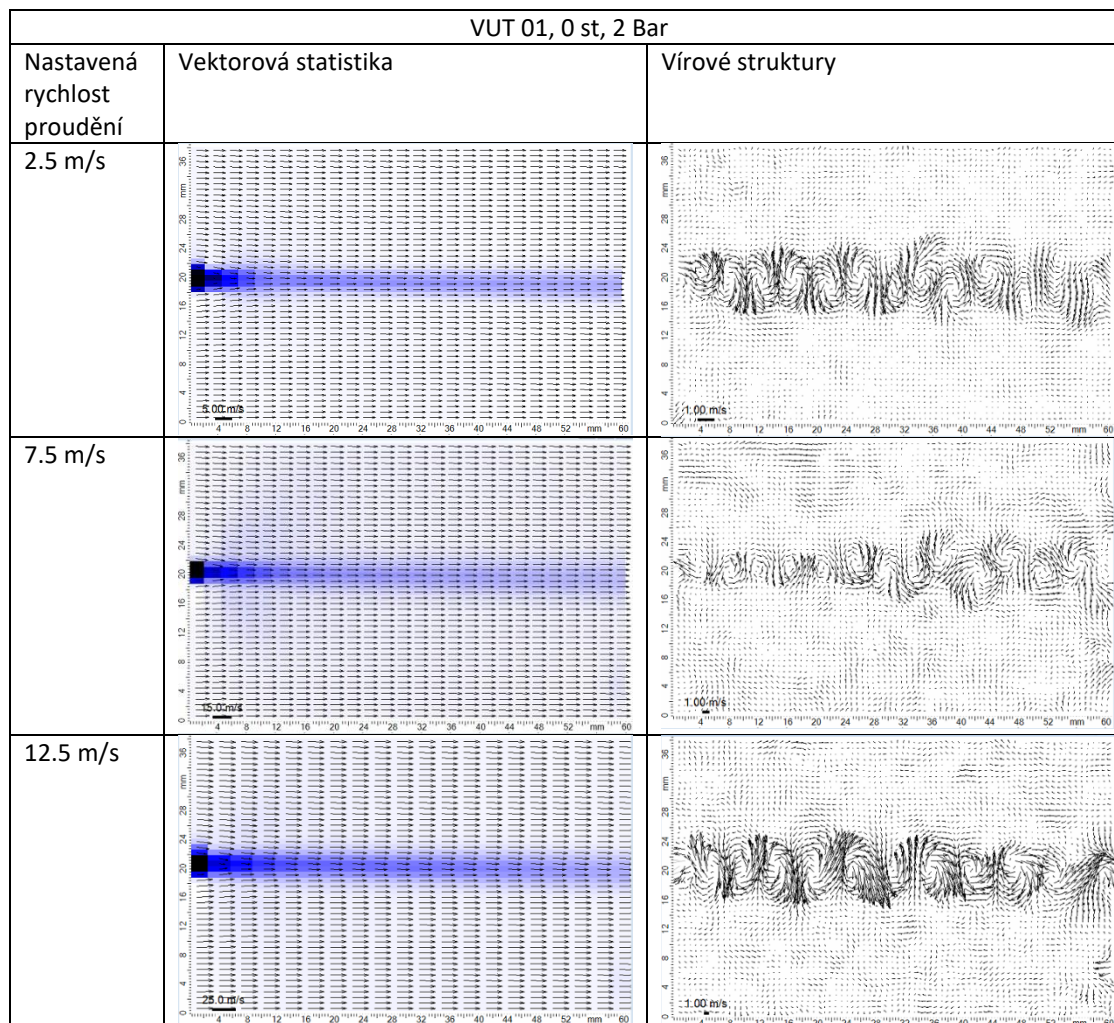
Z výsledku je patrné ovlivnění proudu nakloněnou lopatkou a to zejména vychýlení směru proudu a vírových struktur ve směru naklopení lopatky.

Data nasbíraná snímací frekvencí 1kHz byla podrobena základní frekvenční analýze. Ta zjišťovala frekvenci průchodu vírových struktur oblastí 2mm za odtrhovou hranou lopatky. Výsledek frekvenční analýzy je na následujícím grafu. V měřeném režimu lopatky ČKD01 při nulovém úhlu natočení a minimální rychlosti proudění vody byly vypočteny dominantní frekvence. Graf z principu obsahuje některé velmi nízké frekvence do 30Hz i vysokofrekvenční struktury blíží se limitu nyquistova teorému 500Hz při 1kz snímání. Zde byla identifikována významná frekvence na úrovni 253Hz. S touto frekvencí pak následně i dominantně vibruje sledovaná lopatka.



