

Odborná zpráva o řešení projektu TAČR „Výzkum kmitání lopatek vodní turbíny s ohledem na poskytnutí rozšířeného pásma regulace pro zajištění stability a bezpečnosti energetické soustavy“ za rok 2018

Zpráva za spoluřešitele Technická univerzita v Liberci

Tvůrci výsledků: Prof. Ing. Václav Kopecký, CSc., Ing. Michal Kotek, PhD., Ing. Darina Jašíková, PhD., Ing. Jiří Primas, PhD., Ing. Michal Malík, PhD.

Měření samobuzeného kmitání elastické lopatky v nekavitujícím proudění

Měření proudění v okolí vetknuté lopatky

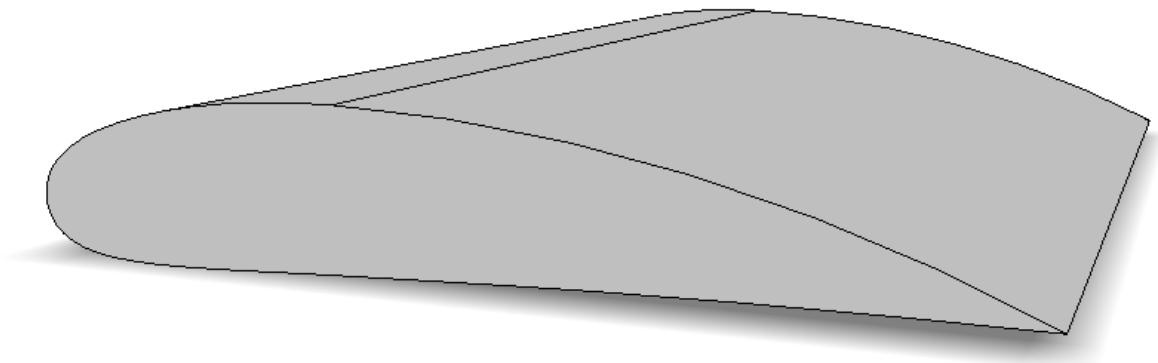
Na TUL byly v roce 2018 prováděny experimentální činnosti popisující chování proudění v okolí lopatky. Nadále byla rozvíjena metodika pro vyhodnocení pohybu kmitající lopatky v proudu. Činnosti navázaly na přípravné práce z roku 2017. Proudové pole v okolí lopatky bylo proměřeno metodou Time Resolved PIV. Jedná se o obdobu klasické metody PIV, kde snímkovací frekvence dosahuje řádově tisíce Hertz. Takto rychlý záznam umožňuje zachytit pohyb lopatky vybuzený proudem.

Měření probíhala v hydrodynamickém tunelu připojeném na čerpadlo Meta-Plus 125-80-NHD-250. Toto čerpadlo je schopné zásobovat trať maximálním průtokem 25l/s s výtlačnou výškou 40m. Čerpadlo je řízeno frekvenčním měničem, takže zajišťuje dodávku vody dle zvolených parametrů a požadovaného režimu provozování vodní tratě. Čerpadlo bylo zabudováno do základního zásobovacího okruhu napojeného na zásobovací vodní nádrž s objemem 1600l. Základy tohoto okruhu byly v laboratoři zbudovány již dříve, je však nutné je vždy přizpůsobit aktuální aplikaci a dobudovat příslušné potrubí, včetně redukci a zapojení měřeného ústrojí do okruhu. Součástí okruhu je soubor základních měřicích čidel. Tato čidla poskytují základní informace o parametrech proudění – průtok, tlaky v jednotlivých místech tratě a teplotě proudící vody.



Základní vodní okruh s čerpacím ústrojím Meta-Plus

Pro potřeby měření a návrhu metodiky na sledování kmitajících lopatek byla navržena a vyrobena standardní lopatka tvaru Naca 4412. Lopatka byla následně vytisknuta metodou Rapid Prototyping na 3D tiskárně z polyuretanu. Materiál byl volen s ohledem na požadavek nízké tuhosti, kdy bude možné již při menších průtocích a silách na lopatku možné vybudit její kmitání. V tomto kroku šlo především o přípravu metodiky měření kmitání a proudových polí v okolí lopatky. Po zdokonalení těchto měřicích metodik bude možné nalezené postupy aplikovat na reálné a optimalizované lopatky dodané partnery projektu.



