

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Měření torzních kmitů rotoru generátoru

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Kryštof LACHMAN**
Osobní číslo: **E16N0015K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Měření torzních kmitů rotoru generátoru**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište negativní vlivy způsobené torzními kmity na rotor generátoru.
2. Provedte experimentální porovnání vlastností používaných snímačů.
3. Posuďte použitelnost těchto snímačů pro detekci subharmonických kmitů rotorů elektrárnenských generátorů.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.


Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jan Šobra

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2018**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na problematiku torzních kmitů – jejich příčinu, negativní důsledky a možnosti jejich měření. Dále zkoumá možnosti použití stávajících snímačů zabezpečení točivých strojů za účelem zlevnění systémů měření torzních kmitů.

Klíčová slova

Torzní kmity, vibrodiagnostika

Abstract

The master theses presents the problematics of torsional vibration – their root cause, negative effects and means of their measurement. It also evaluates the possibilities of using actual machine protection sensors with purpose of cheaper torsional vibration measurement systems.

Key words

Torsional vibration, vibrodiagnostics

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 15.5.2018

Kryštof Lachman

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Šobrovi, konzultantovi Ing. Petru Šťáhlavskému, doc. Jindřichu Liškovi a Ing. Svenu Künkelovi z katedry kybernetiky a Ing. Vladimíru Horákovi za poskytnuté podklady a informace, jejich ochotu, čas, cenné rady a připomínky.

Obsah

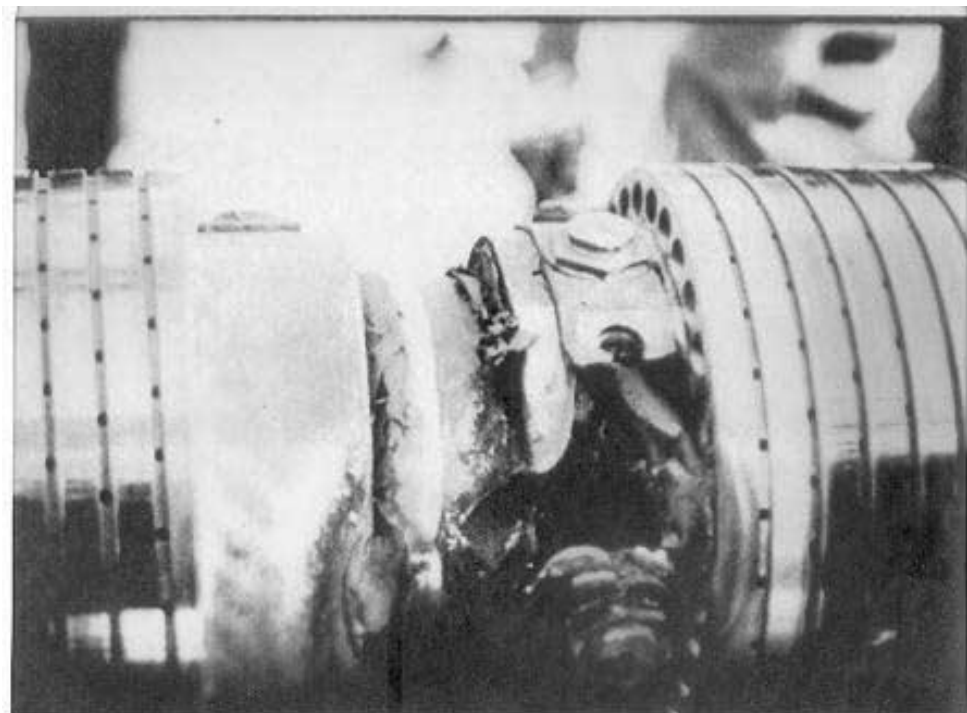
ÚVOD	1
1 TORZNÍ KMITY, JEJICH MĚŘENÍ A JEJICH NEGATIVNÍ Vliv NA ROTOR TURBOSOUSTROJÍ	3
1.1 DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ VIBRODIAGNOSTIKY	3
1.2 DEFINICE TORZE A TORZNÍCH KMITŮ	4
1.3 PŘÍČINY TORZNÍCH KMITŮ	6
1.4 NEGATIVNÍ VLIVY ZPŮSOBENÉ TORZNÍMI KMITY	8
1.5 METODY MĚŘENÍ TORZNÍCH KMITŮ	12
1.6 SNÍMAČE VYUŽÍVANÉ PRO ZABEZPEČENÍ TOČIVÝCH STROJŮ A VIBRODIAGNOSTIKU	14
1.6.1 Eddy – current snímače	16
1.6.2 Snímač na principu Hallovy sondy	17
2 EXPERIMENTÁLNÍ POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ POUŽÍVANÝCH SNÍMAČŮ TORZNÍCH KMITŮ	18
2.1 POPIS EXPERIMENTU	18
2.2 PŘÍPRAVA EXPERIMENTU	19
2.3 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU	22
3 POROVNÁNÍ SNÍMAČŮ A ZHODNOCENÍ POUŽITELNOSTI PRO DETEKCI SUBHARMONICKÝCH KMITŮ ROTORŮ ELEKTRÁRENSKÝCH GENERÁTORŮ	28
3.1 DEFINICE SUBHARMONICKÝCH KMITŮ	28
3.2 POROVNÁNÍ POUŽITELNOSTI JEDNOTLIVÝCH SNÍMAČŮ	28
3.3 UDÁLOST 1A – VYPNUTÍ GENERÁTOROVÉHO VYPÍNAČE	29
3.4 UDÁLOST 1B – VÝPADEK PŘENOSOVÉ LINKY A OPĚTOVNÉ ZAPNUTÍ	32
3.5 UDÁLOST 1C – ZAPNUTÍ PŘENOSOVÉ LINKY	35
3.6 SHRNUTÍ VYHODNOCENÍ TORZNÍCH UDÁLOSTÍ	38
4 ZÁVĚR	39
POUŽITÉ PRAMENY	41

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na torzní kmity, příčinu jejich vzniku, metody měření a možnosti jejich omezení. Problematika torzních kmitů velkých turbosoustrojí je sice již delší dobu známa, ale jednoduchý a funkční způsob jejich měření byl dostupný až s rozvojem laserového snímání rotujících částí, tedy kolem 90. let minulého století. Od té doby došlo ke standardizování této metody, která ovšem není běžně instalována v rámci vibračního zabezpečení či diagnostiky. K instalaci měřicího systému torzních kmitů dochází běžně až při výskytu těchto jevů, často až po havárii.

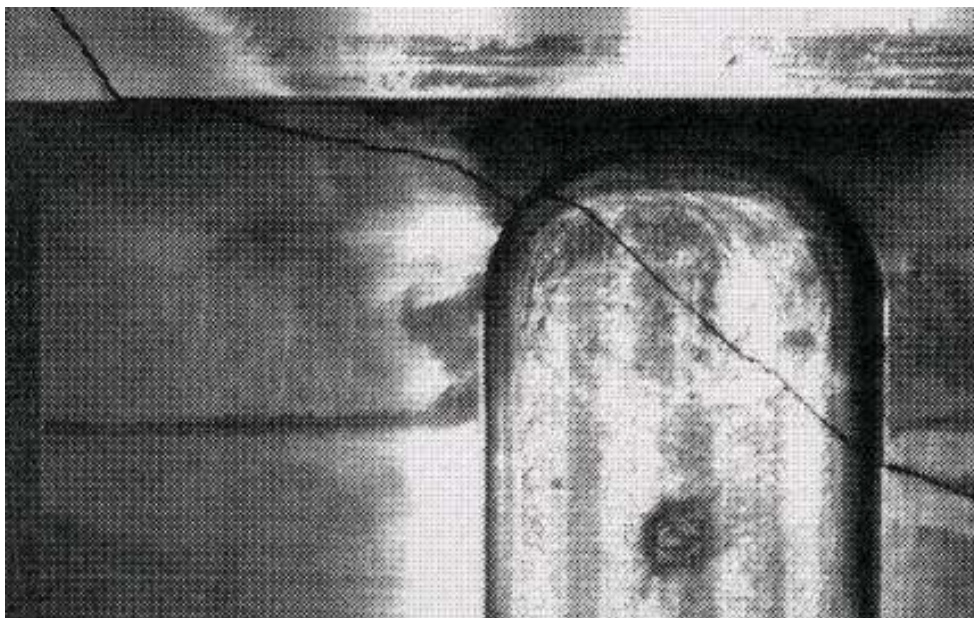
Pro ilustraci je na tomto místě doplněno několik příkladů havárií či poškození z praxe, případy jsou detailněji rozebrány v diplomové práci.

Za zmínku stojí dvě havárie mohavského turbosoustrojí. Jeden ze strojů s výkonem 909 MVA, dodával výkon pouze do jednoho dálkového vedení s napětím 500 kV. Rezonanční frekvence sítě byla 30 Hz. Tato frekvence budila jeden z torzních tvarů rotoru generátoru. Práce konaná materiálem při jeho namáhání torzními kmity způsobila teplo, které působilo na izolaci sběracího ústrojí a vedlo až k jeho selhání, které ilustruje obrázek 1 [1].



Obrázek 1: Výsledek torzní události na mohavském turbosoustrojí [1]

Dalším příkladem jsou jednotky 2 a 3 drážďanského turbosoustrojí. U těchto strojů s výkonem 912 MW po úpravě z 810 došlo k prasknutí hřídele na místě zúžení u spojkové drážky. Praskliny se objevily kvůli dlouhotrvajícímu namáhání a střídavý oscilující moment malé intenzity se ukázal být hlavní příčinou poruchy. Výsledek je patrný na obrázku 2. Drážka rotoru musela být upravena a byl instalován systém měření torzních kmitů [1].



Obrázek 2: Prasklina vzniklá z důvodu torzních kmitů na drážďanském turbosoustrojí [1]

Cílem práce je poukázání na nebezpečnost jevu, možnosti jeho omezení a detekce, shrnutí metod měření torzních kmitů a také porovnání jednotlivých snímačů. Na praktické bázi určit, zda je možné využít stávající běžná vibrační čidla, případně čidla otáček v kombinaci s vhodnou měřicí aparaturou, a eliminovat tak nutnost instalace nákladných tenzometrických systémů či lepení přídavných pásků na rotor. Vzhledem k ceně měřicích systémů by mohlo jít jednak o úsporu, jednak také o zjednodušení celého procesu, respektive o možnost analyzovat torzní kmity v rámci běžných vibračních zabezpečovacích systémů a tím přispět k zavedení tohoto měření jako standardu u velkých točivých strojů.

1 Torzní kmity, jejich měření a jejich negativní vliv na rotor turbosoustrojí

1.1 Definice základních pojmů vibrodiagnostiky

Mechanické vibrace jsou dynamickým jevem, během nějž tuhá tělesa či hmotné body kmitají vratným pohybem okolo rovnovážné polohy. Toto kmitání je možné popsat polohovým vektorem, tedy amplitudou a fází v čase [2].

Dalším jevem je vlnění, což je dynamický jev, jenž se šíří pružným prostředím postupnými vlnami. Jednotlivé body přitom kmitají s různou výchylkou a fází - oba jevy se na sebe tedy v praxi superponují. Stojaté vlnění vzniká vlivem odrazu v tělese, kdy se superponují dvě vlnění stejného druhu a začnou se rozšiřovat proti sobě se stejnou fázovou rychlostí. U stojatého vlnění se v čase nemění rozložení minim a maxim výchylek kmitajících hmotných bodů [2].

Kmitání lze z časového hlediska rozdělit na periodické, neperiodické a náhodné. Podmínkou periodičnosti kmitání je pravidelné opakování. Pokud navíc periodické kmitání obsahuje jen jednu frekvenci, jedná se o harmonické kmitání. Zde stačí určit jednu ze základních veličin - výchylku, rychlost či zrychlení kmitů, ostatní parametry lze stanovit pomocí výpočtů. Složené kmitání vzniká superponováním různých časových průběhů a lze rozdělit na periodické a neperiodické. [2].

Tabulka 1: Základní veličiny vibrodiagnostiky [2]

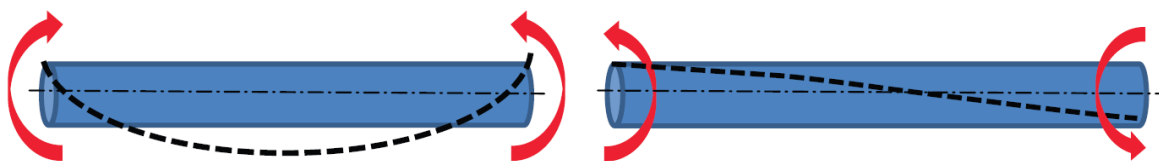
Značka	Jednotka	Název a vysvětlení
s	μm	okamžitá výchylka kmitů neboli vzdálenost kmitajícího bodu od referenčního bodu (<i>displacement</i>)
x_0	μm	amplituda kmitání neboli maximální hodnota určující veličiny harmonického kmitání (<i>amplitude</i>)
φ	rad	fáze harmonické veličiny v čase $t=0$ (<i>phase angle</i>)
ω	rad/s	úhlová rychlost, $\omega = d\varphi/dt$ (<i>angular speed</i>)
v	mm/s	rychlost kmitání $v = ds/dt$ (<i>velocity</i>); pro harm. signály platí $v_0\omega = s_0$; pro neharm. :

		$v_{ef}^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n v_{0i}^2$
		kde v_0 = počáteční rychlost, s_0 = počáteční dráha
a (g)	m/s ²	zrychlení kmitání $a = dv/dt$ (<i>acceleration</i>); pro harm. kmitání platí: $a_0 = \omega v_0 = \omega^2 s_0$ $a_{ef} = \omega v_{ef}$ kde a_0 = počáteční zrychlení

V případě analýzy vibrací strojů rozlišujeme také mezi absolutními a relativními vibracemi. Při absolutním kmitání tělesa je pohyb vztahován ke gravitačnímu poli Země, tedy pevnému, fixnímu bodu. Oproti tomu relativní kmitání je vztaženo k určenému reálnému bodu, který se ovšem může rovněž nacházet v kmitavém pohybu. Podle této specifikace také rozdělujeme senzory na relativní a absolutní [2].

1.2 Definice torze a torzních kmitů

Všechny mechanické součásti, pokud jsou izolovány vůči ostatním, mají vlastní rezonanční frekvenci (rozkmitají se při působení specifické frekvence). Ta je dána zejména objemem hmoty a tuhostí dané součásti či materiálu. Stejně tak se chová i soustrojí turbogenerátoru. Má vlastní frekvenci, při které bude rotor kmitat podélně k ose hřídele (a vytvářet tak průhyb, tzv. bow effect) a zároveň vlastní frekvenci, při které bude hřídel tíhnout ke zkrutu dle podélné osy – viz obrázek 3 [3].



Obrázek 3: podélné kmity a torzní kmity [3]

Doslovná definice torze je zkrut hmoty dle podélné osy kvůli působení točivého momentu na volný konec při fixovaném opačném konci, anebo zkrut, který vznikl působením točivého momentu na obou koncích. V ustáleném stavu musí být moment na obou koncích vyrovnaný pro zachování rovnováhy. V této definici je zkrut rozdílem mezi rotační výchylkou na každém konci hmoty (jednotkou je stupeň) a točivý moment je součtem základních působících sil a momentových ramen - tím pádem je jeho jednotkou N·m [1].

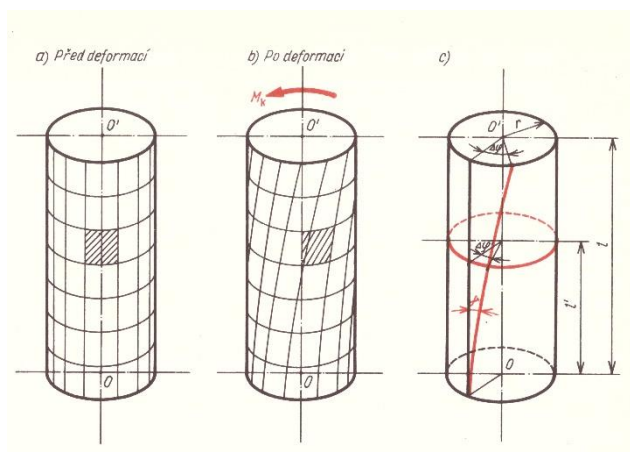
Jiná definice krutu deklaruje, že hřídel je torzně namáhána při působení dvojice sil, která leží v rovině kolmé k ose hřídele. Pokud bychom jeden konec hřídele upevnili a na druhý nechali působit moment, došlo by k následujícím jevům:

- Jednotlivé průřezy se smýkají – natačejí se jako tuhé celky.
- Nemění se průřez ani výška hřídele
- Deformace (tečné napětí) vzniká jak na povrchu, tak uvnitř materiálu
- Hřídeli se nemění průřez ani jeho poloměr
- Čtverce sítě se krutem mění na kosočtverce

Úhel natočení koncového průřezu vůči upevněnému průřezu se nazývá celkovým úhlem zkroucení $\Delta\varphi$. Lze ho určit jako

$$\Delta\varphi : \Delta\varphi' = l' : l. [4],$$

kde $\Delta\varphi'$ = úhel natočení průřezu v polovině dráhy, l = původní délka a l' = délka ve zkrutu, tedy skutečná délka při $\Delta\varphi > 0$. Hřídel před a po deformaci je znázorněný na obrázku 4.