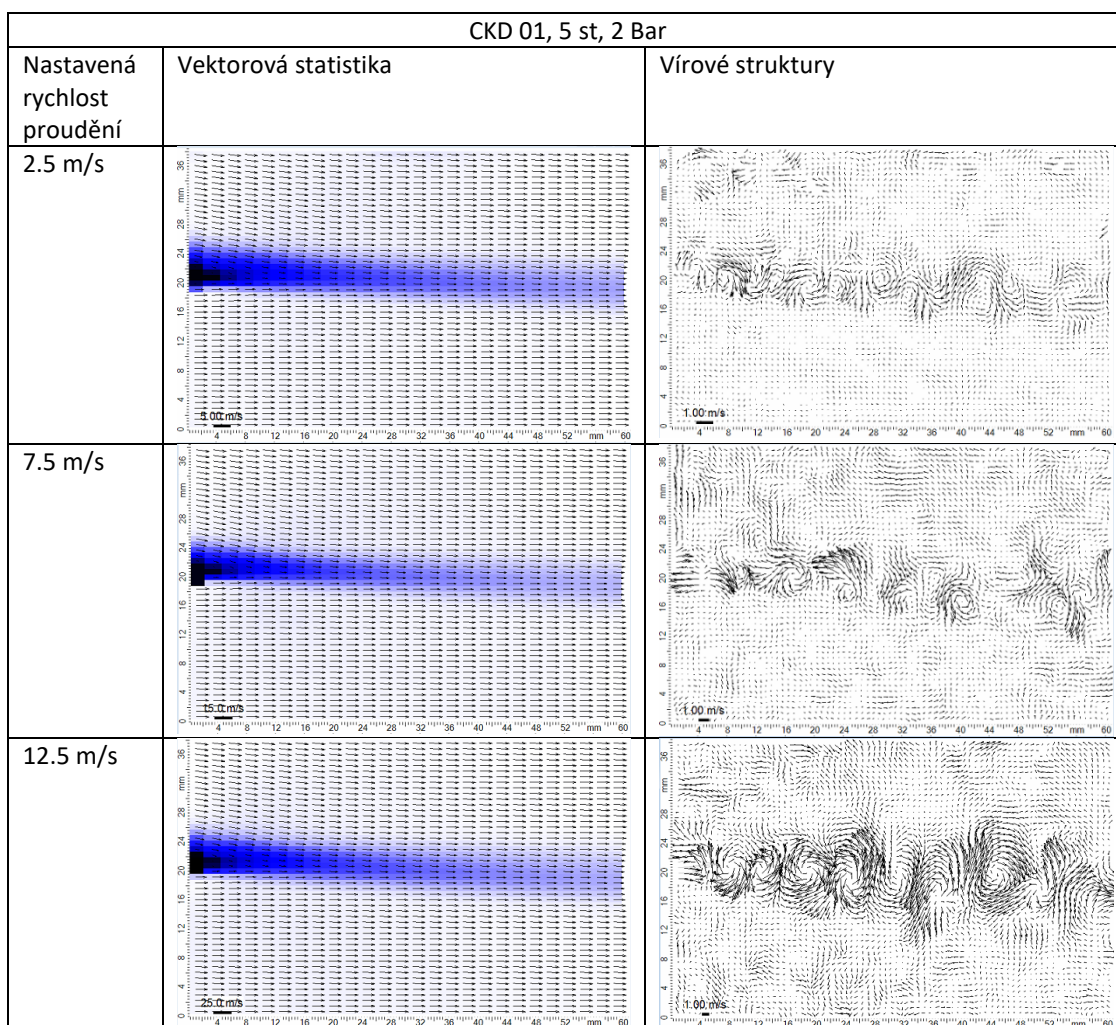
Frekvenční analýza odtrhávajících se vírových struktur za lopatkou ČKD01 při rychlosti 2,5m/s a úhlu náběhu 0°

Další významnou sledovanou lopatkou, jejíž proudová pole jsou prezentována v této zprávě je typ VUT01. Lopatka byla vyvinuta na pracovišti VUT pro potlačení vzniku víření a vibrací. První série opět ukazuje změřená proudová pole při úhlu náběhu 0° .



Střední proudová pole vlevo a odečtená proudová pole o translační rychlost pro znázornění vírových struktur vpravo, úhel náběhu 0° , lopatka VUT01

Po odečtení dominantních translačních rychlostí jsou opět jasnější putující vírové struktury na vektorových mapách vpravo. Pro tuto optimalizovanou lopatku se výrazně menší mírou projevují vírové struktury do hlavního proudu a z toho i plynoucího rozkmitání lopatky. Vírové struktury jsou potlačeny pro všechny sledované rychlosti.



Střední proudová pole vlevo a odečtená proudová pole o translační rychlost pro znázornění vírových struktur vpravo, úhel náběhu 5°, lopatka VUT01

Obdobný trend výsledků lze vyvodit z měření lopatky VUT01 při úhlu náběhu 5°. Vznikající vírové struktury jsou opět v porovnání s lopatkou ČKD01 menší, míň ovlivňující proudové pole i vibrace lopatky. Proudové pole i směr odtržených vírových struktur odpovídá naklonění lopatky.

Zde uvedené vektorové mapy a charakter struktur odpovídá ukázce pouze několika základních měřených režimů. Měření však probíhala v rámci předepsané tabulky měřicích režimů. V tabulce jsou jako hlavní parametry předepsány především tvar lopatek, úhel náběhu lopatky, tlakování celého okruhu (parametr sigma) a průtok potažmo rychlosti proudící vody. Všechna provedená měření jsou zpracována do formy matic rychlostí a předána dalším řešitelům projektu pro porovnání s numerickými modely, vyhodnocení dynamických a frekvenčních parametrů proudění. Dále pak tato data proudových parametrů budou korelována s výsledky dalších mechanických analýz tlaků a vibrací.