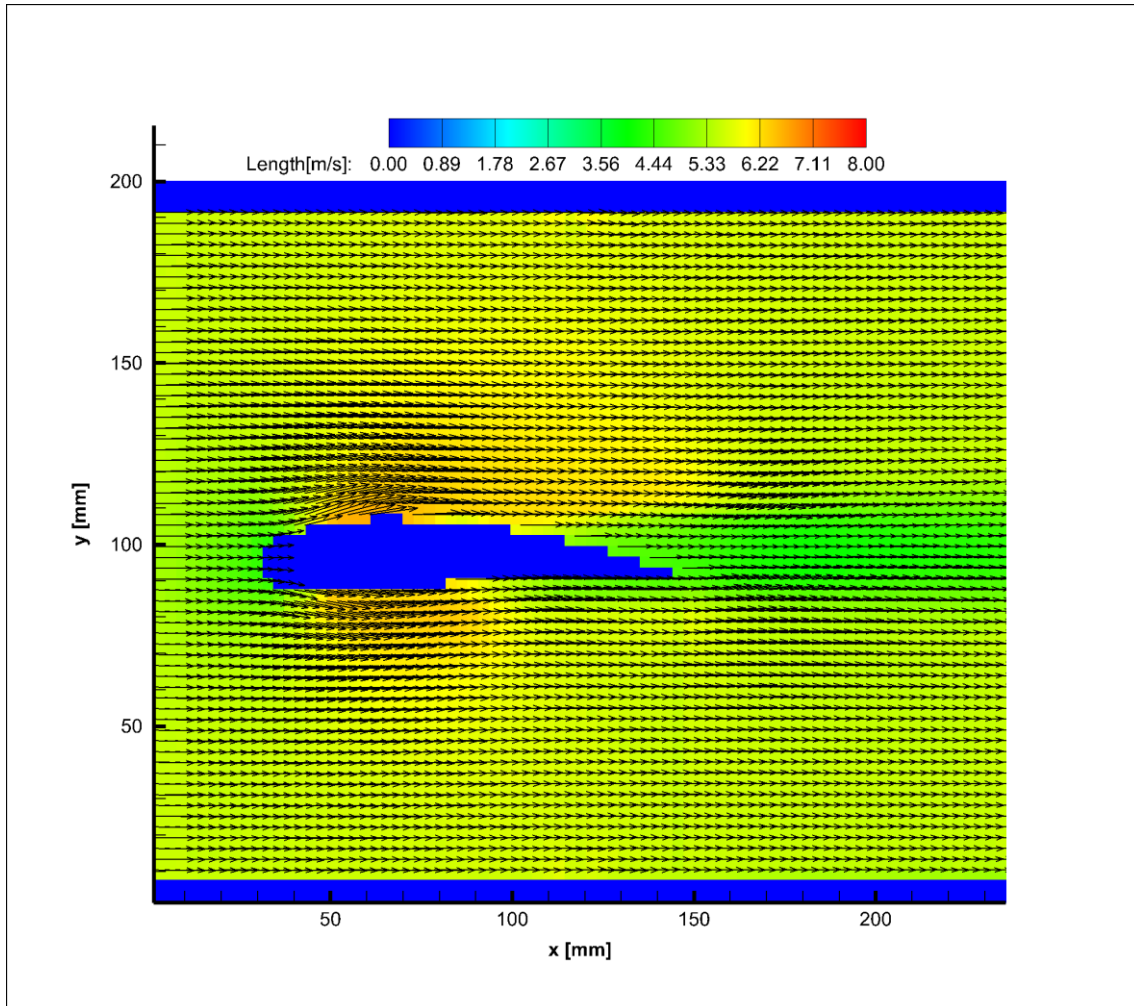
Použitý profil lopatky Naca 4412

Lopatka byla zkrácena pro zabudování do potrubí s DN 50mm tak, aby procházela stěnou a byla do ní pevně vetknuta vlepením. Druhá strana lopatky je volně v prostoru. Na volné straně lopatky probíhalo následně i měření vibrací. Lopatka je umístěna do průhledného potrubí, aby byl zajištěn optický přístup pro měření metodou PIV. Kamera sledovala scénu z boku, pravouhle byl prostor kolem lopatky nasvícen laserovým