Obrázek 4: Deformace zkrutem a zkrutový úhel [4]

Hřídel by měla být konstruována nejen z hlediska pevnosti, ale i tuhosti. Hřídel může mít přípustný zkrut, který vytváří menší napětí. Čím větší je průměr hřídele, tím menší je i úhel zkroucení. Šířkou hřídele se tedy u delších hřídelů dají částečně torzní kmity omezit. Naopak při vložení hřídele malé tuhosti dojde k vytvoření tzv. torzní pružiny, která vyrovnává nestejněměrné krouticí momenty. U velkých generátorů však těchto prvků nelze využít [4].

V běžné stavbě strojů se dle [4] volí dovolený zkrut $0,25^\circ - 0,35^\circ$ na 1 m délky hřídele, ve zvláštních případech může být hodnota i vyšší. Některé hřídele je možné vyrobit

duté – v případě torzních kmitů je namáhání největší po obvodu, kdežto podél osy rotace k němu téměř nedochází. Při duté hřídeli je tedy možné ušetřit materiál [4].

Základní rovnicí při určení sil působících na hřídel je závislost krouticího momentu na výkonu. Ta je dána jako

$$M_k = \frac{P}{\omega} [Nm][4],$$

kde P je výkon ve Watech a ω úhlová rychlost v radiánech za sekundu [4].

V případě torzních kmitů turbogenerátorů se rozlišují dva typy působícího momentu. Prvním z nich je moment, který je přibližně rovnoměrně rozložen podél hřídele generátoru a nazývá se moment ve vzduchové mezeře generátoru. Moment je tvořen elektromagnetickými silami a je příčinou torzních kmitů stroje. Moment ve vzduchové mezeře generátoru se obecně skládá ze stejnosměrné složky a také složky odpovídající několika harmonickým elektrické sítě, ve které je generátor provozován a kde je také vystaven přechodným rušivým stavům [1].

Druhým typem momentu je odezvoový (responsivní) moment, který se vyskytuje v axiálních částech turbogenerátoru a je způsobený odezvou na moment ve vzduchové mezeře. Odezvoový moment kopíruje rušení, a proto obsahuje jednak frekvenční složky odpovídající harmonickým elektrické sítě, jednak také složky odpovídající jmenovitým torzním frekvencím stroje. V každém okamžiku se bude odezvoový moment v části hřídele rovnat tuhosti dané části, násobené okamžitým zkrutem v dané části hřídele [1].

1.3 Příčiny torzních kmitů

Torzní namáhání vzniká jako důsledek působení momentu na jednu část hřídele, kdy se moment přenáší po celé délce hřídele. S tímto namáháním se počítá již při konstrukci a všechny prvky – obzvláště spojka – musí být dimenzovány tak, aby dlouhodobý zkrut vydržely při jmenovité zátěži. Jiná situace ovšem nastává při poruchách vedení, fázové nerovnováze, negativním zpětném proudu generátoru či špatné synchronizaci [5].

Výsledné torzní impulsy se projevují dvojnásobkem síťové frekvence a přenáší se podél celého soustrojí, které se chová jako systém tvořený torzními pružinami a hmotou. Při blízkosti vlastní frekvence dynamického systému hřídele a impulsní frekvence může dojít ke vzniku rezonance a zesílení celého efektu [5].

Velké turbogenerátory mají 20 až 30 vlastních torzních tvarů s frekvencemi v rozsahu, kde mohou být buzeny impulzy ze sítě při běžném provozu. Zejména několik prvních tvarů je kritických, většina ostatních je zanedbatelná. Vzhledem k tomu, že tlumení je vůči torzním kmitům velmi nízké (kolem 0,1 %), vibrační odezva při rezonanci může dosahovat až pětisetnásobku ekvivalentní statické zátěže o stejné velikosti. To činí stroje obzvláště zranitelné a neměly by být provozovány v podmínkách blízkých rezonanci [6].

Důvody vzniku torzních kmitů hřídele generátoru jsou:

- Přenosový systém (elektrická síť)
- Poruchy zařízení připojených k výstupům generátoru
- Určité podmínky či operace provedené v elektrárně

Impulzy přenesené z elektrické sítě mohou být dále děleny na následující kategorie:

- Poruchy nebo zkrat
- Délétrvající oscilace vycházející z nesymetrických fázových proudů
- Konfigurace sítě (plánované či nouzové přepínání odboček sítě)
- Oscilace vzniklé provozováním indukčních obloukových pecí nebo sléváren
- Oscilace a rušení vzniklé provozováním výkonové elektroniky

Každá z těchto událostí způsobuje kmitavý moment, který působí na hřídel. Tento moment může vyvolat oscilující krut hřídele a vibrace dalších rotačních i statických částí. Přechné impulsy působící na generátor mají pulsní složku (skokovou změnu momentu) a výrazné složky síťového kmitočtu a první harmonické frekvence síťového kmitočtu. První harmonická frekvence sítě se objeví při nesymetrii sítě a nesymetrických poruchách sítě. Pro vyvarování se negativních efektů torzních kmitů je zejména potřeba při konstrukci oddálit vlastní torzní frekvence generátoru a jeho částí od kritických hodnot 50 a 100 Hz (případně 60 a 120 Hz) [1].

Relativně mírné impulsy jsou způsobeny při sfázování se zátěžným úhlem menším než 10° , náhlý pokles zátěže a přepínání větví přenosové sítě, kdy dochází ke skokové změně zátěže na výstupu generátoru o méně než 0,5% jeho výkonu. Naopak nebezpečné impulsy se objevují spíše vzácně a stroje by měly být navrženy tak, aby těmto vlivům odolaly (případně po nutných opravách po výskytech těchto impulsů). Bohužel není možné omezit torzní kmity zvětšením průměru rotoru - to by způsobilo velké množství dalších problémů, nehledě na nárůst ceny [1].

1.4 Negativní vlivy způsobené torzními kmity

Vzhledem k dlouhodobému provozování turbosoustrojí tepelných a zejména jaderných elektráren je v dnešní době možné usuzovat, že jedním z příčin nehod a závažných selhání rotorů jsou torzní kmity. Ty způsobují dlouhodobé namáhání a rostoucí únavu materiálů. Za vyzdvižení stojí zejména případy nehod v tepelné elektrárně v Tennessee, USA (1974), v ruské Kashiře (2002) a ukrajinské Pridneprovskaje (2007).

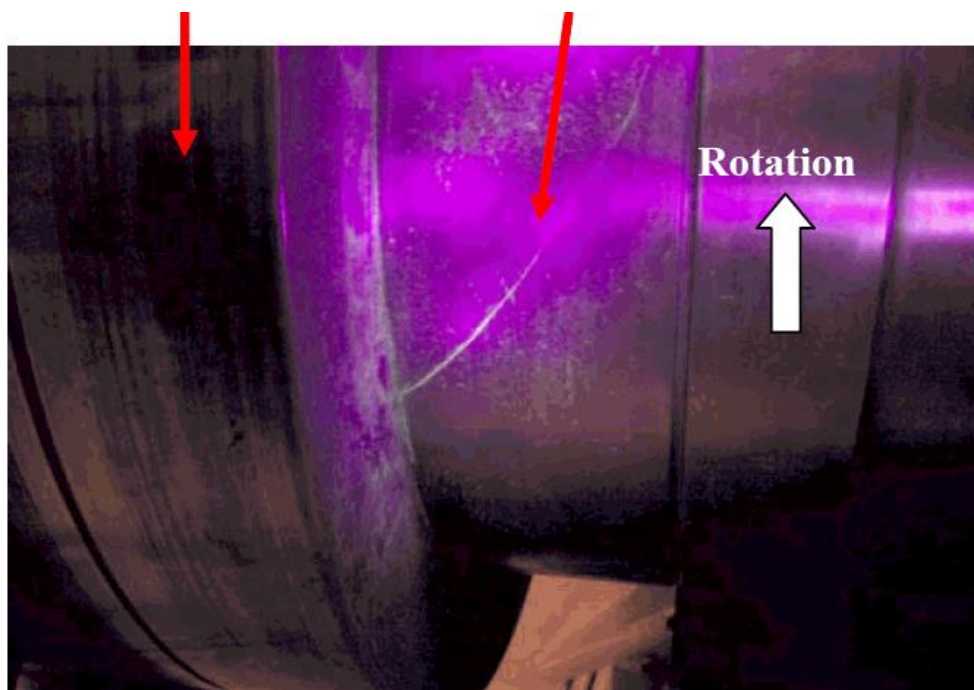
V prvním případě došlo k selhání rotoru NT-ST části. V druhém případě došlo k celkovému selhání soustrojí TG3 a poškození dvou dalších soustrojí. Části rotoru byly nalezeny ve vzdálenosti až několika set metrů od elektrárny. Ve třetím případě byla turbína na základě vysokých vibrací odstavena, čímž se zabránilo jejímu selhání kvůli značné únavě materiálu rotoru. Na základě vyšetřování bylo u všech tří případů odhaleno, že hlavní příčinou byla únava rotorové oceli způsobená opakovanými torzními kmity [7].

Metody pro zjišťování životnosti a únavy pro tah a ohyb ocelových hřídelí jsou dlouhodobě známé a používané a jejich použití je i dobře zdokumentované v literatuře. V otázce torzních kmitů ovšem tyto metody nebyly k dispozici až do roku 1984, kdy byly publikovány na základě havárie mohavského turbosoustrojí, způsobené namáháním torzními kmity. Institut EPRI sponzoroval výzkum pro stanovení a ověření životnosti a hranice únavy rotorových ocelí namáhaných torzí. Cílem bylo vytvořit metodiku pro spolehlivou metodu detekce torzních kmitů pro energetický průmysl [1].

Únava materiálu znamená jeho sklon k trhlinám a nakonec i prasknutí pod vlivem opakovaného namáhání či napětí na úrovni výrazně nižší, než je statická pevnost materiálu.

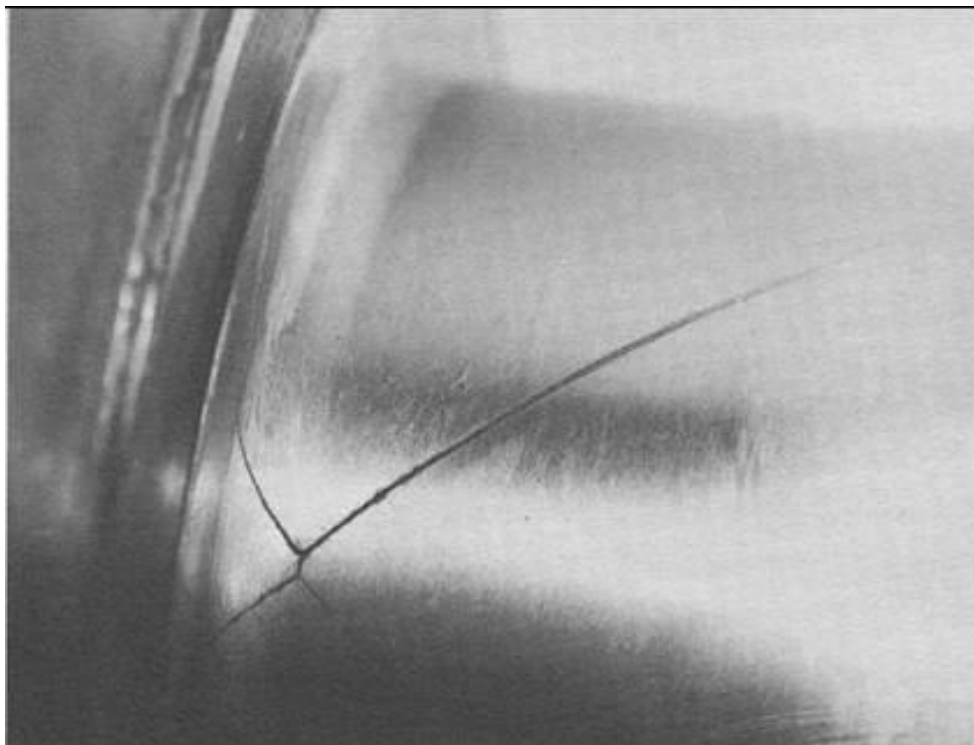
Únava je důležitým faktorem, neboť je nejčastější příčinou závad kovových struktur. Závady způsobené únavou jsou často fatální a přicházejí bez varování [1].

Opakované namáhání může být axiální (smršťování a roztahování), ohybové, torzní (zkrut/střih) nebo kombinací těchto namáhání. Poškozený povrch je obvykle kolmý ke směru působící síly namáhání. Dotčený povrch je obvykle rozpoznán podle strií či „letokruhů“, které se tvoří během růstu praskliny. Únavové praskliny se vytvářejí obvykle na místech největšího namáhání - běžně označovaných jako „zářezy“. Změna geometrie hřídele či radiální otvory pro připojení elektrického vinutí jsou místy se sníženou únavovou pevností. Další okolnosti, které mohou přispět ke vzniku prasklin, jsou zářezy vzniklé nedokonalým opracováním povrchu hřídele, důsledky určitého typu provozování soustrojí či vliv okolního prostředí. Na obrázku 5 je trhlinka vzniklá na hřídeli kvůli torzním kmitům. Trhlinka se rozvětvila pod úhlem 45° kolmo k největší působící namáhající síle, vzniklé torzními kmity hřídele. Takto vypadají běžné praskliny způsobené torzními kmity [1].



Obrázek 5: Prasklina způsobená torzními kmity [8]

Na obrázcích 6 až 8 jsou znázorněny reálné závady, jejichž příčiny byly identifikovány jako únava materiálu způsobená dlouhodobým torzním kmitáním a namáháním [1,3,8].



Obrázek 6: Prasklina hřídele vzniklá dlouhodobým torzním namáháním materiálu [1]



Obrázek 7: Lopatky zdeformované působením torzních kmitů hřídele [3]



Obrázek 8: Únavová prasklina u kořene lopatek nízkotlakého dílu turbíny[8]

Vlastní torzní frekvence, která je příliš blízko dvojnásobku operační frekvence, může způsobit únavové poškození až závadu lopatky nebo části hřídele. Obrázek zobrazuje poškození lopatky po přibližně 10 měsících používání, způsobené torzní rezonancí. Lopatky posledního stupně jsou vůči tomuto namáhání nejzranitelnější. Flexibilní lopatky přidávají další stupeň volnosti do celého systému, a tak dále zesložitují celý problém. Flexibilita lopatek je kritický faktor pro stanovení celkové chování turbosoustrojí. Soustrojí, kde je jiný výrobce generátoru a turbíny či budiče, je ještě náročnější na analýzu. Případné modifikace turbíny, generátoru či budiče mohou přiblížit rezonanční frekvenci blíže operační. Nebezpečí závady způsobené torzními kmity lze zmenšit různými cestami, jako například [1]:

- Porozumění dopadu modifikací turbosoustrojí na vlastní torzní frekvence a vlastní tvary. Toho může být dosaženo pomocí testování a analytického modelování.
- Pro posunutí vlastní frekvence od operační frekvence je možné zvolit několik přístupů, například přidání hmoty spojky či pomocí dynamického ladění. Správných výsledků lze dosáhnout opět díky kombinaci testování torzních kmitů a modelování soustavy.
- Pro získání přesného modelu je zapotřebí disponovat výkresy soustrojí od výrobce. Pro ověření modelu může být nezbytné provést torzní testování.

- Analytický model a torzní testování musí zahrnovat dopad zatížení na vlastní frekvence. Rovněž by měly být zahrnuty tepelné efekty – pro zpřesnění mohou být vytvořeny „studený“ a „horký“ model rotoru.
- Ustálený stav torzních kmitů turbosoustrojí také může průběžně vzrůstat vlivem změn v elektrické síti (velké nevyváženosti zátěže, přítomnost nesinusových zátěží poblíž elektrárny, změna vlastní frekvence systému) [1]

1.5 Metody měření torzních kmitů

Jednou z metod, jak zjistit přítomnost torzních kmitů, je využití optických (laserových) snímačů. Jejich historie je poměrně krátká – ačkoli byly možnosti využití laserového měření rychlosti známé již od počátku vývoje laserů, pozornost byla směřována spíše k jejich využití pro neinvazivní měření toků kapalin. Měření vibrací bylo zajišťováno hlavně pomocí akcelerometrů. Nicméně, existuje mnoho problémů a aplikací, kde není vhodné klasické snímače vibrací – respektive absolutních vibrací – použít. Zejména v případě měření torzních vibrací, kdy není možné akcelerometry využít na rotační části stroje, bylo korektní určení relevantních hodnot kmitů velmi problematické [9].