Lopatka ČKD01	Úhel náběhu 0°	Přetlak 2bar	2.5m/s; 5m/s; 7.5m/s; 10m/s; 12.5m/s;15m/s; 17.5 m/s
	Úhel náběhu 5°	Přetlak 2bar	2.5m/s; 5m/s; 7.5m/s; 10m/s; 12.5m/s
		Sigma 0.013; 0.015	5m/s
		Sigma 0.06; 0.07; 0.08	7.5m/s
		Sigma 0.022; 0.025	10m/s
		Sigma 0.6; 0.45	12.5m/s
Lopatka ČKD06	Úhel náběhu 0°	Přetlak 2bar	2.5m/s; 5m/s; 7.5m/s; 10m/s; 12.5m/s;15m/s; 17.5 m/s
	Úhel náběhu 5°	Přetlak 2bar	2.5m/s; 5m/s; 7.5m/s; 10m/s; 12.5m/s
		Sigma 0.011; 0.012	5m/s
		Sigma 0.55; 0.055; 0.065	7.5m/s
		Sigma 0.16; 0.18; 0.22;	10m/s
		Sigma 0.38; 0.44; 0.51;	12.5m/s
Lopatka VUT01	Úhel náběhu 0°	Přetlak 2bar	2.5m/s; 5m/s; 7.5m/s; 10m/s; 12.5m/s;15m/s; 17.5 m/s
	Úhel náběhu 5°	Přetlak 2bar	2.5m/s; 5m/s; 7.5m/s; 10m/s; 12.5m/s
Lopatka strukturovaná	Úhel náběhu 0°	Přetlak 2bar	2.5m/s; 5m/s; 7.5m/s; 10m/s
	Úhel náběhu 5°	Přetlak 2bar	2.5m/s; 5m/s; 7.5m/s; 10m/s

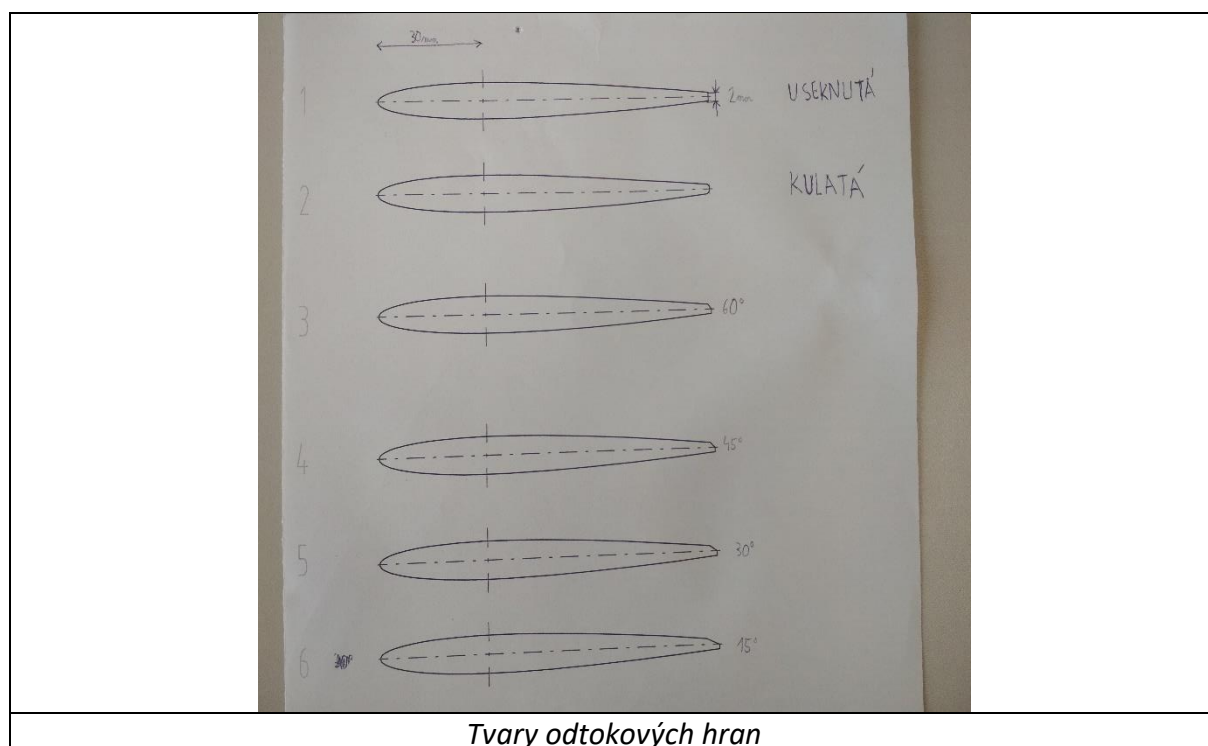
Přehled provozních režimů a provedených měření