řezem. Laser umístěný z vrchu byl pod spodní stranu lopatky (do stínu) zaveden pomocí soustavy odrazných zrcadel. Tím bylo zajištěno nasvícení celé sledované scény.



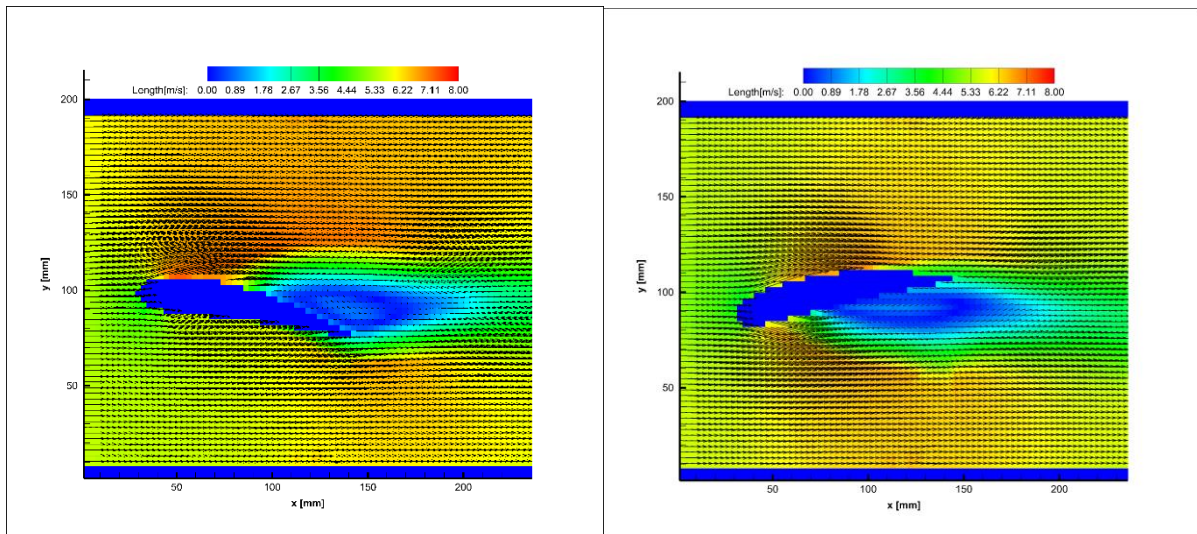
Vyrobená lopatka vetknutá pevně na jedné straně do stěny potrubí

Proudění v okolí lopatky bylo měřeno v několika režimech při různých úhlech náběhu. Zde prezentované výsledky ukazují proudové pole při naklonění 0° , -10° a $+10^\circ$. Náběhová rychlost vody v trati dosahovala 5m/s.