Původně měření torzních kmitů sestávalo z kombinace optických, seismických a mechanických torziografů, tenzometrů a žlábků v disku. Posledně jmenovaný systém je používán v automobilovém průmyslu, kde je na konci klikové hřídele umístěn disk se žlábkem. Senzor relativních vibrací sleduje frekvenci žlábků, který ho mívá, a napětí signálu je demodulováno a poskytuje analogový údaj o rychlosti klikové hřídele a tím pádem i o torzních kmitech. Tento systém ovšem mívá omezený frekvenční rozsah [9].

Tenzometrické systémy a přidružená aparatura, podobně jako kroužkové systémy, jsou velmi náročné na údržbu, kalibraci a správné vyhodnocení. Obecně lze říci, že jakýkoli kontaktní měřicí systém není pro měření torzních kmitů vhodný pro velkou náročnost údržby, nehledě k nutnosti odstavení stroje [9].

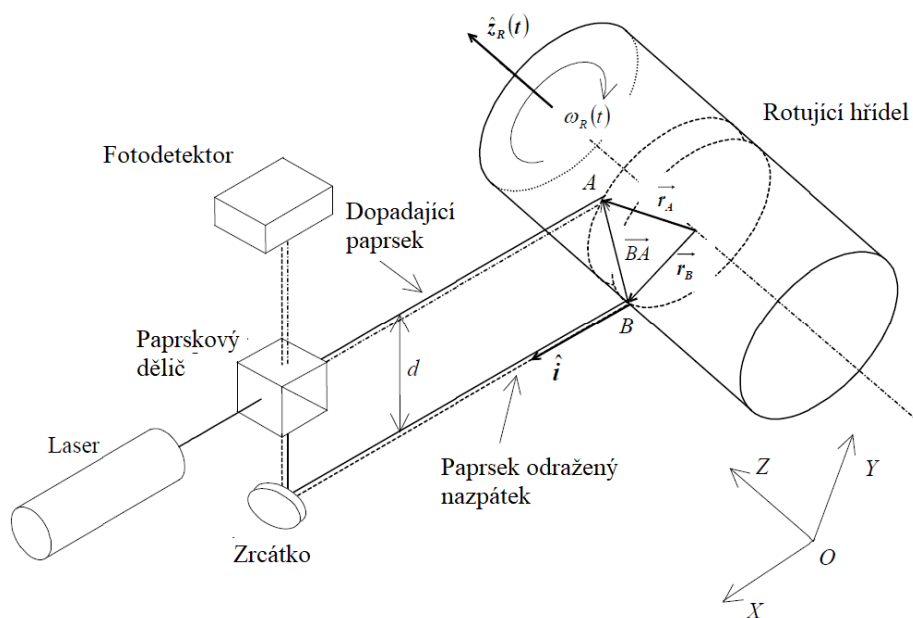
Velkou pozornost v oblasti torzních kmitů mají nyní optická čidla. Využívá se přitom Dopplerova efektu a toto měření je v dnešní době hojně využívané a jeho přesnost ověřená. Metoda se nazývá se LDV – Laser Doppler Velocimetry [10].

Základním principem metody měření rychlosti s využitím Dopplerova jevu je detekce změny vlnové délky koherentního záření odraženého částicí, která je úměrná okamžité rychlosti částice vůči detektoru. Změna se vyhodnocuje z interference mezi sondou vyzářeným paprskem a paprskem odraženým od částice [10].

Pro měření torzních kmitů je možné využít komplexní řešení senzoru, jehož princip je vyobrazen na obrázku 9. Sensor se skládá z laseru (zpravidla pevného), který prochází přes paprskový dělič a dopadá na rotující hřídel. Část paprsku se odrazí v závislosti na Dopplerově jevu (úměrně okamžité rychlosti bodu dopadu). Tento odražený paprsek je pomocí zrcátka nasměrován do fotodetektoru. Tam je vyhodnocen rozdíl mezi paprsky a generován takt, odpovídající úhlové rychlosti hřídele dle vztahu:

$$f_{takt} = \left| \left(\frac{2\mu d}{\lambda} \right) \omega_r \cos\theta \right| [10],$$

kde μ je index lomu pro okolní médium (vzduch), d je vzdálenost mezi dopadajícím a odraženým laserovým paprskem, λ je vlnová délka laserového paprsku a θ úhel dopadajícího paprsku mezi normálou plochy laserového paprsku a rotační osou hřídele [10].



Obrázek 9: Nákres principu měření rychlosti pomocí Dopplerova jevu [10]

Systém vyžaduje vhodný obvod pro zpracování signálu - převodník frekvence na napětí.

V praxi se využívá změny odrazivých a neodrazivých ploch, takzvaného zebrapásku (v cizině také Piano Tape). Tyto pásky jsou nalepeny na rotoru (viz obrázek 10) a slouží jako trigger (spouštěč) pro optický snímač, který generuje obdélníkové impulsy. Pomocí algoritmů je ze signálu získána úhlová rychlost a její změny a pomocí FFT analýzy je vyhodnocena přítomnost torzních kmitů (zvýšené amplitudy) na kritických frekvencích.

Pro tento druh systémů je zásadní kvalita měření, která rozhoduje o validitě získaných informací. Záleží tedy na čistotě pásku (kvůli rozlišení ploch), úhlu a vzdálenosti optických snímačů a je třeba také počítat s efektem konce pásku, kde jedna z ploch není ekvidistantní.



Obrázek 10: Ukázka měřicího místa snímání torzních kmitů pomocí optického snímače [11]

1.6 Snímače využívané pro zabezpečení točivých strojů a vibrodiagnostiku

Pro účely měření chvění je možné využít široké spektrum různých čidel a systémů. Nejjednodušším způsobem, jak vibrace zachytit a změřit, je využití akcelerometrů. Ty pomocí seismické hmotnosti, piezokrystalu a nábojového zesilovače dokážou převést zrychlení, které na seismickou hmotnost působí a namáhá tím piezokrystal, na elektrický

potenciál. Tyto snímače ovšem nelze pro detekci torzních kmitů využít – senzor by musel rotovat spolu s materiálem, čímž by na něj působila obvodová rychlost a vlastní torzní kmity by vůbec nezachytil, nehledě na velice obtížné napájení čidla a přenos signálu.

Jiná je situace u čidel, pracujících na principu vířivých proudů (eddy – current snímače). Ty jsou využívány pro stanovení relativních vibrací hřídelů – bývají instalovány ve vzdálenosti několika set mikrometrů od rotujícího hřídele a sledují jednak odstupové napětí GAP, tedy skutečnou polohu hřídele za chodu, jednak také dynamickou hodnotu okamžitých vibrací. Tato čidla slouží také jako indikátor tzv. fázové značky (referenčního pulsu) – tedy údaje, který synchronizuje vibrodiagnostická měření, určuje počet otáček a natočení hřídele.

Otáčky je možné měřit také na principu Hallových sond, které využívají indukce v okolo probíhajícím zubu ozubeného kola – každý zub tak vyvolá odezvu, indikovanou překlopením klopného obvodu. Čidlo tak v podstatě vytváří binární impulsy, kdy počet těchto impulsů, vydělený počtem zubů, udává počet otáček za minutu.

Dalšími používanými senzory jsou elektrodynamické akcelerometry, kapacitní snímače či lineární snímače polohy. Ty ovšem nejsou z hlediska měření torzních kmitů a jejich důsledků podstatné. V kombinaci s tenzometry se mohou také použít piezoelektrické akcelerometry přímo na rotoru, toto řešení je ovšem náročné z hlediska napájení, přenosu signálu i samotného uchycení čidel.

Dále jsou k dostání čidla, určená výhradně k detekování torzních kmitů. Ty pracují na principu detekce nehomogenity materiálu a její změny během působení torzních kmitů. Tyto čidla či měřicí řetězce dosahují poměrně vysoké ceny – v řádech statisíců korun. Příklad je na obrázku 11. Takové snímače jsou ovšem velice odolné vůči okolnímu prostředí, jsou bezkontaktní, čímž odpadá nutnost instalace zebřapásek či tenzometrů [12].

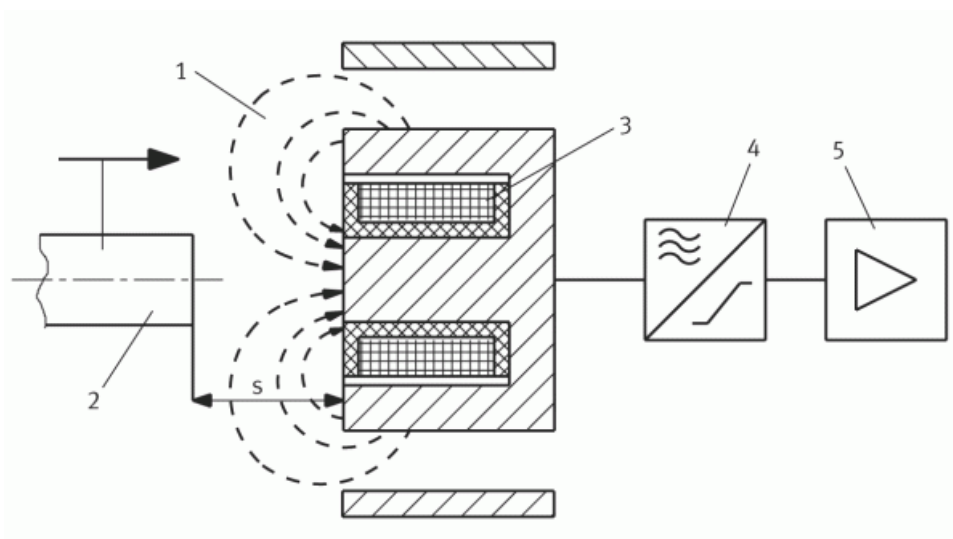


Obrázek 11: Ukázka snímače pro měření torzních kmitů pomocí nehomogenity materiálu hřídele [12]

1.6.1 Eddy – current snímače

Snímače na principu vířivých proudů potřebují ke správné funkci oscilátor (vnější či zabudovaný). Tato dvojice, jež musí být naladěna a společně kalibrována, tvoří kmitavý elektrický obvod. Ten tvoří zejména cívka ve feritové hlavici čidla (viz obrázek 12). Oscilátor generuje vysokofrekvenční magnetické pole, které se uzavírá vzduchem okolo aktivní plochy senzoru. Při přiblížení kovového materiálu (rotorová ocel) dojde ke změně poměrů cívky (velký rozdíl permeability kovu a vzduchu) a tím i ke změně parametrů oscilátoru [13].

Limitujícími prvky těchto snímačů jsou zejména malá odolnost feritových hlavic, kdy by jen letmý kontakt s měřeným objektem způsobí přerušení tenkých vodičů ve snímači. Dále také degradace elektroniky oscilátoru. Na čidlo a hlavně elektroniku oscilátoru také negativně působí vyšší teploty, které jsou časté v důsledku umístění snímačů v ložiscích, kde jsou v přímém kontaktu s horkým mazacím olejem či jeho parami.



Obrázek 12: Konstrukce aktivní cívky eddy-current snímačů, kde 1 - mag. pole, 2 - clonka (el. vodivý materiál), 3 - cívka, 4 - oscilátor, 5 - zesilovač [13]

1.6.2 Snímač na principu Hallovy sondy

Snímač je tvořen dvěma Hallovými sondami. Ty jsou umístěny nad permanentním magnetem. Výstupní napětí sond je zesíleno a digitální obvod vyhodnocuje rozdíl mezi těmito dvěma sondami. Digitální obvod vyše pravoúhlý signál na klopný obvod. Pokud se přiblíží zub ozubeného kola (resp. jeho náběžná hrana), působením magnetického pole se rozváží citlivý můstek a překlopí klopný obvod. Stav je zachován až do přechodu doběžné hrany, která rozváží můstek na opačnou stranu. Výstupem z tohoto snímače tak jsou pulsy s ostrými náběžnými hranami. Limitními faktory těchto čidel je potřeba držáků pro přesnou instalaci k ozubeným kolům a také frekvence, s jakou je klopný obvod schopen měnit jednotlivé stavy. [14]

2 Experimentální porovnání vlastností používaných snímačů torzních kmitů

2.1 Popis experimentu

V experimentální části této práce jsou ověřeny vlastnosti snímačů, rozebraných v teoretické části (snímač na bázi vířivých proudů, snímač na principu Hallových sond a optické čidlo). Cílem experimentu je určit, jaké snímače mají nejlepší vlastnosti pro detekci torzních kmitů, případně stanovit, zda jsou k tomuto druhu měření použitelná.

Simulovat torzní kmity je v běžných podmínkách velmi náročné. Je zapotřebí přípravek, který má dostatečně dlouhou a širokou hřídel, pohon dokáže udržet stálé otáčky a nejsložitější je samotný impuls k torznímu kmitání. Testy se provádí např. na soustrojí 50 MW, kde se simuluje náhlé odpojení generátoru od sítě. Z tohoto důvodu není v rámci experimentu provedena evaluace torzních událostí zachycených na měřicím přípravku, ale dat z provozu ze dvou českých elektráren, kde se používá stejných snímačů jako při experimentu.

Samotný experiment se skládá z fáze přípravy (příprava měřicího přípravku, výběru a instalace snímačů a konfigurace měřicí aparatury), fáze měření a zpracování naměřených dat.

Měřicím přípravkem je ozubené kolo se 64 zuby pro testování otáčkových čidel a kolo s nalepenou zebrapáskou s 84 světlo odrazujícími a pohlcujícími plochami. Kolo pohání třífázový elektromotor. Díky připojení k frekvenčnímu měniči je možné regulovat rychlost jeho otáčení od 0 až do 3500 ot/min. Do vhodné vzdálenosti od ozubeného kola je pomocí držáku (v praxi se používají držáky vytvářené na míru pro každé soustrojí, pro krátkodobé měření lze použít i magnetický držák) umístěn příslušný snímač. Ten je připojený na analyzátor – měřicí přístroj, který zaznamená vstupní data. Přístroj je potřeba volit zejména s ohledem na vzorkovací frekvenci – např. při 60 zubech a frekvenci 50 Hz a zachování vzorkovací frekvence musí být rychlost vzorkování vyšší než 6 kHz.

Měřicí přístroj rovněž musí být schopný na vstupu přijímat různé úrovně signálů. Pro účely experimentu je nastavena rychlost 585, 1500 a 3000 ot/min. Po naměření průběhů

snímači je nutné pomocí zobrazovacích programů zpracovat získanou databázi. V experimentu je použit přenosný analyzátor vibrací Adash VA4 a zobrazovací program DDS2017.

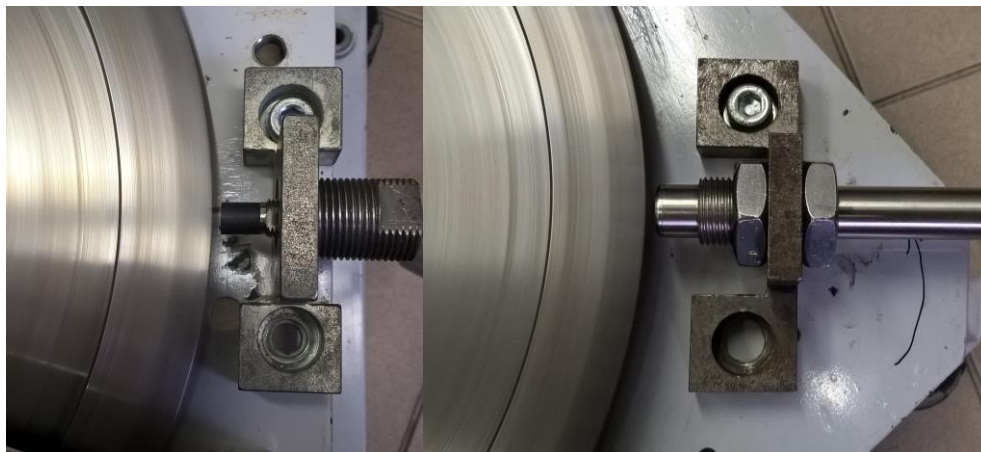
2.2 Příprava experimentu

Při přípravě experimentu je nutné dbát na správnou konfiguraci čidel, nastavení měřicích řetězců a v neposlední řadě také na bezpečnost. Simulátor otáček je poháněn frekvenčním měničem, otáčková frekvence se mění ručně. Pro měření snímače na principu Hallovy sondy a eddy-current snímačem je použito ozubené kolo. Snímače jsou nastaveny na vzdálenost 0,8 mm od vrcholu zubů – tedy v rámci jejich rozsahu, ale dostatečně daleko vůči vůli pohybu a rotace ozubeného kola (na obrázku 13 je zobrazeno uchycení snímačů a ozubené kolo).