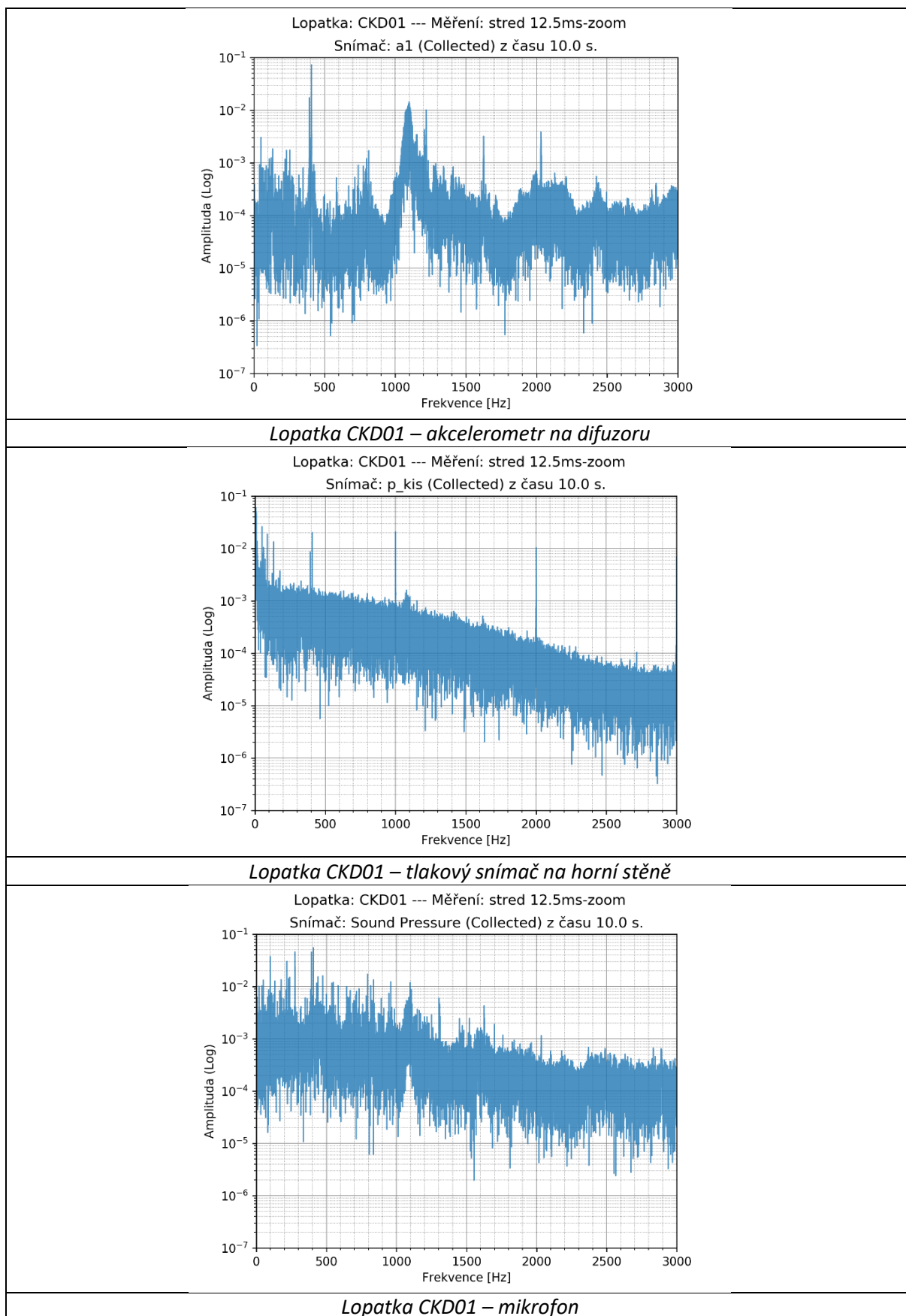
Synchronizovaně s PIV měřením rychlostního pole byly snímány vibrace a tlakové pulzace. Byly použity 4 na sobě nezávislé metody:

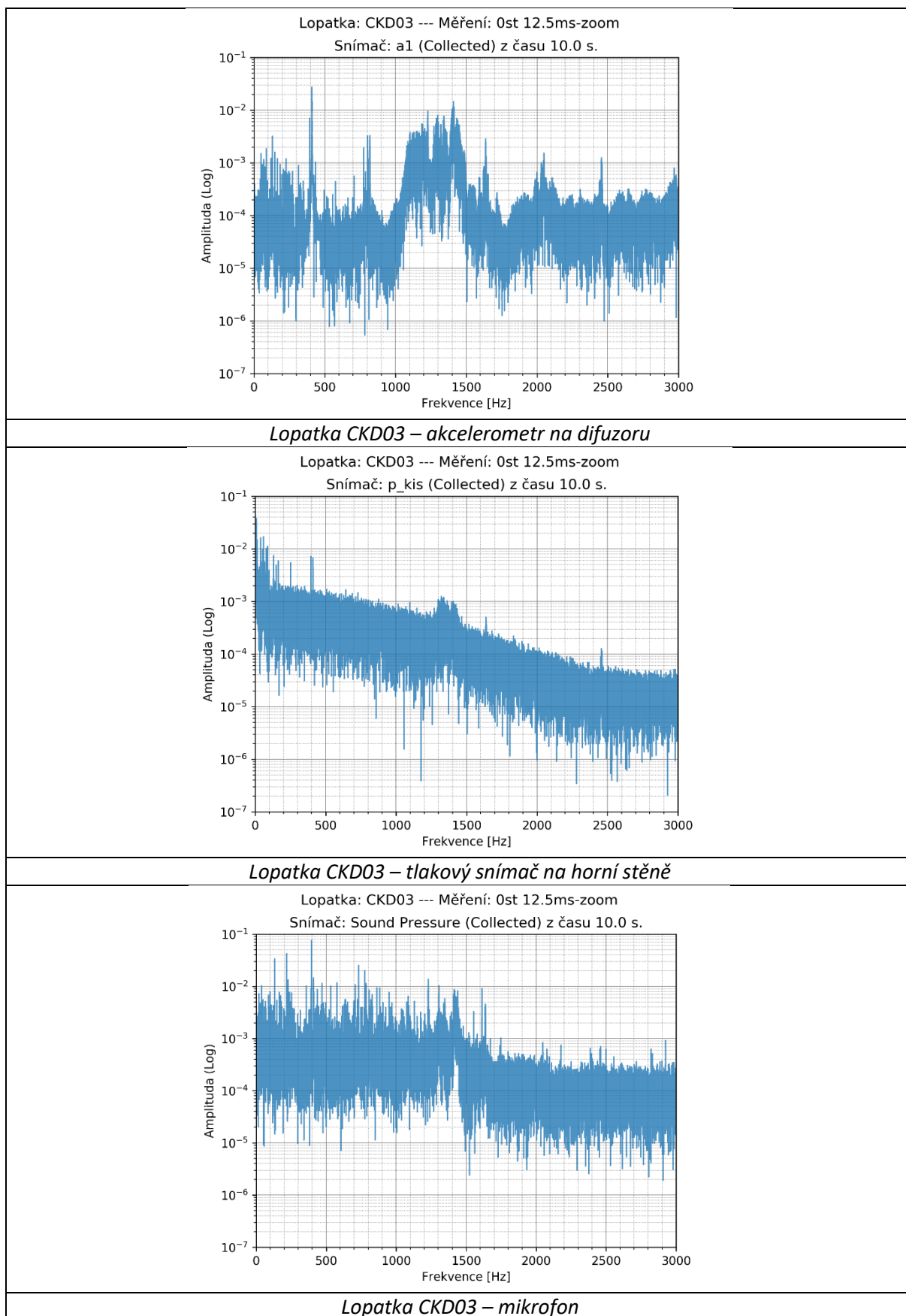
laserový bezkontaktní vibrometr (pouze pro některé lopatky) snímající přímo rychlost kmitání povrchu lopatky (použit pouze pro některé lopatky), akcelerometr snímající chvění difuzoru hned za měrnou sekci, tlakový snímač Kistler umístěný na horní stěně měrné sekce ve vzdálenosti 100 mm za odtokovou hranou lopatky a mikrofon snímající hluk emitovaný chvějící se lopatkou.

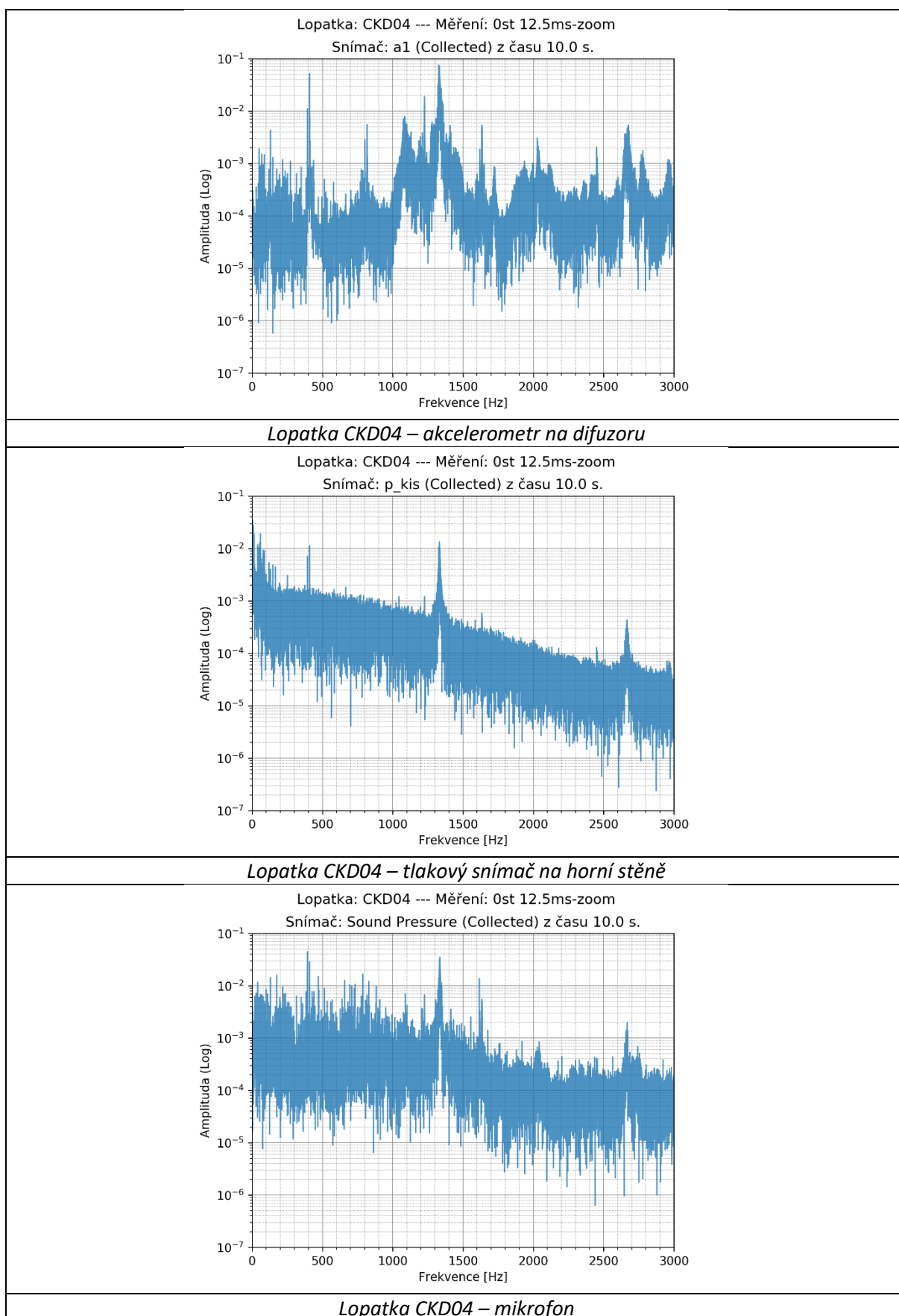
Výsledky ve formě frekvenčních spekter pro lopatky ČKD 01, 03, 05 a 06 jsou na následujících obrázcích. Jako reprezentativní byla vybrána nátoková rychlost 12,5 m/s.