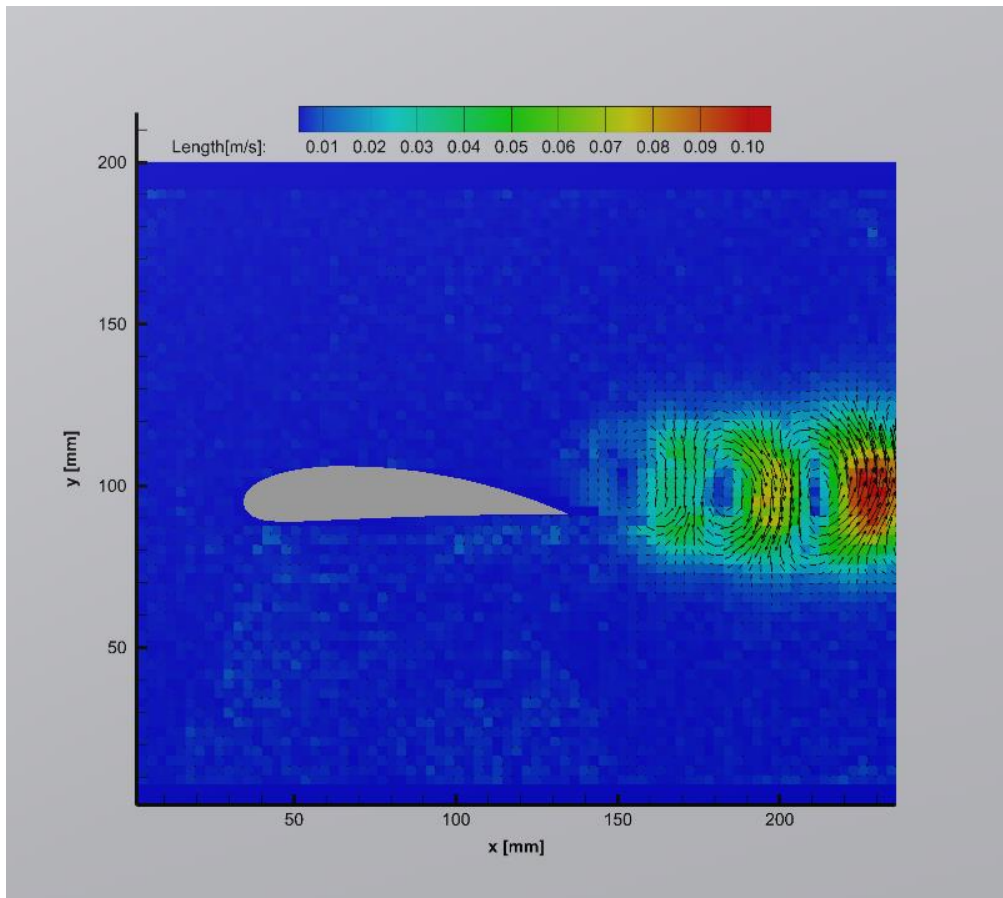
Proudové pole v okolí lopatky při náběhovém úhlu 0°

Technická zpráva TH02020705-2018V002 – Výzkum kmitání lopatek vodní turbíny s ohledem na poskytnutí rozšířeného pásma regulace pro zajištění stability a bezpečnosti energetické soustavy



Proudová pole v okolí lopatky při náběhovém úhlu -10° vlevo a $+10^\circ$ vpravo

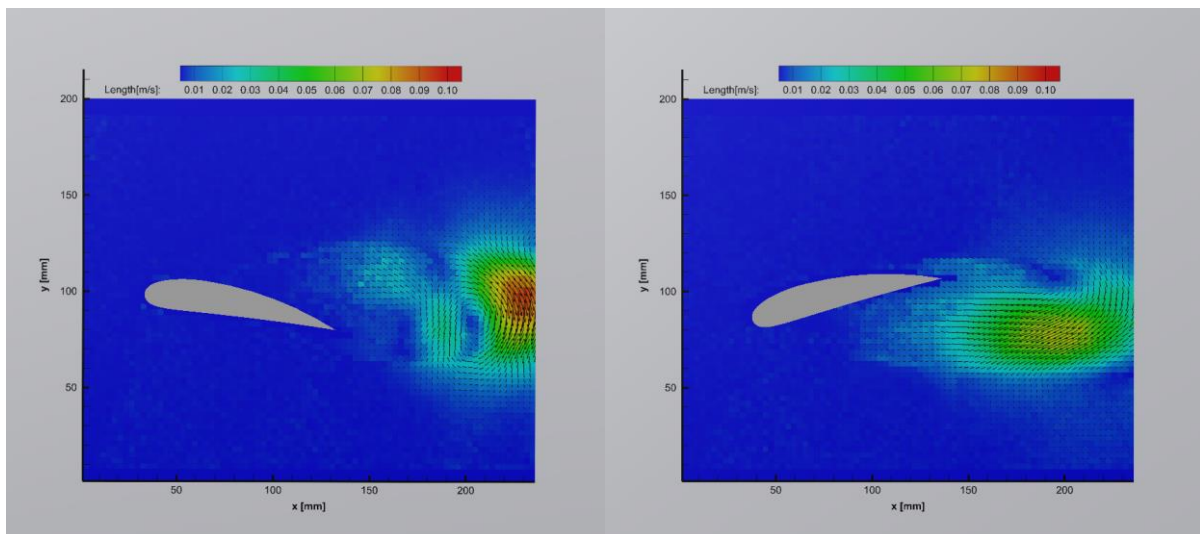
Prezentované výsledky ukazují statisticky středovaná pole rychlosti z 250 vektorových map. Středováním zanikne informace o vírových strukturách v okolí lopatky. Ke zjištění charakteru jednotlivých vírových struktur byla provedena analýza dat Proper Orthogonal Decomposition (POD). Tato analýza je schopná určit ty nejdůležitější módy struktur, které jsou nositelem největšího množství energie a mají největší vliv na charakter proudu. Pro každý náklon je ukázán vždy první nejdůležitější (energeticky nejsilnější) mód.