Obrázek 13: Simulátor otáček s osazenými snímači

Následně byl sestaven měřicí řetězec, který se skládá v případě snímače na principu Hallovy sondy ze snímače, kabelu, napájecího zdroje a měřicího přístroje. V případě eddy-current snímače je do řetězce zaveden rovněž převodník – oscilátor. Snímače musí být napájeny samostatně z důvodu rozdílné polaroty. Na obrázcích 14 a 15 je zobrazeno uchycení eddy-current snímače a snímače na principu Hallovy sondy k měřicímu přípravku.



Obrázek 14: Eddy- current snímač Obrázek 15: Snímač na principu Hallovy sondy

Optické čidlo (viz obrázek 16), které pracuje na bázi Dopplerova jevu, vyžaduje namísto zubů střídání ploch odrážejících a pohlcujících světlo. Je tedy použito ocelového kola s nalepenou zebrapáskou a snímač umístěn pomocí nastavného magnetického držáku do blízkosti kola.



Obrázek 16: Optický senzor otáček

Výstupy všech čidel jsou přivedeny na vstup měřicího přístroje VA4. Signály musely být přivedeny na AC vstup, jelikož DC vstupy mají pevně danou vzorkovací frekvenci – při měření vibrací obvykle není potřeba měřit odstupové napětí rychleji než 1x za sekundu. To vysvětluje záporné hodnoty ve výsledných grafech.

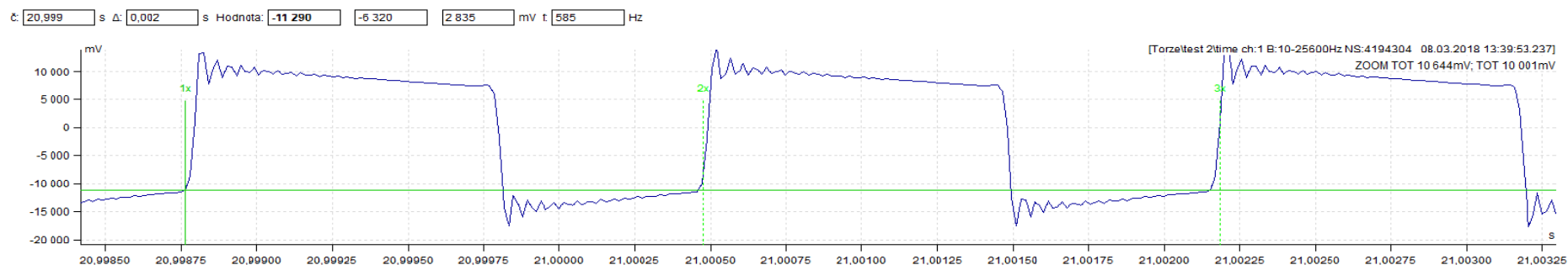
Analyzátor vibrací (přístroj zobrazený na obrázku 17) VA4Pro od firmy ADASH je všestranný nástroj, sloužící pro celou řadu zkoušek a měření – bump testy, vyvažování,

analýzu mazání strojů, rozběhů a doběhů, hluku a samozřejmě vibrací. Umožňuje záznam vstupních dat na interní disk a jejich následnou analýzu. Při experimentu byla nastavena vzorkovací frekvence 64 kHz a snímán výstupní signál z čidel při zvyšující se rychlosti. Následně byly průběhy při třech různých otáčkových frekvencích vizualizovány a analyzovány v diagnostickém programu DDS2017.

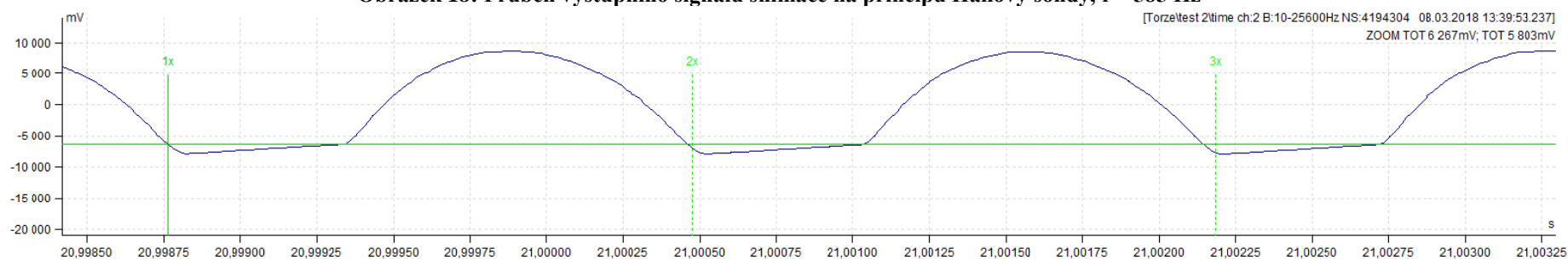


Obrázek 17: Hlavní obrazovka přenosného analyzátoru VA4 Pro

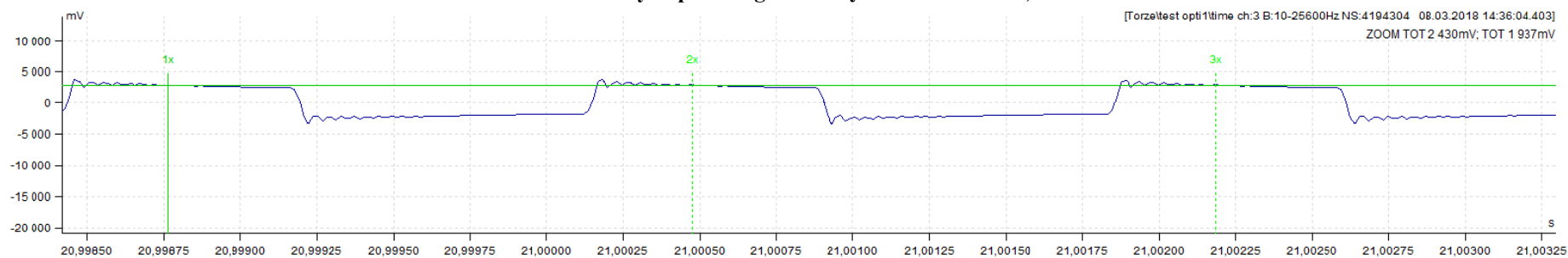
2.3 Výsledky a vyhodnocení experimentu



Obrázek 18: Průběh výstupního signálu snímače na principu Hallovy sondy, $f = 585$ Hz

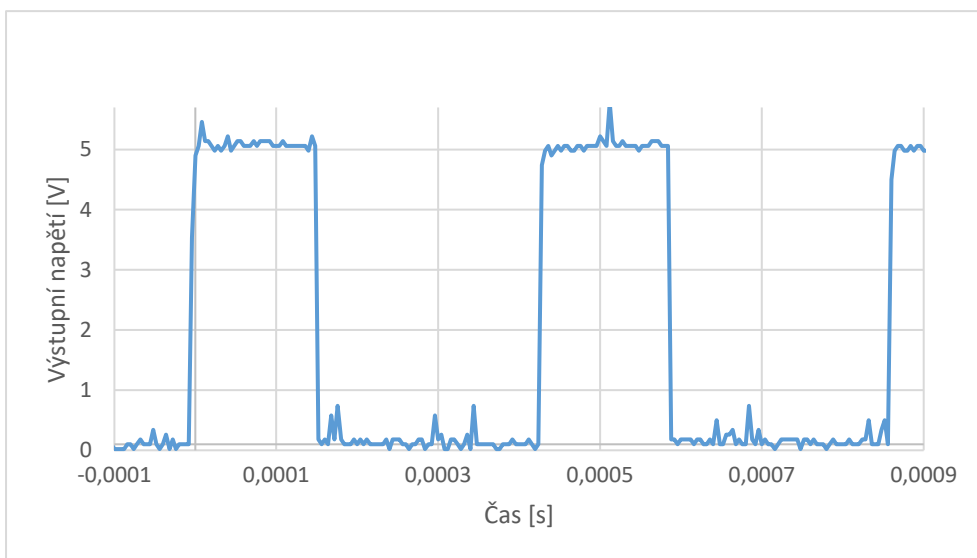


Obrázek 19: Průběh výstupního signálu eddy-current snímače, $f = 585$ Hz

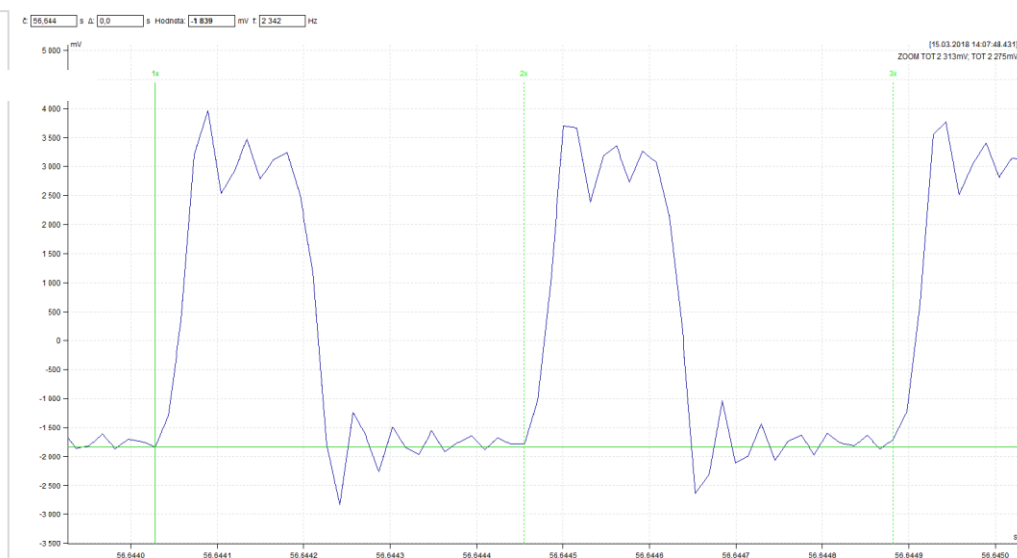


Obrázek 20: Průběh výstupního signálu optického snímače, $f = 585$ Hz

Obrázky 18 - 20 zobrazují signály, poskytované snímači otáček. Frekvence přechodů zubů je určena pomocí periodického kurzoru, v tomto případě 585 Hz. Z grafu lze dobře vyčíst průchody jednotlivých zubů kolem snímačů – zatímco snímač na principu Hallovy sondy a optická sonda mají v podstatě jen dva stavy, eddy-current čidlo velikostí výstupního signálu v podstatě kopíruje tvar zubu. U prvního průběhu je možné rozeznat značný překmit (až 2,5 V), způsobený překlopením klopného obvodu a ustálením výstupního napětí. Pro porovnání je přiložen průběh zaznamenaný osciloskopem. Překmit je zřejmý i u optické sondy, kde je způsoben obvodou převádějícími frekvenci na napětí.

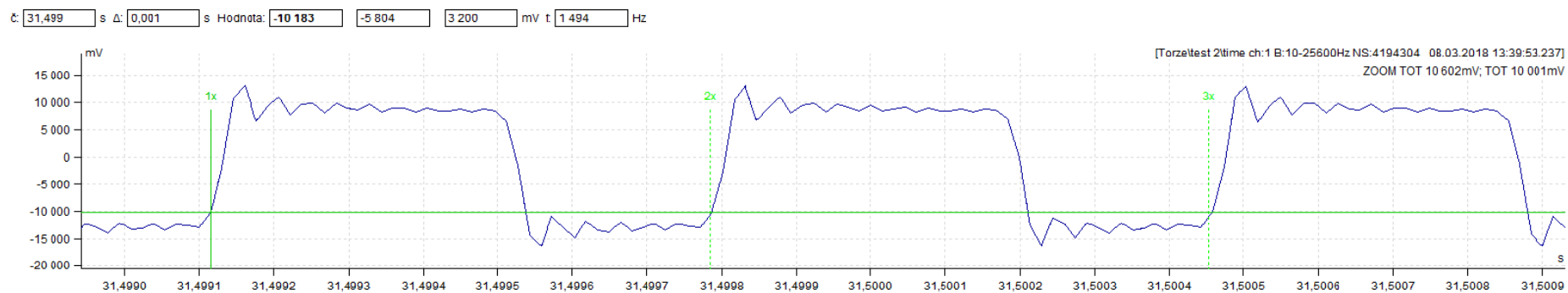
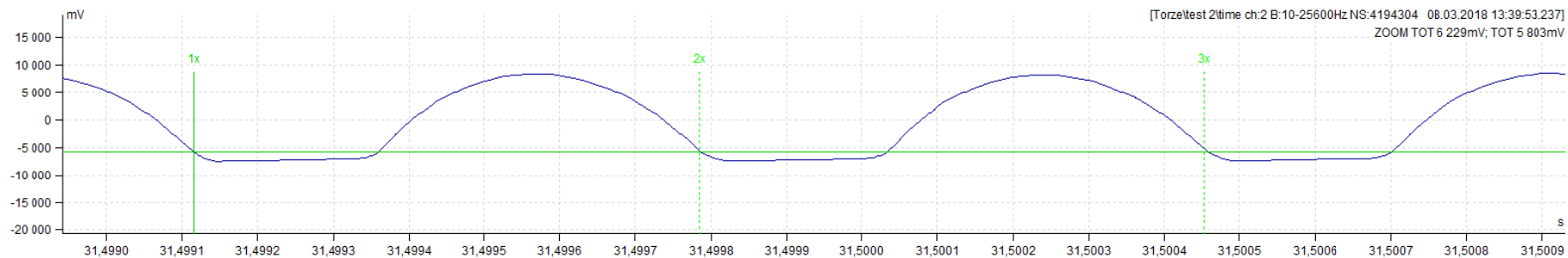
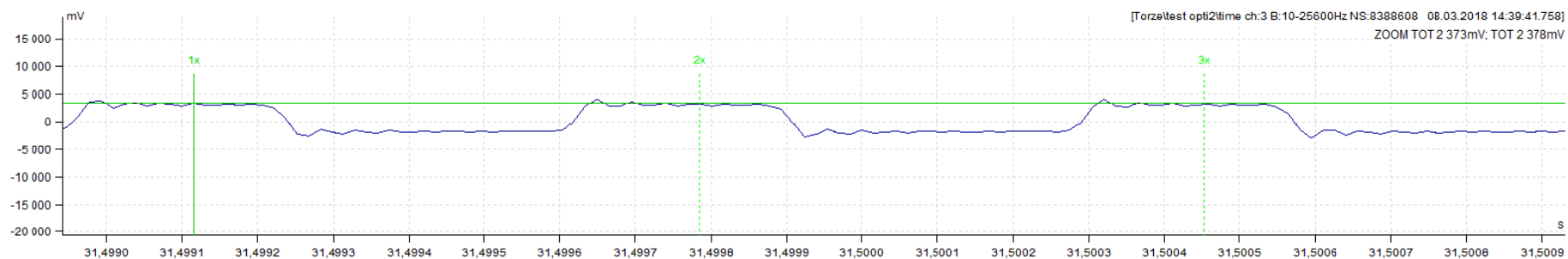