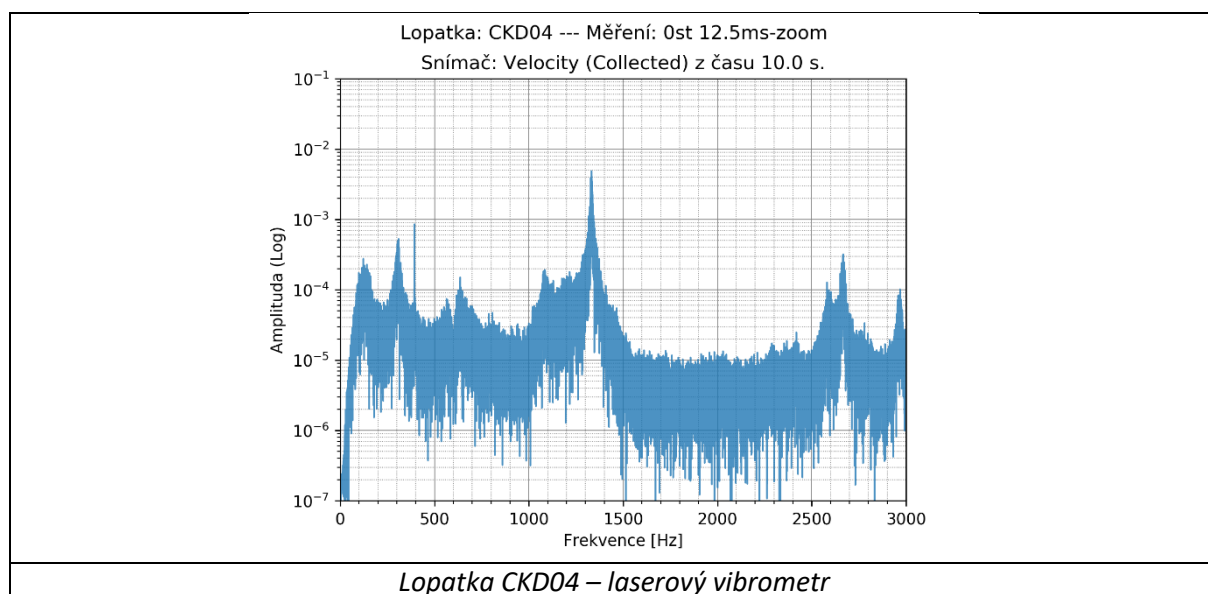
Kromě toho byly proměřovány i kavitační režimy a vliv náklonu lopatky o 5 úhlových stupňů. Vzhledem k rozsahu měření (počet lopatek a typů odtokových hran, rychlosti od 0 do 20 m/s, 4 typy snímačů, několik kavitačních režimů, úhel náběhu 0 a 5 stupňů) bylo získáno obrovské množství dat, která zatím nebyla všechna vyhodnocena.