První mód vypočtený metodou POD pro úhel 0°

Na výsledcích POD charakteristiky jsou patrné vírové struktury za odtrhovou hranou lopatky. Tyto vírové struktury se periodicky odtrhávají střídavě z jedné a z druhé strany a ve výsledku způsobují samotné kmitání lopatky. Při náběhovém úhlu 0° je tato vírová stezka symetrická. Na dalších obrázcích je znázorněná vírová stezka v hlavním POD módu i pro náběhy úhlu -10° a +10°.

Každý z náběhových úhlů vykazuje jiný charakter obtékání a s tím i související vírové struktury za odtrhovou hranou lopatky. Při záporném náběhovém úhlu stále ještě dochází ke střídavému odtrhávání a vzniku kmitající vírové stezky. Oproti tomu při kladném úhlu náběhu se za lopatkou vytváří dominantní obdoba úplavu a překmitávání vírových struktur není tak výrazné.



První mód vypočtené metodou POD při náběhovém úhlu -10° vlevo a $+10^\circ$ vpravo

Proudová pole i další frekvenční charakteristiky budou dále zkoumány a podrobeny samotné frekvenční analýze. Tato analýza frekvencí vírových struktur v proudě bude korelovat se zjištěnou frekvenční analýzou mechanického kmitání samotného tělesa lopatky, jak je zjišťováno dále popsány metodami.

Metodika měření kmitání lopatky

Po základních testech a experimentech z měření kmitání lopatky pomocí akcelerometrického vibrometru pokračovaly letošní práce s využitím vlastní metodiky a navrženého zařízení.

V loňském roce byla vybrána metoda měření pomocí akcelerometrického vibrometru EXTECH SDL800. Tato měřicí metoda je robustní a levná, její hlavní nevýhodou ale je nutnost vyvést vibrace lopatky ven přes stěnu trubky, aby mohly být pomocí akcelerometrického vibrometru měřeny. Při tomto přenosu měřených vibrací dochází k přílišnému tlumení vibrací samotné lopatky a je velmi obtížné provést korekci tohoto tlumení a určit skutečnou amplitudu a frekvenci jejich kmitů.

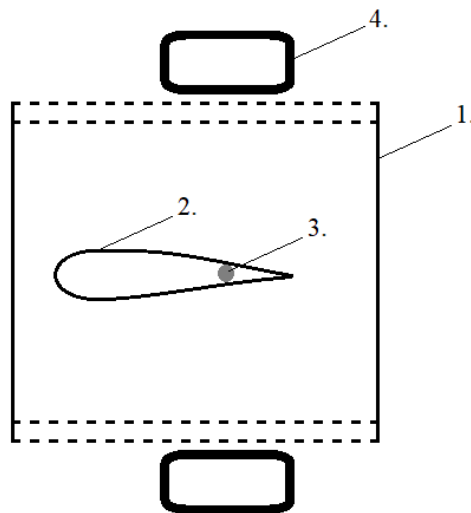
Byla proto navržena a testována nová měřicí metoda, která využívá elektromagnetického snímání kmitů. Základním principem je permanentní magnet, který je pevně spojen s vibrující lopatkou. Tím zcela přesně sleduje její kmit. V blízkosti tohoto magnetu je umístěna snímací cívka, v jejímž vinutí se oscilačním pohybem magnetu (a tedy změnou magnetického indukčního toku s časem) indukuje elektromotorické napětí, které je možné měřit a určit z něj přímo frekvenci a pomocí kalibrační křivky také amplitudu kmitů lopatky.