Obrázek 21: Výstupní signál optického čidla zaznamenaný osciloskopem

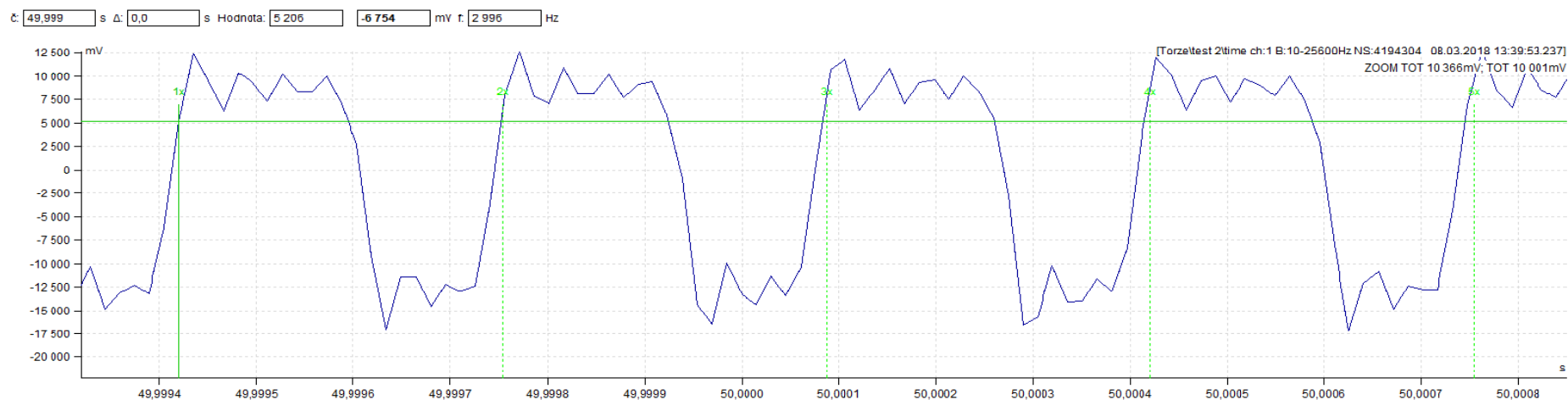


Obrázek 22: Výstupní signál optického čidla zaznamenaný analyzátozem VA4 Pro

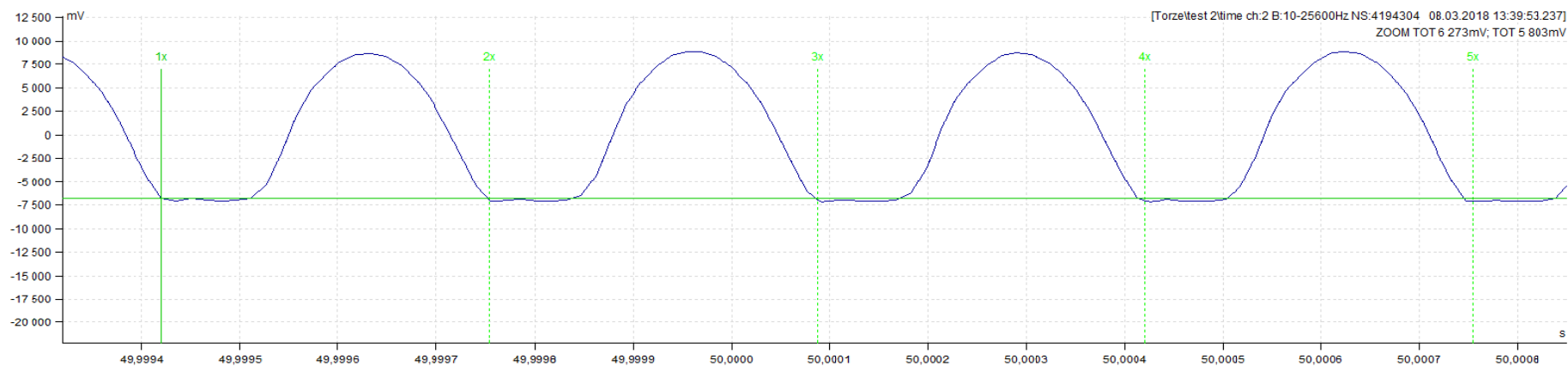
Obrázek 21 zobrazuje výstupní signál optického čidla měřený osciloskopem. Vzhledem k vyšší vzorkovací frekvenci je signál přesněji zaznamenan. Analyzátor také zřejmě není schopen reagovat s dostatečnou rychlostí na skokovou změnu úrovně, což vysvětluje pozvolný nárůst náběžné hrany signálu v obrázku 22 ($\sim 50 \mu\text{s}$), který ve skutečnosti (dle průběhu zachyceného osciloskopem) trvá pouze $10 \mu\text{s}$.

**Obrázek 23: Průběh výstupního signálu snímače na principu Hallovy sondy, $f = 1494$ Hz****Obrázek 24: Průběh výstupního signálu eddy-current snímače, $f = 1494$ Hz****Obrázek 25: Průběh výstupního signálu optického snímače, $f = 1494$ Hz**

Z obrázků 23 - 25 lze vysledovat třikrát vyšší frekvenci průchodu zubů a s tím i třikrát řidší vzorkování signálu. Jednotlivé úrovně jsou ale stále dobře rozeznatelné a k aliasingu nedochází. Nejvěrněji zachyceným signálem je opět výstup z eddy-current čidla (obrázek 25), kde nejsou žádné „skokové“ změny signálu.



Obrázek 26: Průběh výstupního signálu snímače na principu Hallovy sondy, $f = 3400$ Hz

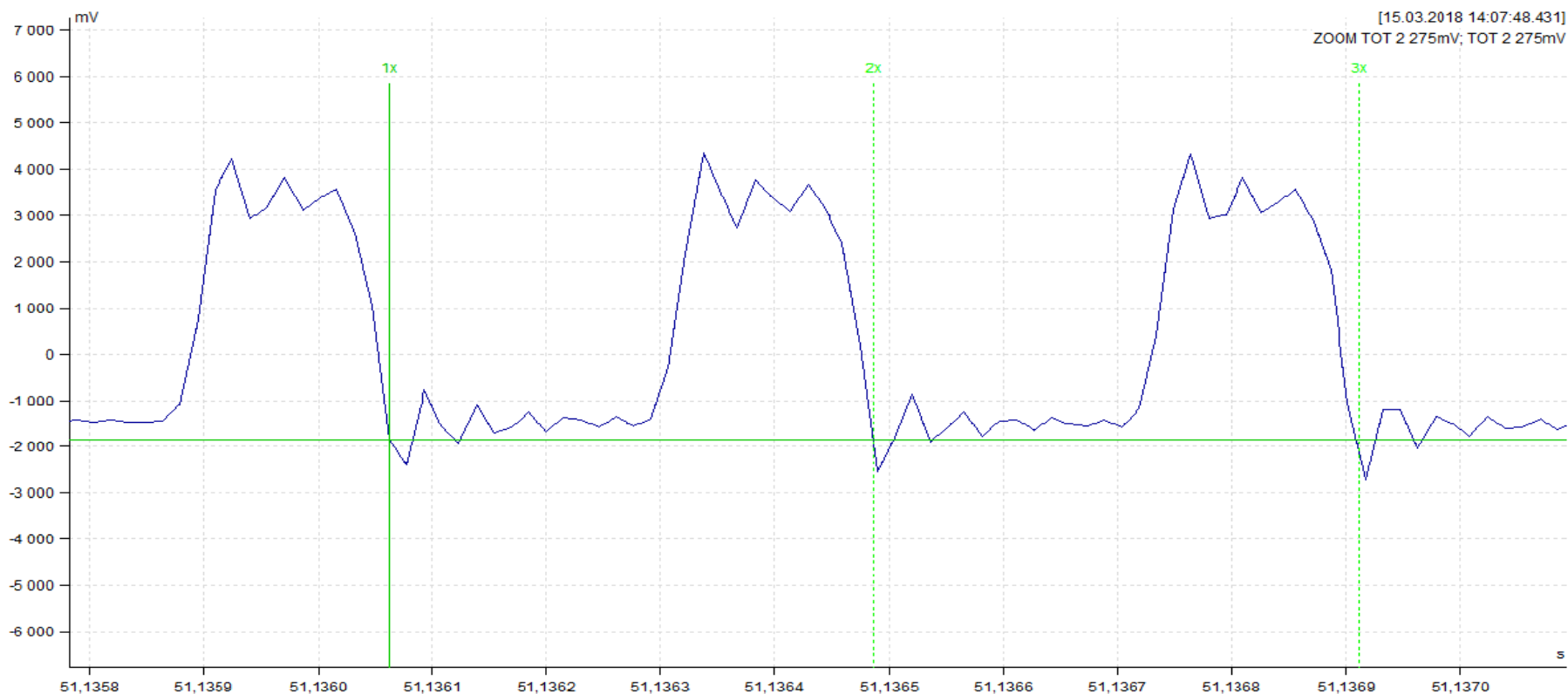


Obrázek 27: Průběh výstupního signálu eddy-current snímače, $f = 3400$ Hz

Z obrázků 26 a 27 je zřejmá frekvence průchodu zubů – 3400 Hz. Zubů je 64, rychlost ozubeného kola je tedy cca 3200 ot/min, tedy 53 ot/s. Během každé otáčky musí být s dostatečným rozlišením zaznamenán průběh při změně stavu – vzorkovací frekvence 64 kHz je v tomto případě nutností, jinak by byla ztracena informace o přechodových jevech po změně stavů.

V případě optické sondy je frekvence nižší, i když se kolo točí rychlostí 3000 ot/min – je to způsobeno odlišným počtem odrazových a pohlcovacích ploch. Těch bylo dohromady 84 – pro stejnou otáčkovou rychlost bude tedy více změn za kratší dobu.

č: 51,136 s Δ: 0,0 s Hodnota: -1 853 mV f: 2 356 Hz



Obrázek 28: Průběh výstupního signálu optické sondy, $f = 2356$ Hz

Průběh viditelný na obrázku 28 je velmi podobný průběhu signálu ze snímače na principu Hallovy sondy. I při maximálních otáčkách je tedy zachován jasný přechod mezi dvěma stavy (tedy mezi částečně pohlceným a odraženým paprskem optické sondy).

Z naměřených dat tedy vyplývá, že co se týče rychlosti odezvy a změn, vykazuje snímač na principu Hallovy sondy a optická sonda velmi podobné vlastnosti a pro detekci torzních kmitů je možné jejich využití. Eddy-current snímače velmi přesně kopírují průběh zubů a mají čistý signál bez přechodových jevů při změně stavu.

Z hlediska rychlosti čidel jsou tedy vyhovující všechny měřené typy. Dalším limitním faktorem jsou vnější vlivy působící na měření. Při experimentu na celý simulátor otáček působí síly způsobené rotací ozubeného kola, které není přesně vyváženo. Celý přípravek tak vibruje, což částečně simuluje běžný provoz, kdy vibrace soustrojí přenesené přes tuhé části a držáky působí na čidla při měření. Při řádném upevnění čidel ovšem nedocházelo k výpadku měření ani u jednoho typu snímačů.

Limitním faktorem optických čidel, které snímají zebrapásky nalepené na soustrojí, mohou být nečistoty na této pásce, které by měnily odrazové vlastnosti. Při běžném provozu a údržbě měřicích míst by ale k tomuto znečištění nemělo docházet. Na měření otáček na ozubených kolech může působit stříkající olej mazání ložisek – tento faktor by ale neměl ovlivnit princip měření jako takový, horký olej pod tlakem ovšem může negativně působit na přívodní kabely snímačů a narušit funkci měřicího řetězce.

3 Porovnání snímačů a zhodnocení použitelnosti pro detekci subharmonických kmitů rotorů elektrárenských generátorů

V této části práce jsou porovnány výsledky experimentu. Vzhledem k náročnosti simulace torzních kmitů v běžných podmínkách jsou do práce také zařazeny torzní události z provozu dvou českých elektráren a proveden rozbor těchto událostí, naměřených pomocí snímačů na principu Hallových sond.

V jedné z elektráren jsou k dispozici data naměřená snímači na bázi Hallových sond. Kromě toho jsou k dispozici data z měření elektromagnetického momentu a napětí v jedné fázi. Při události systém vzorkuje 8 sekund a odebere 24 000 vzorků. Je také nastaven pretrigger, tedy určitý čas před událostí, během kterého je signál rovněž navzorkován a uložen – zde 2 sekundy.

3.1 Definice subharmonických kmitů

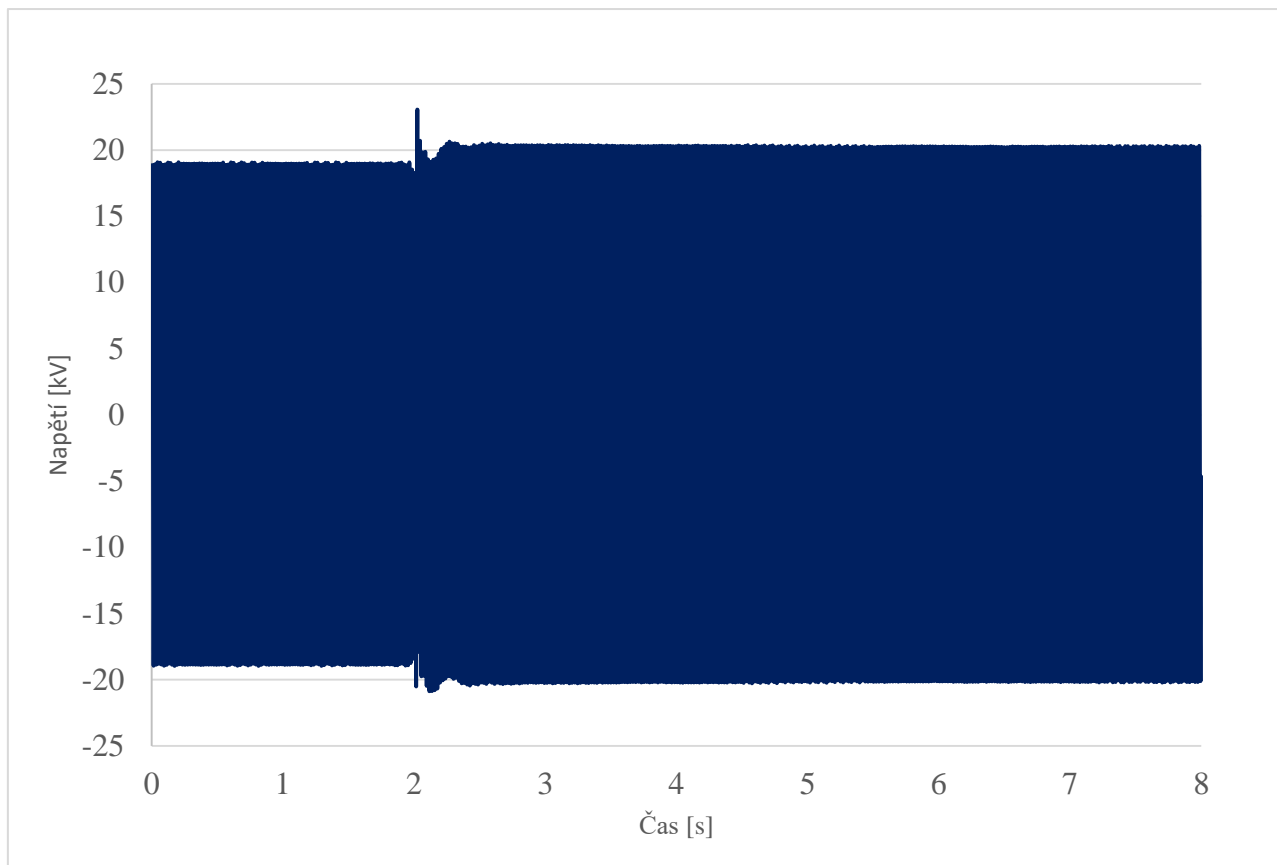
Jako subharmonické kmity jsou označovány vibrace o frekvencích, které jsou podílem rezonanční frekvence (základní frekvence) a racionálního čísla – tedy pořadím dané harmonické [15].

3.2 Porovnání použitelnosti jednotlivých snímačů

Na základě výsledků experimentu lze konstatovat, že všechny tři snímače je možné za vhodných podmínek využít k detekci torzních kmitů. Z hlediska rychlosti snímačů poskytují dobrou odezvu na změnu (tedy detekci průchodu jednotlivých zubů či změnu odrazových vlastností světla). Z mechanického hlediska je potřeba zajistit pevné uchycení a odolnost vůči vibračním stroje. Nezbytností pro použití eddy-current snímačů a snímačů na principu Hallových sond je přítomnost ozubeného kola pro měření otáček, ideálně na obou stranách hřídele. Pro měření pomocí optických snímačů je třeba nalepit po obvodu rotoru na vhodných místech zebrapásky. K vyhodnocení je zapotřebí speciální měřicí aparatura – převodníky či měřicí karty, které dokážou ze signálu určit přítomnost torzních kmitů.