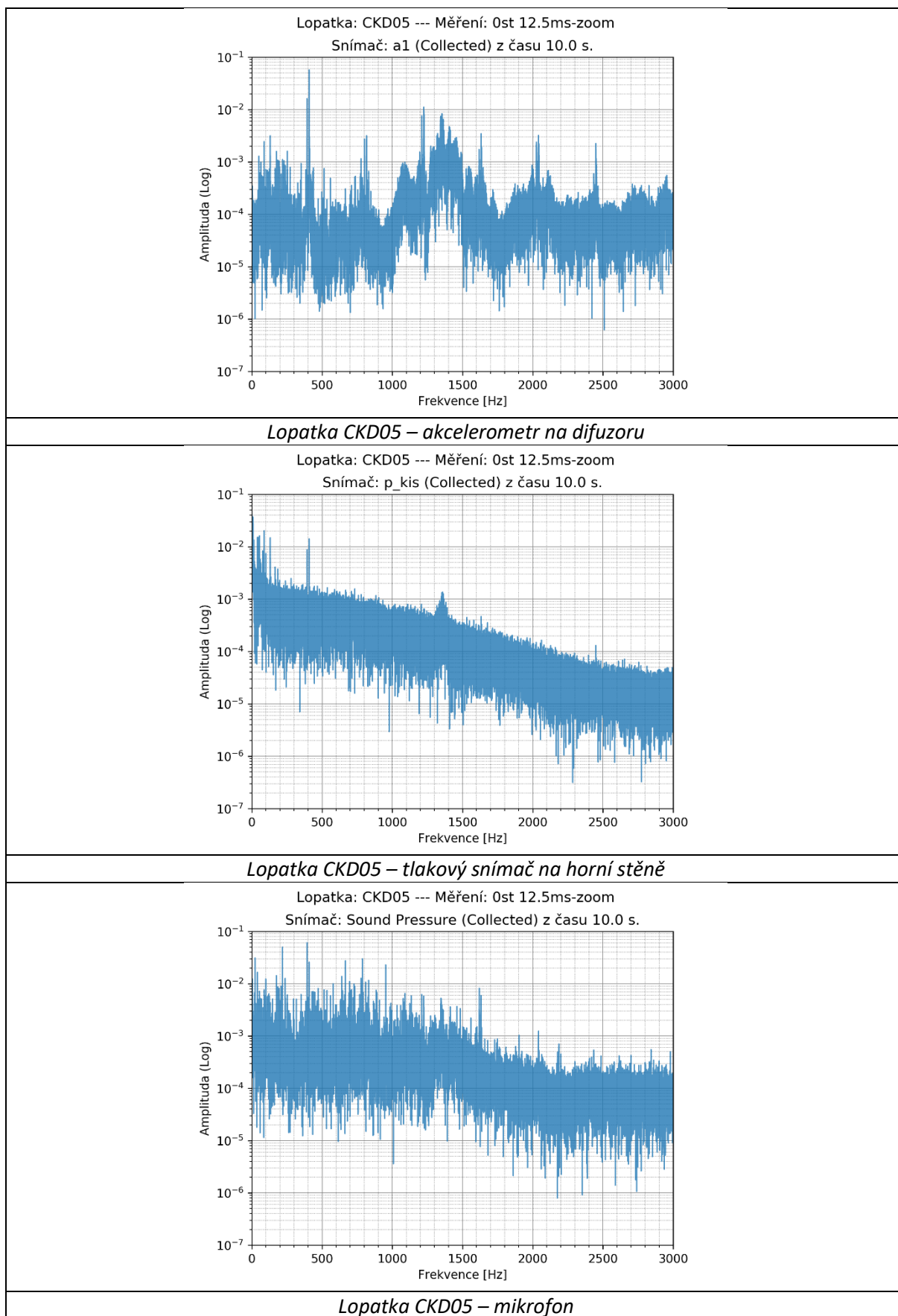


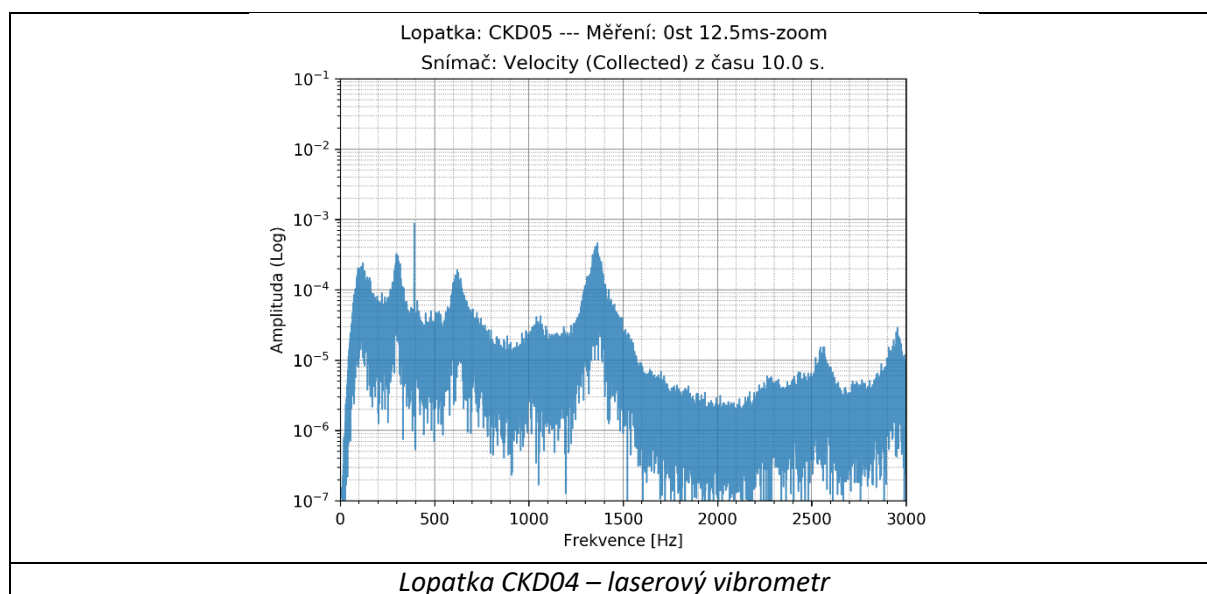


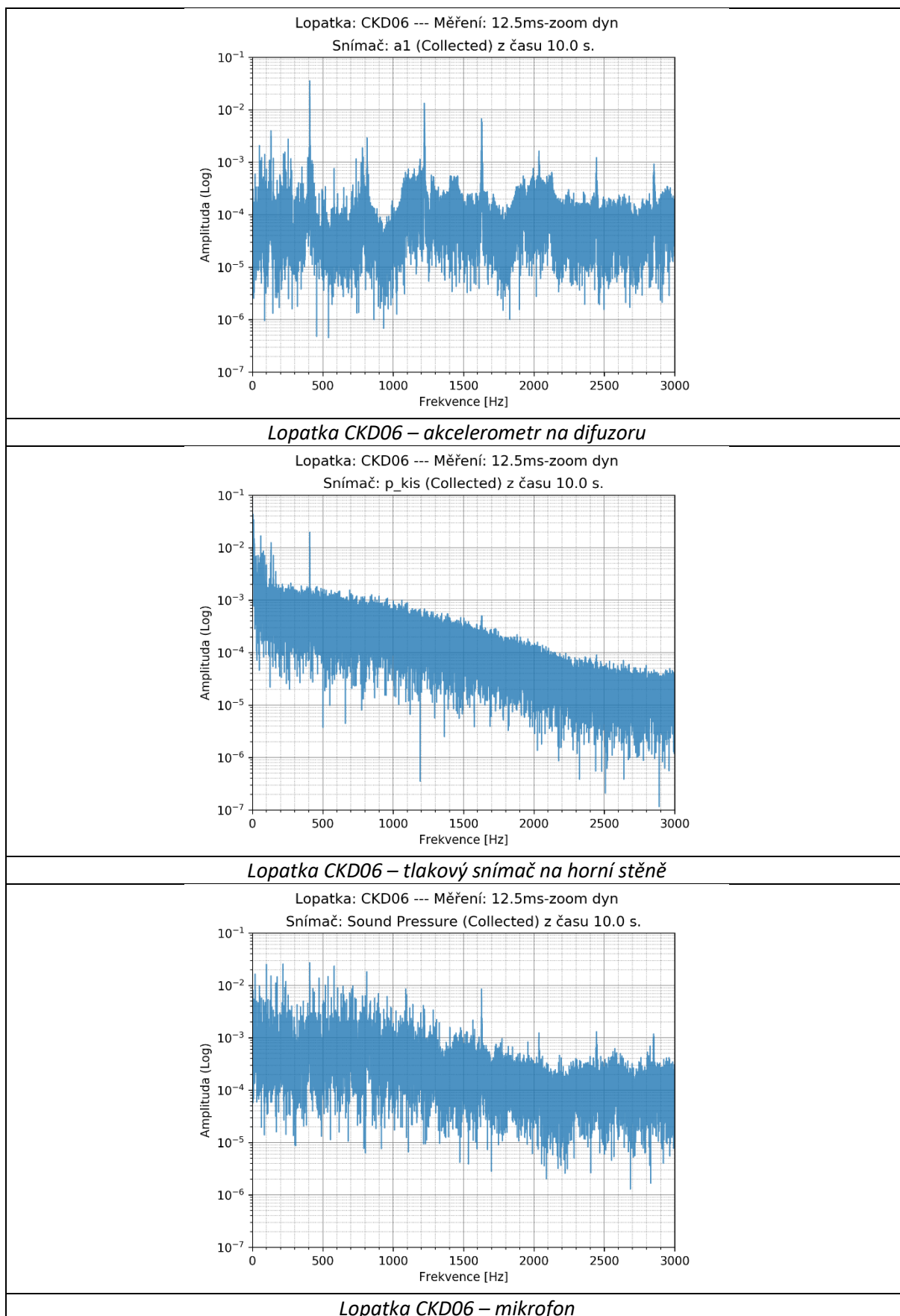












Charakteristická frekvence odtrhávání Kármánových vírů pro $v = 12,5$ m/s se nachází mezi 1000 a 1500 Hz a je závislá na tvaru odtokové hrany.

- zkosení odtokové hrany ze 45 na 30 stupňů přináší podstatné snížení amplitudy vibrací
- nejcitlivějším snímačem je laserový bezkontaktní vibrometr
- tlakový snímač je nejméně spolehlivým způsobem snímání vibrací
- pro korektní posouzení frekvenčních spekter a detekci peaků z akcelerometru, tlakového snímače a mikrofonu je doporučeno srovnání se spektrem z laserového vibrometru