Při praktické implementaci této měřicí metody je nutné vyřešit některá úskalí. Především je nutné, aby permanentní magnet, který je spojen s lopatkou, měl co nejmenší rozměry a hmotnost. Hmotnost magnetu se totiž přičítá k hmotnosti samotné lopatky, a tím ovlivňuje vlastní frekvenci jejího kmitání. Fyzické rozměry magnetu, pokud by nebyly dostatečně malé, mohou změnit charakter proudění okolo lopatky a zcela znehodnotit výsledky měření. Využitím moderního permanentního magnetu ze slitiny NdFeB, jehož magnetický indukční tok na povrchu dosahuje téměř 1 T, bylo možné magnet zmenšit na válec o průměru 5 mm s výškou 2 mm při zachování dostatečně silného magnetického pole. Takto malý magnet je možné zapustit přímo do lopatky, tak, že nijak nenarušuje její povrch, a tedy ani neovlivňuje charakter proudění ani mechanické vlastnosti kmitající lopatky.

Technická zpráva TH02020705-2018V002 – Výzkum kmitání lopatek vodní turbíny s ohledem na poskytnutí rozšířeného pásma regulace pro zajištění stability a bezpečnosti energetické soustavy

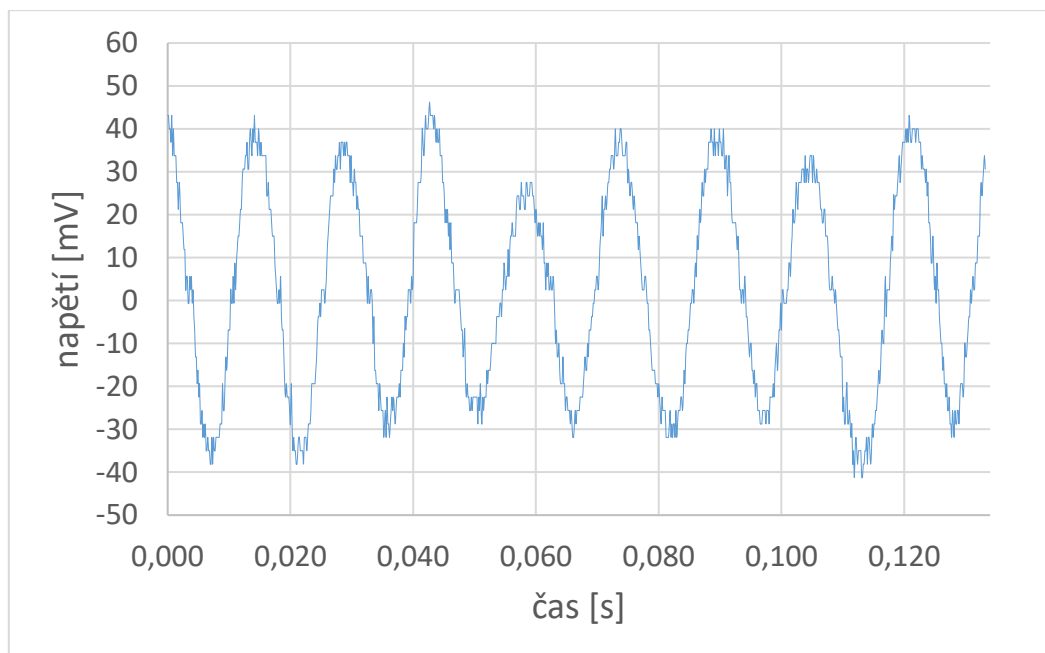
Jeho hmotnost pouze cca 0,3 g je zanedbatelná vzhledem k hmotnosti lopatky a neovlivňuje ani její kmitání.