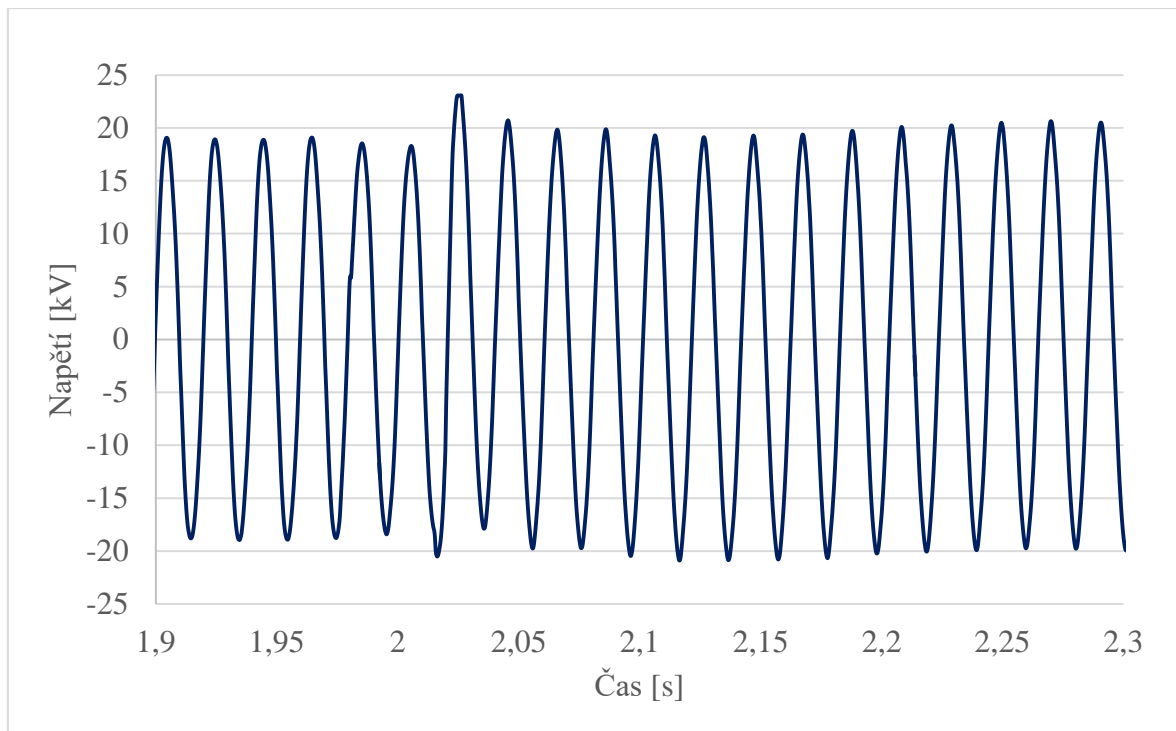
3.3 Událost 1A – Vypnutí generátorového vypínače

Tato událost nastala po vystavení zemní ochrany rotoru generátoru a následnému vypnutí generátorového vypínače.



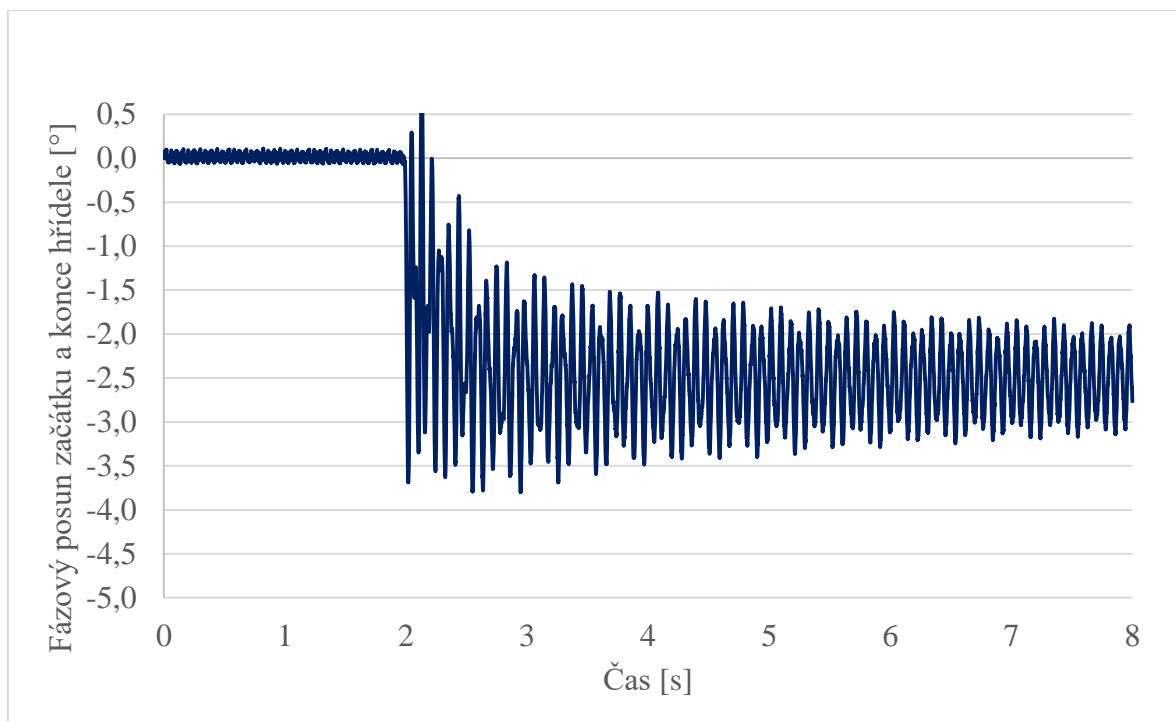
Obrázek 29: Průběh napětí v jedné z fází během vypnutí generátorového vypínače

Na obrázku 29 vidíme ustálený stav trvajícím od začátku měření až do události v čase 2 s. Zde došlo k vypnutí generátorového vypínače. Po přechodovém ději se hodnota ustálila na vyšší amplitudě.



Obrázek 30: Detail průběhu napětí v jedné z fází během vypnutí generátorového vypínače

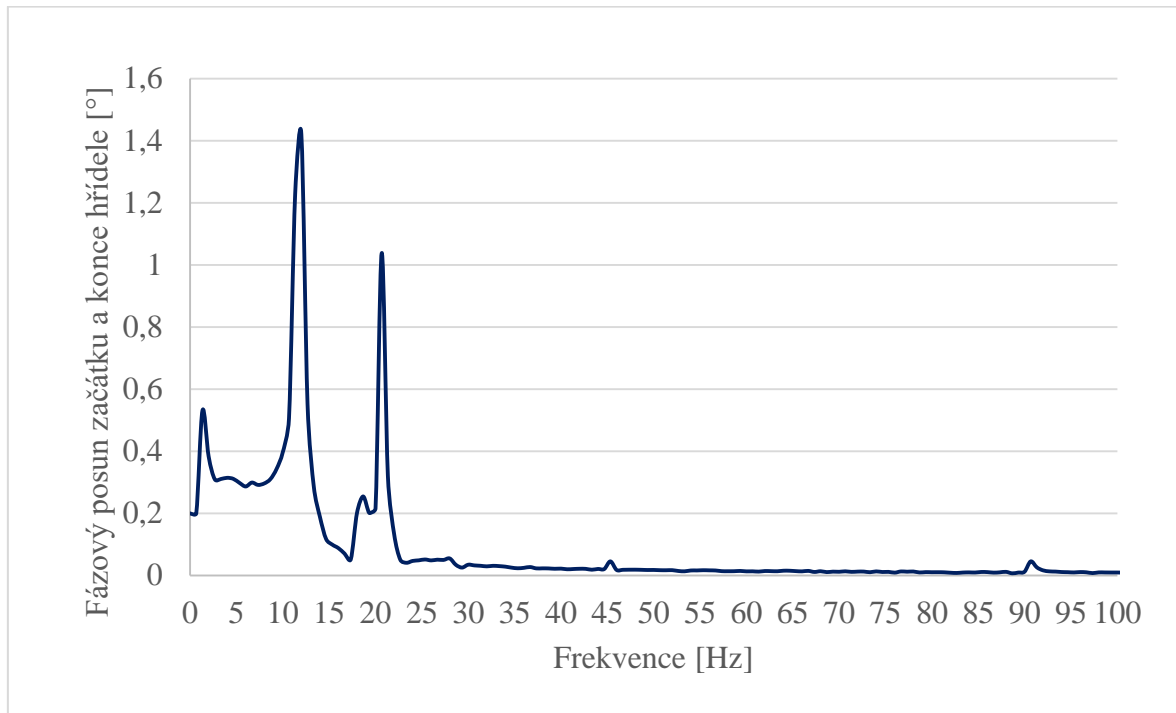
Na obrázku 30 je zobrazen detail přechodového jevu v okamžiku vypnutí generátorového vypínače.



Obrázek 31: Průběh statického zkrutu hřídele během vypnutí generátorového vypínače

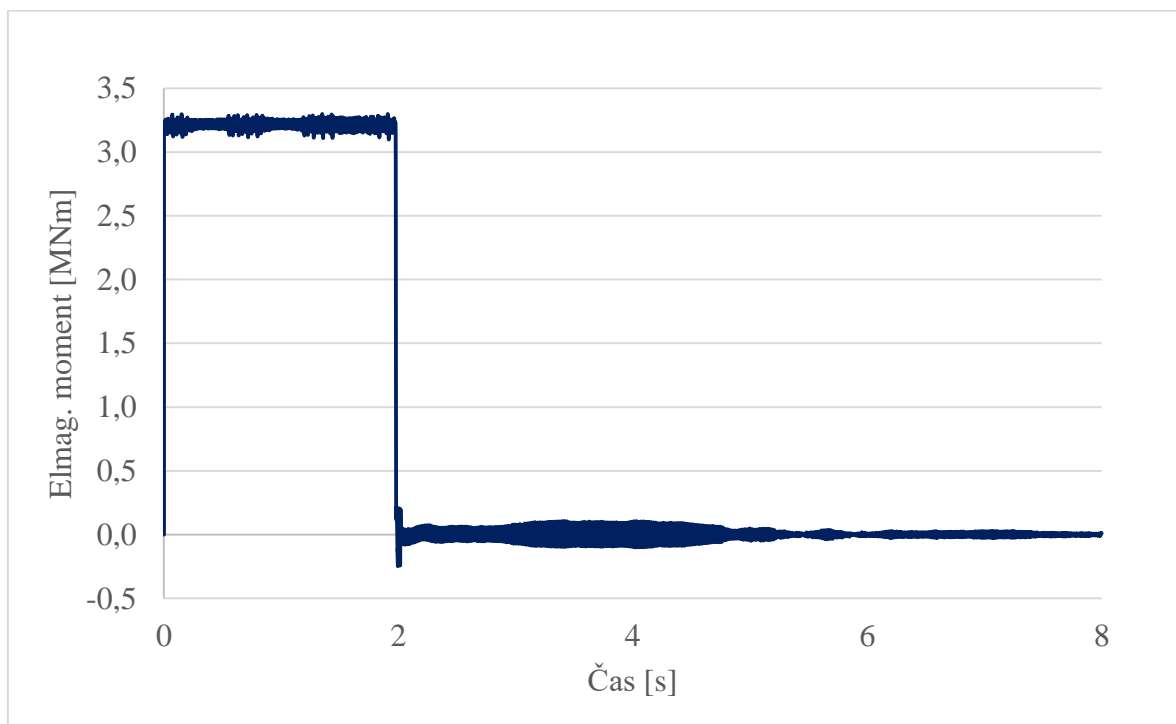
Na obrázku 31 jsou patrné torzní kmity, vyjádřené velikostí fázového posunu mezi začátkem a koncem hřídele, kde jsou umístěna ozubená kola pro měření otáček. Střední

hodnota zkrutu dosahuje po události $-2,5^\circ$ s amplitudou až $1,5^\circ$, což při obvodu hřídele 1250 mm znamená vzájemné pootočení ozubených kol o více jak 43,6 mm.



Obrázek 32: Spektrum torzních kmitů rotoru

Při spektrální analýze (obrázek 32) torzních kmitů jsou silně patrné dvě vlastní subharmonické frekvence, které vybudil ráz při vypnutí vypínače. Je to 12 a 21 Hz – s touto frekvencí dochází k nejvýraznějším torzním kmitům.

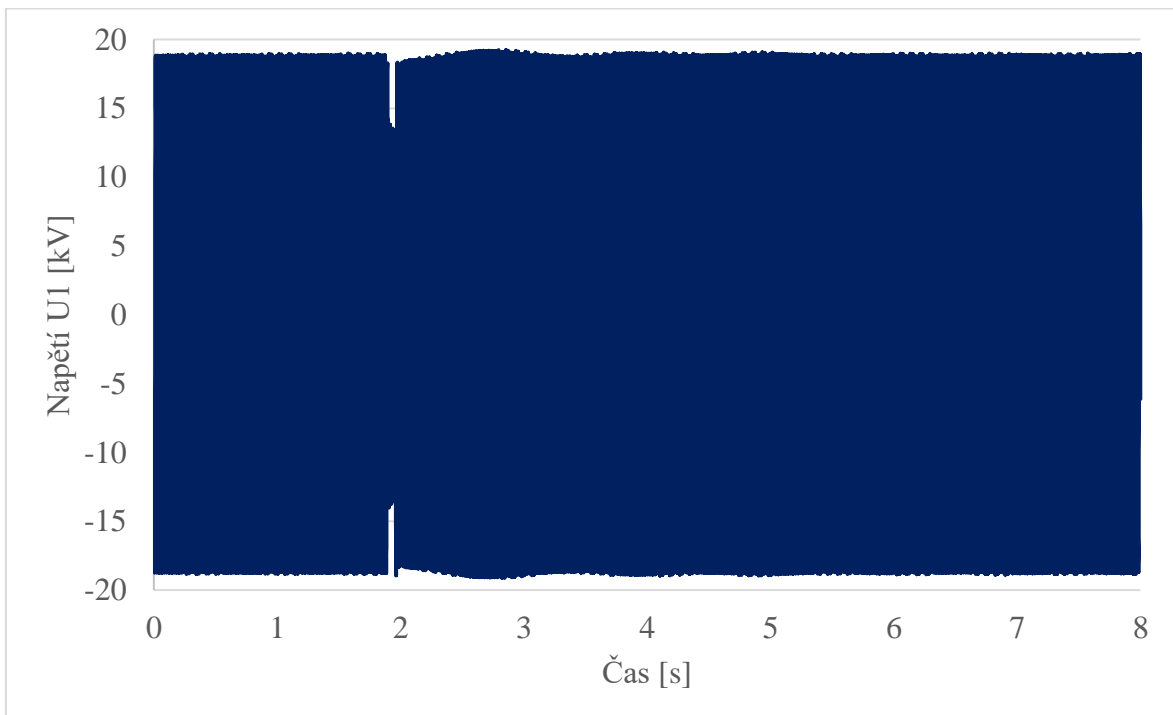


Obrázek 33: Průběh elmag. momentu ve vzduchové mezeře

Na obrázku 33 je zobrazen průběh momentu, který po vypnutí vypínače poklesne na nulu z přirozené hodnoty.

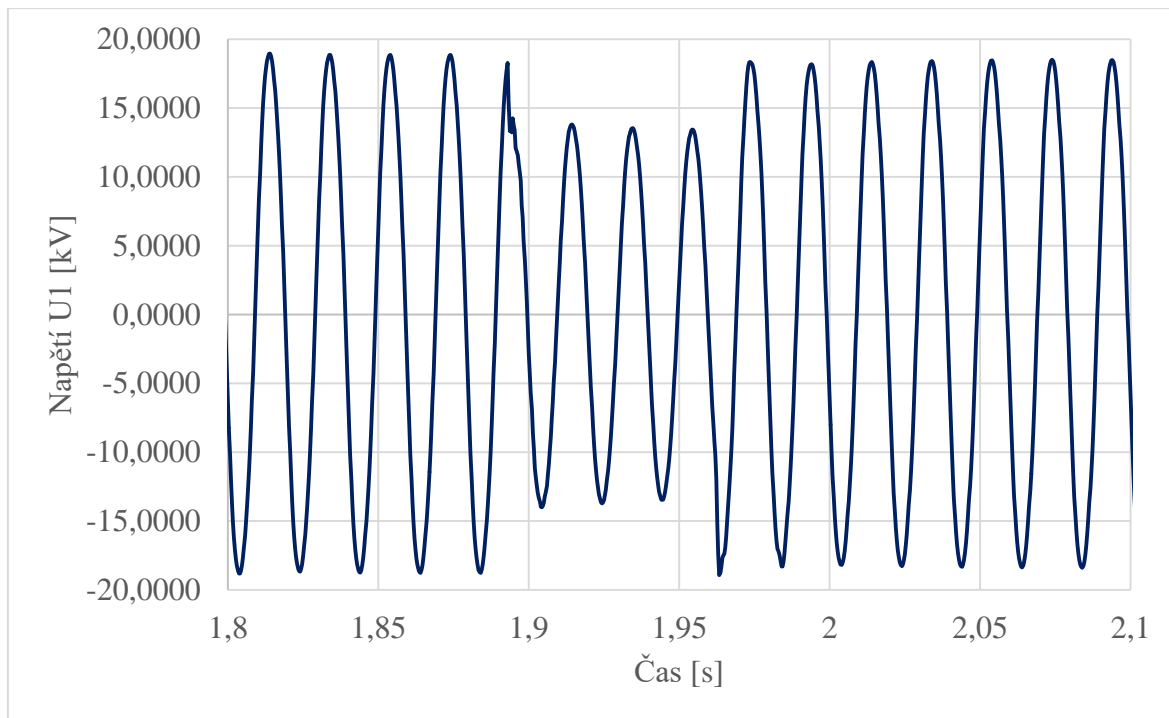
3.4 Událost 1B – Výpadek přenosové linky a opětovné zapnutí

Při této události došlo k výpadku přenosové linky, po kterém zafungovala automatika OZ a došlo k opětovnému připojení linky.



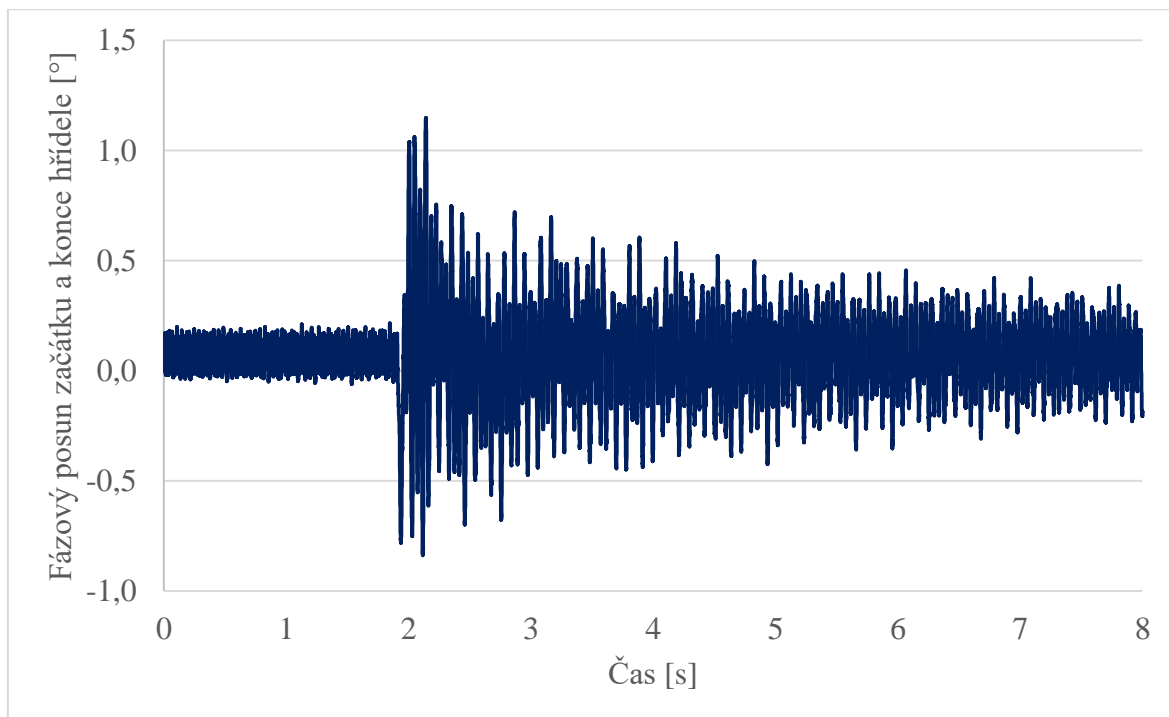
Obrázek 34: Průběh napětí v jedné z fází během výpadku přenosové linky

Na obrázku 34 je v čase 1,88 s patrný náhlý pokles napětí, zapříčiněný výpadkem přenosové linky.



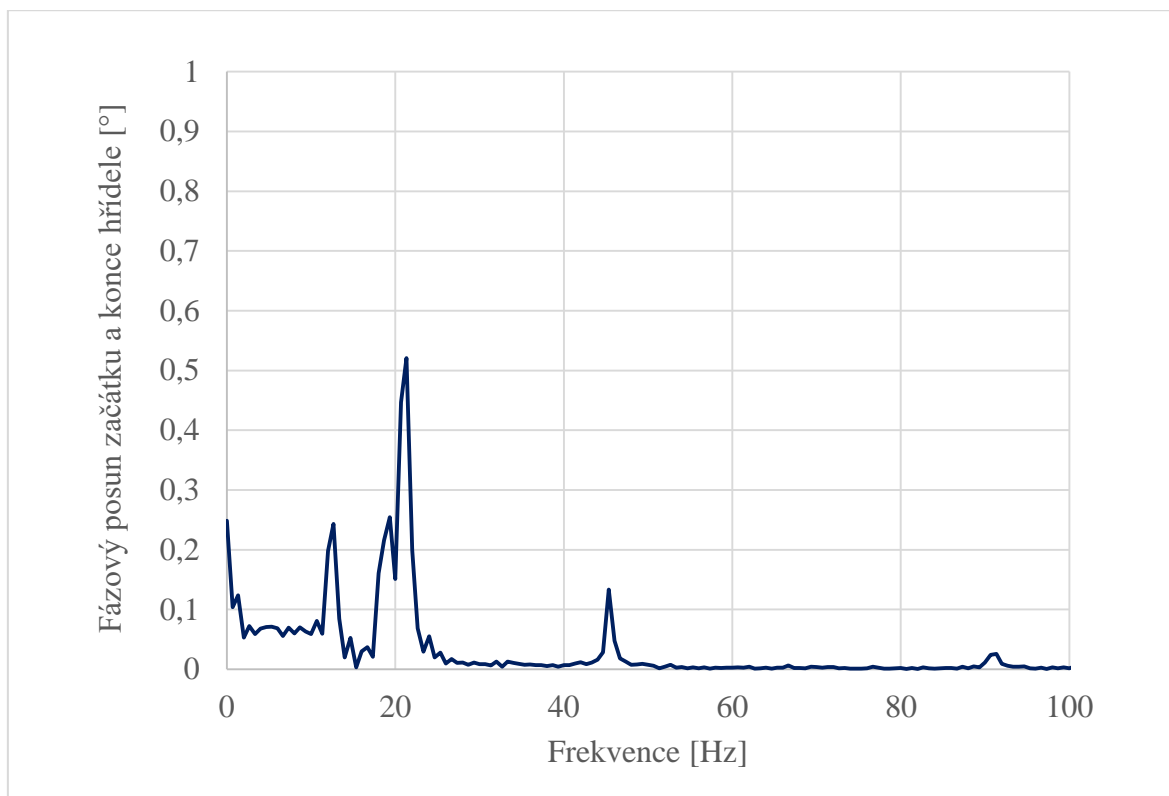
Obrázek 35: Detail průběhu napětí v jedné z fází během výpadku přenosové linky

V detailu průběhu napětí (obrázek 35) je dobře patrný pokles při výpadku přenosové linky i následné navýšení po přibližně 100 ms po zafungování automatiky OZ.



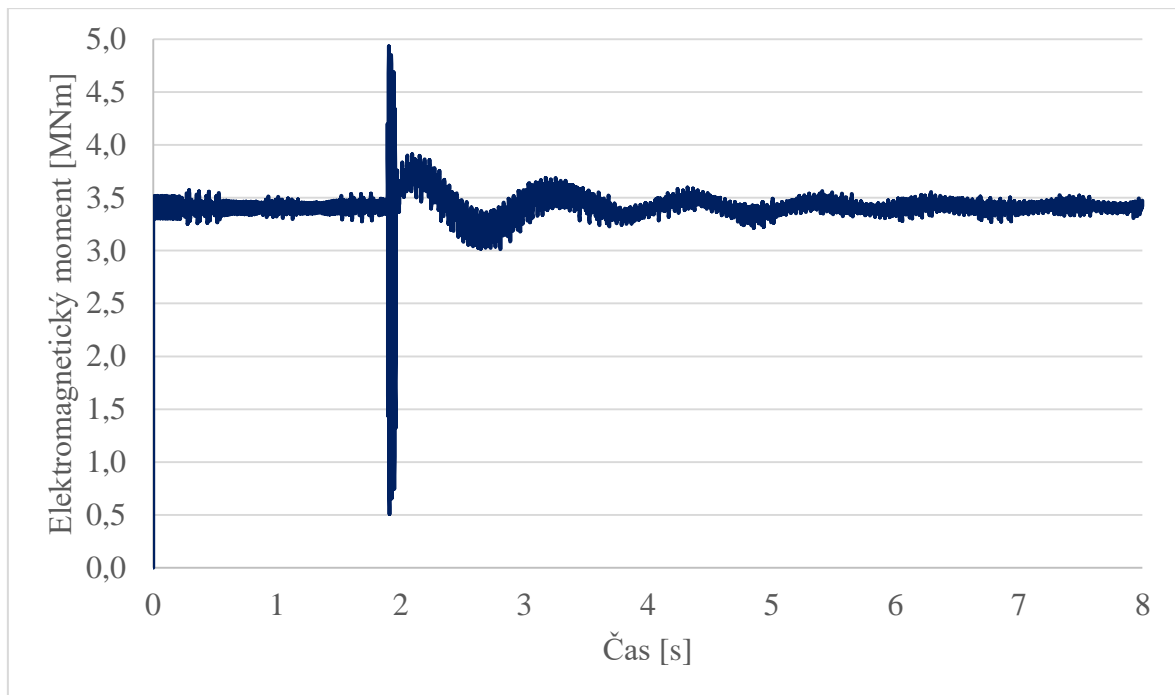
Obrázek 36: Průběh statického zkrutu hřídele během výpadku přenosové linky

Průběh torzních kmitů (obrázek 36), reprezentovaných fázovým posunem začátku a konci hřídele, ukazuje značný skokový nárůst torze v okamžiku výpadku. Po opětovném zapnutí linky se velikost torze zmenší a negativní jevy postupně odeznívají. Měřený úsek v délce 8 sekund je příliš krátký k ukončení přechodného jevu.



Obrázek 37: Spektrum torzních kmitů rotoru

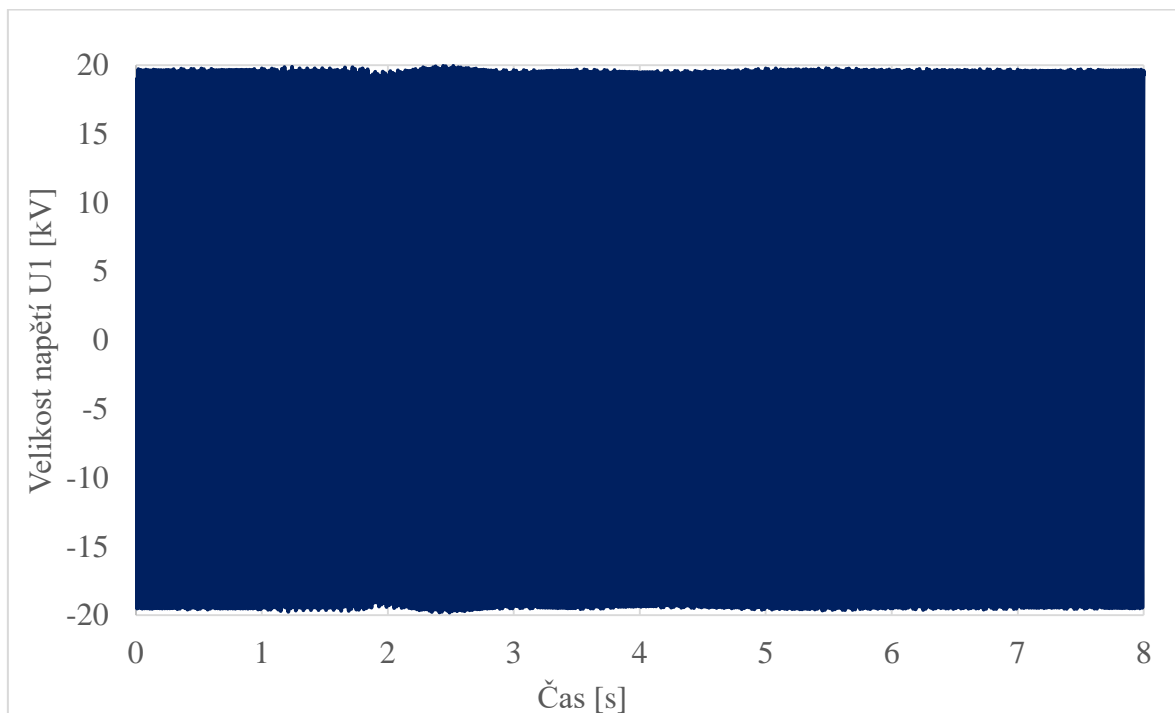
Ve spektru (obrázek 37) je nejvýraznější frekvencí torzních kmitů 21 Hz. Oproti tomu špička na 12ti Hz je výrazně menší než v případě vypnutí generátorového vypínače.



Obrázek 38: Průběh elang. momentu ve vzduchové mezeře během výpadku přenosové linky

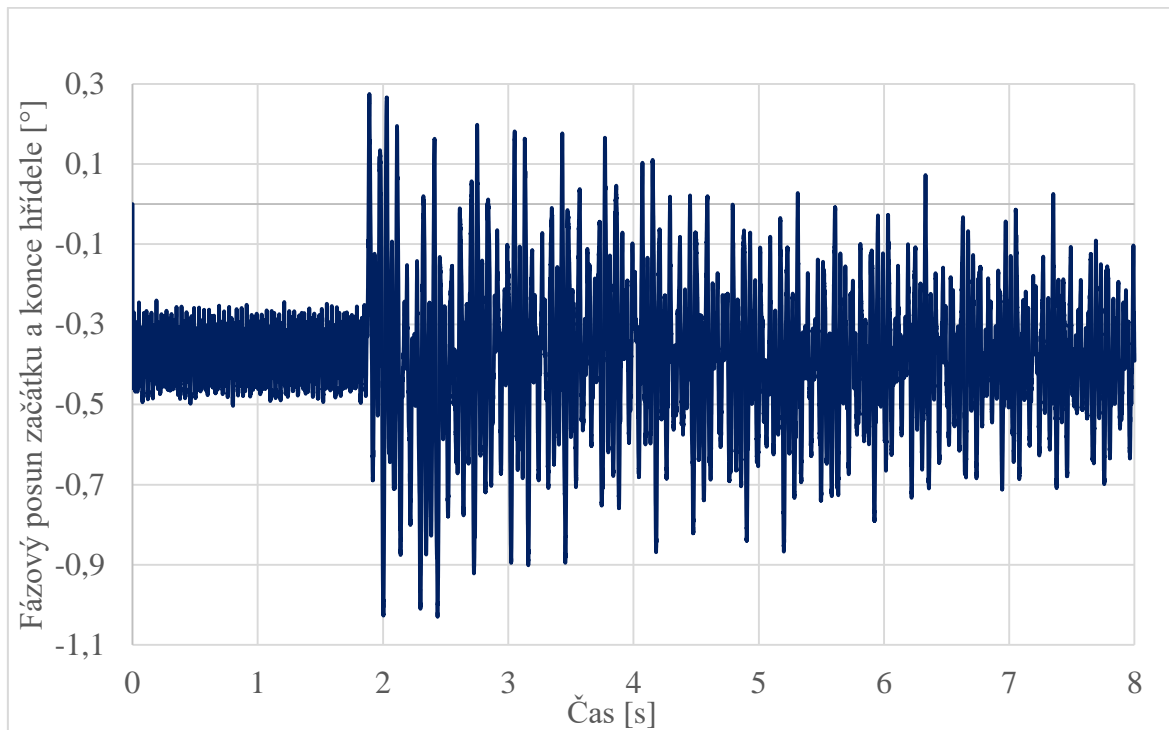
Velmi zajímavý je i průběh elektromagnetického momentu ve vzduchové mezeře (obrázek 38). V okamžiku po výpadku linky dojde k rozkolísání, po opětovném zapnutí se během čtyř sekund vrací na původní hodnotu přibližně 3,4 MNm.