Na obrázku níže vidíme schematický diagram elektromagnetického snímače kmitů. Z popisu obrázku je zřejmá jeho konstrukce.



Schematický diagram elektromagnetického snímače kmitů. 1 – plastová trubka, v které proudí voda; 2 – kmitající měřená lopatka; 3 – permanentní magnet vsazený do těla lopatky; 4 – snímací cívky

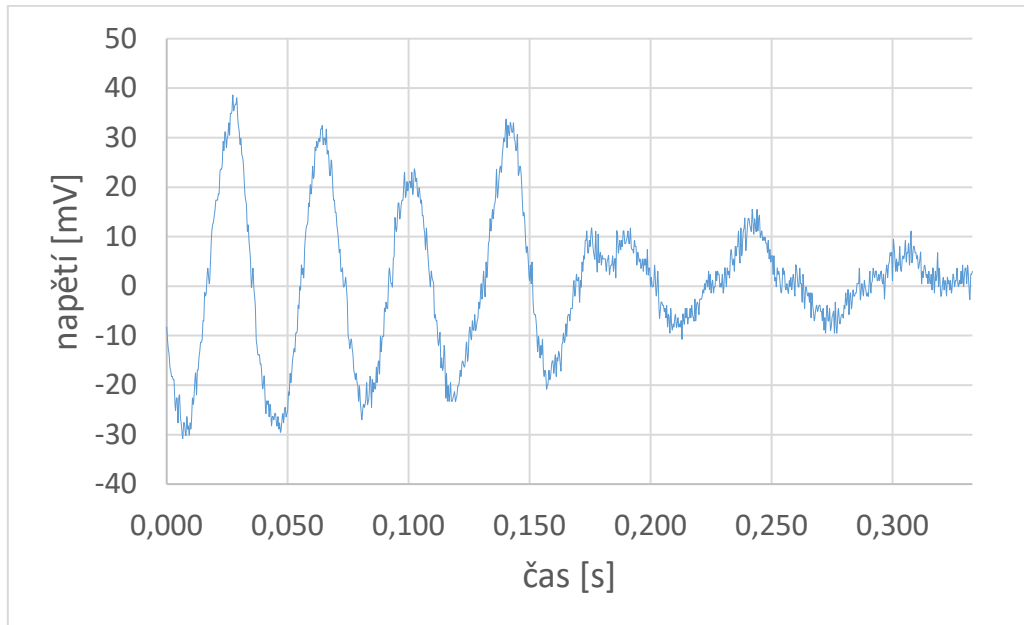
Následující graf zachycuje výsledky z reálného měření ustáleného stavu kmitající lopatky pro rychlost proudění 13 m/s. Naměřené hodnoty mají charakter periodické funkce, jejíž frekvence odpovídá přímo frekvenci kmitů lopatky, zde cca 67 Hz.



Výsledky měření z elektromagnetického snímače pro ustálený stav kmitů lopatky při 13m/s.

Technická zpráva TH02020705-2018V002 – Výzkum kmitání lopatek vodní turbíny s ohledem na poskytnutí rozšířeného pásma regulace pro zajištění stability a bezpečnosti energetické soustavy

Na dalším grafu vidíme výsledky z měření lopatky pro stejnou rychlost proudění při vypnutí čerpadla. Periodické kmitání lopatky je s klesající rychlostí proudění postupně utlumováno a zaniká, což naměřené hodnoty potvrzují.



Výsledky měření z elektromagnetického snímače při vypnutí čerpadla.

Provedený návrh a ověřovací měření potvrzují funkčnost a vhodnost metodiky pro zjišťování vibrací vetknuté lopatky. Hlavní výhodou je bezkontaktnost metody a její minimální ovlivnění samotného kmitání. Dalším krokem vývoje metodiky je její modifikace směrem k určení hodnot maximálních výchylek společně s frekvenční charakteristikou. Po této modifikaci, kalibraci a ověření bude metoda nasazena na měření reálných kovových lopatek dodaných partnery projektu.