3.5 Událost 1C – zapnutí přenosové linky



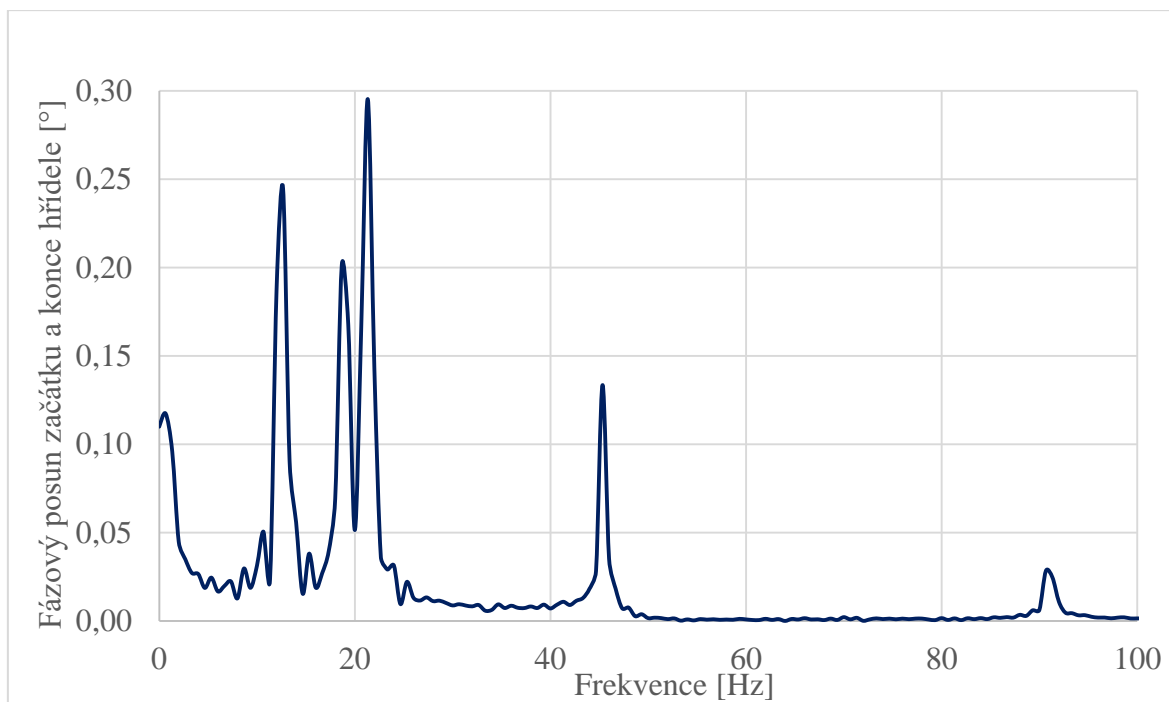
Obrázek 39: Průběh napětí v jedné z fází během zapnutí přenosové linky

Na průběhu napětí v jedné fázi (obrázek 39) je zřejmý pouze nepatrný pokles úrovně napětí, způsobený připojením přenosové linky. Ani při detailnějším přiblížení nejsou viditelné žádné větší změny, proto zde příčinný obrázek není publikován.

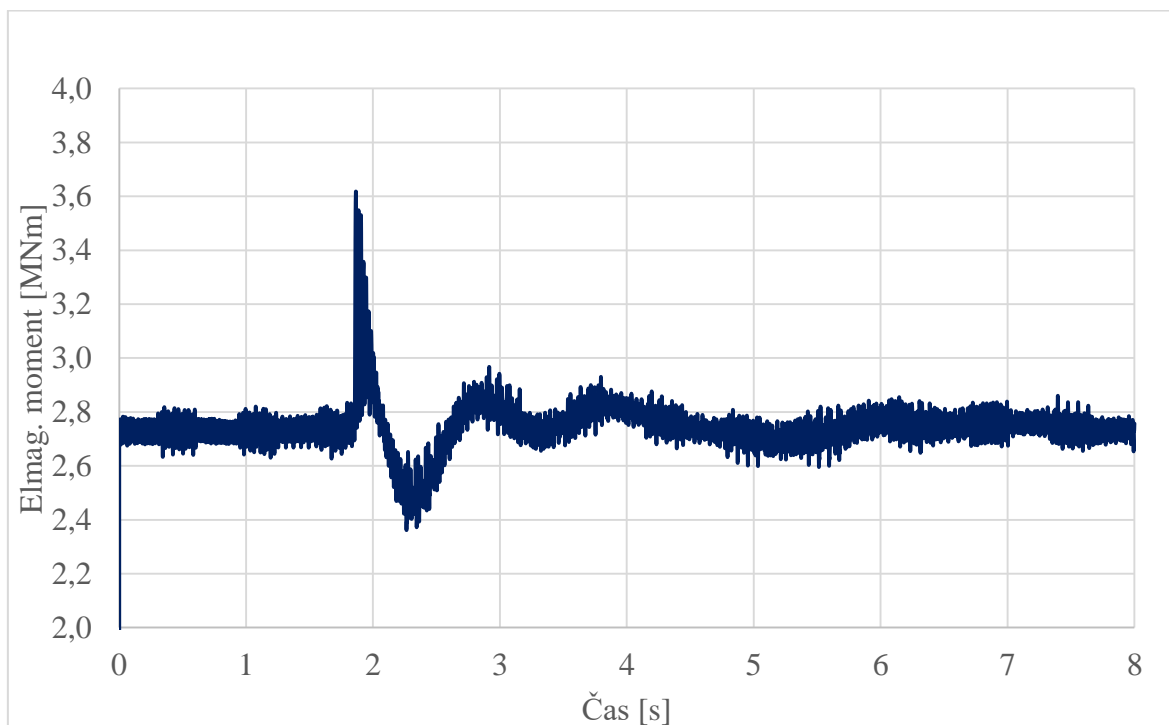


Obrázek 40: Průběh statického zkrutu hřídele během zapnutí přenosové linky

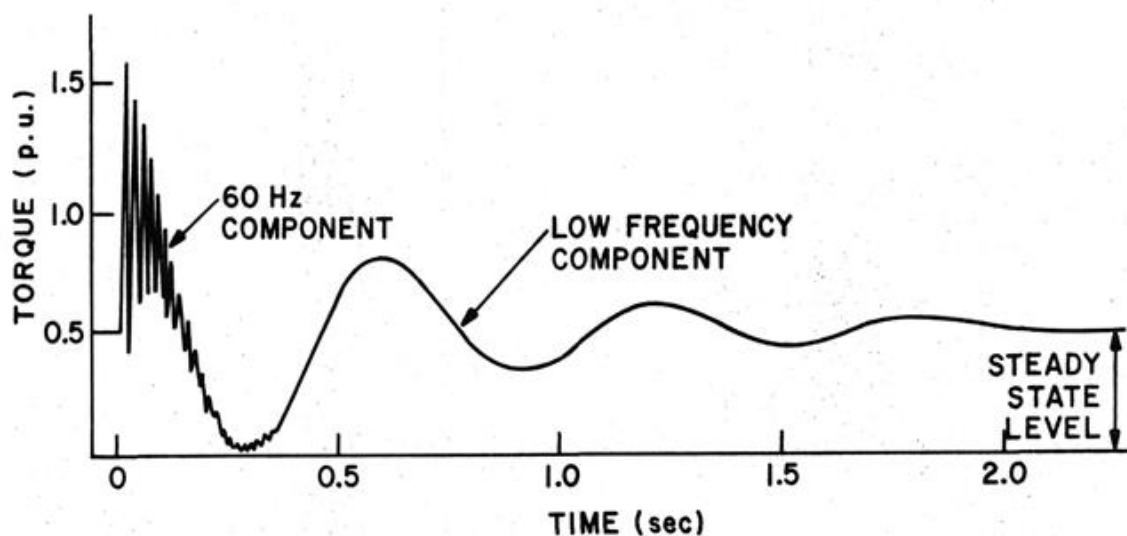
Oproti tomu průběh torzních kmitů (obrázek 40) vykazuje některé zvláštnosti. Předně původní ustálený stav, kdy je soustrojí provozováno se záporným zkrutem $0,4^\circ$ - což odpovídá asi 4,35 mm. Vzhledem k celkovým rozměrům soustrojí a hřídele se ovšem jedná o nepatrnou hodnotu. Po připojení přenosové linky se ovšem opět vybudí vlastní torzní frekvence a hřídel se rozkývá s amplitudou až 1° – začátek a konec hřídele jsou tedy pootočený přibližně o 1,1 cm a tyto kyvy postupně odeznívají s periodou několika desítek sekund.

**Obrázek 41: Spektrum torzních kmitů**

Ve spektru (obrázek 41) jsou opět nejvýraznější vlastní torzní frekvence 12 a 21 Hz. Vybuzeny jsou ale i frekvence 19 Hz a 44 Hz jako v předchozím případě. Měření torzních kmitů tedy dává důležitou informaci o přítomnosti subsynchronních torzních kmitů, které nemají velkou amplitudu, ale v dlouhodobém měřítku velmi negativní dopad na hřídel z důvodu únavy materiálu.

**Obrázek 42: Průběh elmag. momentu ve vzduchové mezeře při zapnutí přenosové linky**

Průběh elmag. momentu (obrázek 42) má tentokrát výrazný nárůst po zapnutí přenosové linky a poté se ustaluje na původní hodnotě. 2,7 MNm ukazuje na nižší aktuální výkon soustrojí než jmenovitý.



Obrázek 43: Typický průběh elmag. momentu při zapnutí přenosové linky [1]

Pro ilustraci je zde porovnání s teoretickým průběhem momentu při zapnutí přenosové linky (obrázek 43). Obrázek reflektuje severoamerickou síť, která má frekvenci 60 Hz.

3.6 Shrnutí vyhodnocení torzních událostí

Výše uvedené tři události mají rozdílnou příčinu, ale podobné průběhy. Torzní kmitů jsou vybuzeny ději probíhajícími v blízké síti. Ukazuje se také užitečnost měření elektromagnetického momentu ve vzduchové mezeře – jeho náhlé změny korelují s nárůstem torzních kmitů hřídele.

Důležitým faktorem při vyhodnocování torzních událostí je kromě jejich amplitudy také doba trvání těchto dějů. Události způsobené manipulacemi v blízké síti zpravidla odeznívají s periodou několika desítek sekund. Četnost událostí je pak různá, záleží zejména na frekvenci změn konfigurace sítě, případně na frekvence poruchových událostí. Obecně ale u rozvětvených sítí (UCTE) nedochází k dlouhotrvajícím torzním kmitům a jedná se o kratší události, které soustrojí ohrožují z dlouhodobého hlediska.

4 Závěr

Během psaní této práce jsem získal detailní náhled do problematiky torzních kmitů. Ačkoli je tento fenomén známý již delší dobu, kromě některých vážnějších havárií a jejich rozboru není tomuto nepříznivému jevu věnována přílišná pozornost. Zatímco systémy zabezpečení točivých strojů jsou v dnešní době standardem na každé elektrárně i u mnoha menších strojů, torzní kmity se vyhodnocují pouze ve zlomku případů. Jak bylo v práci popsáno, torzní kmity způsobují největší škody zejména při dlouhodobém působení na hřídel. Tyto kmity mívají různou příčinu, nejčastěji ale vznikají vybuzením z okolní sítě – přičemž poměrně rychle odeznívají, a proto nepůsobí hřídeli vážnější poškození.

Jiná situace může nastat u elektráren, které jsou spojeny s okolní sítí jedinou přenosovou linkou, dlouhou několik desítek až stovek kilometrů. Dalším problémem může být blízkost místa velkého odběru energie s nesymetrickou charakteristikou – například indukční pece. V takovém případě torzní kmity mohou přetrvávat až několik hodin s poměrně vysokou amplitudou. V případě dlouhého vedení již má smysl investovat do monitorovacího systému torzních kmitů – při vysokých hodnotách torze je možné změnit konfiguraci sítě například přepojením odboček, čímž se změní rezonanční frekvence sítě, která se přiblížila vlastním torzním frekvencím částí turbogenerátoru.

V současnosti se užívá několika typů systémů, zejména optických snímačů a zebřapásek, snímačů na principu Hallových sond či kombinace akcelerometrů a tenzometrů či magnetostričních snímačů.

Z hlediska ceny monitorovacích systémů může být pro provozovatele turbosoustrojí zajímavým řešením užití eddy-current snímačů. Ty se používají na všech velkých strojích a pro provozovatele se jedná o komponenty, jež zná, nejsou drahé a jsou v podstatě zaměnitelné s jinými měřicími kanály. Nevýhodou může být potřeba ozubených kol na začátku a konci hřídele, či mezi generátorem a nízkotlakým dílem turbíny (kde dochází k největším torzním momentům) – zde již záleží na konkrétní konstrukci strojů.

Při výběru vhodného monitorovacího systému torzních kmitů je vhodné hledět zejména na dispozici stroje – zda je osazený ozubenými koly, zda je na hřídeli místo pro

nalepení zebřapásku, jaká je prašnost kolem stroje, jaká bude dostupnost snímači při instalaci systému, jaká bude náročnost demontáže v případě oprav stroje, jak bude systém náročný na obsluhu a podobně. Systém pro monitorování torzních kmitů nemusí být nutností pro každou elektrárnu, může se ale projevit jako důležitý diagnostický nástroj například v instalacích poblíž větších rozveden, místech s velkou nesymetrickou spotřebou, v místech s málo rozvětvenou přenosovou sítí a podobně. Je také pravděpodobné, že v budoucnu bude k torzním událostem docházet spíše s větší intenzitou z důvodu zvětšujícího se podílu obnovitelných zdrojů dodávajících do soustavy. Vzhledem k stochastickým výkonům, jež do sítě dodávají, mohou častěji vznikat nepříznivé přechodové jevy a ty budou budit vlastní torzní frekvence hřídelů turbosoustrojí.

Použité prameny

- [1] STEIN, J., ZAYICEK, P.: *Steam Turbine-Generator Torsional Vibration Interaction with the Electrical Network* [online]. 2005 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: ieeexplore.ieee.org/document/6345745/
- [2] KREIDL, M.: *Diagnostické systémy*, 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001, 352 s. ISBN 80-01-02349-4.
- [3] BUSKIRK, E.: *Torsional Dynamics: Large 2-pole and 4-pole Steam Turbine Powertrains* [online], 05/2013 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: https://www.gepower.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en_US/documents/technical/ger/ger-4724-torsional-dynamics-large-2-and-4-pole-steam-turbine-powertrains.pdf
- [4] MRŇÁK, L., DRDLA, A.: *Mechanika, pružnost a pevnost*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1978, 366 s.
- [5] VÁCLAVÍK, J., Chvojan, J.: *Torsion vibrations monitoring of turbine shafts*, [online], Procedia Structural Integrity, Volume 5, [online] 2017, Str. 1349-1354, ISSN 2452-3216. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321617303153?via%3Dihub>
- [6] GIESECKE, H. D.: *Steam turbine-generator torsional response due to interaction with the electrical grid*. Publikováno v: 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting [online]. IEEE, 2012, 2012, s. 1-6 [cit. 2018-04-11]. ISBN 978-1-4673-2729-9. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6345745/>
- [7] BOVSUNOVSKIJ, A., CHERNOUSENKO, O., SHTEFAN, E., BASHTA, D.: *Fatigue damage and failure of steam turbine rotors by torsional vibrations* [online]. Publikováno v: Strength of Materials, 1/2010, Vol. 42 Issue 1, p108-113. Dostupné z http://www.ipp.kiev.ua/jpp-full/2010/2010_01e/108-113.pdf

[8] Firma Laborelec: *Laborelec Torsional Vibration Monitoring System*, prezentace pro zákazníky a obchodní partnery

[9] HALLIWELL, N.A.: *The laser torsional vibrometer: a step forward in rotating machinery diagnostics* [online]. Publikováno v: *Journal of Sound and Vibration*, Volume 190, Issue 3, 1996, Pages 399-418, ISSN 0022-460X, Dostupné z:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X96900711>

[10] MILES, T.J.: *Torsional and bending vibration measurement on rotors using laser technology*, [online]. 1999, *Journal of Sound and Vibration*, 226 (3), pp. 441 - 467. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X99922538>

[11] *Zebra Tape Butt Joint Correction for Torsional Vibrations*. Siemens.com [online]. 2016 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: <https://community.plm.automation.siemens.com/t5/Testing-Knowledge-Base/Zebra-Tape-Butt-Joint-Correction-for-Torsional-Vibrations/ta-p/354782>

[12] HORVATH R., *Analog torsional vibration sensor* – prezentace pro zákazníky a obchodní partnery

[13] VOJÁČEK, A.: *Bezkontaktní indukční snímače přiblížení - obecný popis*. Automatizace.hw.cz [online]. 20.11.2014 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/komponenty-mereni-a-regulace/indukcni-snimace-priblizeni-obecny-popis.html>

[14] *PR 9376 - snímač otáček: Datový list*. Profess.cz [online]. [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: http://www.profess.cz/dynamic/produkty/dokument/PR9376_CZ.pdf

[15] FORMÁNEK, J.: *Úvod k teoretickým základům cvičení z předmětu Měřicí technika* [online]. [cit. 27.04.2018] Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~formanek/VYUKA/Data1/MT/obecne-prednasky/Uvod.pdf>