

## Oponentský posudek dizertační práce

Název: **Identifikace vlastností ucpávek rotačních strojů**

Autor: **Ing. Karel KALISTA**

Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, Katedra kybernetiky,  
Univerzitní 8, 306 14 Plzeň

Oponent: **doc. Ing. Petr BLAHA, Ph.D.,**

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,  
Technická 12, 616 00, Brno, [blahap@vut.cz](mailto:blahap@vut.cz)

Na základě vyžádání posouzení dizertační práce Ing. Karla Kalisty si dovoluji předložit oponentský posudek.

### 1. Aktuálnost tématu dizertační práce, zhodnocení významu dizertační práce pro obor

Předložená dizertační práce Ing. Kalisty se zabývá identifikací silových koeficientů labyrintových ucpávek, které jsou používány v parních turbínách, a to na základě měření na reálném vyvinutém experimentálním zařízení.

**Téma práce je velmi specifické.** Článků, které se zabývají studiem chování a modelováním labyrintových ucpávek proto není mnoho. Přesto se postupně objevují nové, což dokazuje, že firmy, které používají labyrintové ucpávky nejsou spokojené s aktuálním stavem poznání. Přesnější pochopení dějů v labyrintových ucpávkách by mohlo umožnit realizovat turbíny s vyšší účinností. **Ukazuje se, že existující softwarové nástroje pro modelování chování labyrintových ucpávek není možné snadno validovat,** protože měření na reálných zařízeních je velmi obtížné, nebo nemožné.

**Téma práce proto považuji za aktuální, vyžadující široký rozsah znalostí a dovedností. Obtížnost práce shledávám v nutnosti jejího multidisciplinárního pojetí.** Vyžaduje zvládnutí různých inženýrských přístupů, jejich zkombinování a nepochybně, jak je vidět v práci, zahrnutí výzkumných činností v oblasti kybernetika.

### 2. Splnění cílů dizertační práce

Cíle dizertační práce jsou popsány v kapitole 2.4. Hlavním cílem práce bylo vyvinout testovací zařízení s jehož použitím by bylo možné vyvinout metody a nástroje experimentální identifikace dynamických koeficientů ucpávek. V původním návrhu testovacího zařízení se počítalo s využitím aktivních magnetických ložisek pro uložení rotoru. Bylo v plánu realizovat zpětnovazební řízení AML, které by umožňovalo generovat stabilní tvar orbity po dobu trvání experimentu. Dále bylo v plánu navrhnout a realizovat způsob měření sil, kterými ucpávky působí na rotor a srovnat je s měřením tlaků v kavitách labyrintové ucpávky. **Cíle dizertační práce považuji na základě popisu v této práci a publikovaných článcích za splněné.** Byl proveden rozbor modelování chování v ucpávce a možnosti identifikace silových dynamických koeficientů ucpávky. Bylo navrženo a

realizováno experimentální zařízení pro identifikaci ucpávek, ve kterém je rotor uložený v aktivních magnetických ložiscích. Práce se zabývala návrhem řízení AML, které zajišťuje potlačení změřených rezonancí systému a současně umožňuje vybudit definované asynchronní vibrace rotoru a generovat požadované orbity rotoru. Bylo navrženo měření sil působících na rotor v požadovaných směrech pomocí snímačů síly, které jsou umístěny pod domečky AML. Nakonec byla navržena a provedena experimentální identifikace silových koeficientů ucpávky.

### 3. Vyjádření k postupu řešení problému a k výsledkům disertace

V následujících odstavcích je popsána řada postřehů, doporučení a výhrad, které vyplynuly z přečtení předložené disertační práce. Mimo to považuji vybrané metody a postupy za správně zvolené, v případě různých možných směrů vývoje jako vhodně okomentované, vedoucí ke splnění cílů disertační práce.

Na straně 28 je určována stabilita pomocí Hurwitzova kritéria stability. Pokud je splněná nutná podmínka pro stability, která vyžaduje shodu znamének u koeficientů charakteristického polynomu, nemusí se stabilita řešit pro determinant  $4 \times 4$ , ale stačí řešit determinant a subdeterminanty pro Hurwitzovu matici  $3 \times 3$ . Není to na tomto místě špatně, jenom je to potom zbytečně složité. Redundantnost podmínky pro  $D_4$  je vidět z podmínky pro  $D_3$  a absolutního členu v charakteristickém polynomu  $a$ .

Při popisu zobecněného notch filtru disertant píše, že čerpal z literatury (Herzog, 1996). Schéma zapojení uvedené v této literatuře (ale i v dalších literárních zdrojích) se mírně liší od schématu v práci na obrázku 5-17 (a v disertantem publikovaných článcích) liší. Zatímco v odkazovaném článku je přenos  $F_{GNF}$  veden jako zpětná vazba od regulační odchyly do sumátoru, který počítá regulační odchyly, je v disertační práci veden jako vazba přičítající se ke vstupu do regulátoru. Zmínka o této modifikaci v práci není uvedena.

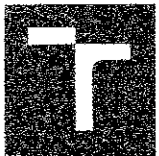
V práci se zaměřuje pojem indukce a indukčnost. Píše se o indukci cívky, jako o parametru cívky v mH, namísto o její indukčnosti (strana 54).

Na straně 64 se píše, že frekvenční charakteristika odpovídá podílu matic frekvenčních obrazů výstupů a vstupů systému. Z matematiky ale víme, že dělení matic není definováno. Proto by bylo nejspíš vhodnější vyjít ze vztahu  $Y=F*U$  a matici frekvenčních přenosů vyjádřit pomocí inverze matice  $U$ . Ve vzorcích (5.5) a (5.6) není definován význam  $Y_i$ ,  $U_i$  a  $R_i$ .

Na straně 74 se píše o parametru tau derivační složky. Pokud se jedná o parametr filtrace derivační složky, tak by mohl být zakreslen v blokovém diagramu PID regulátoru na obrázku 5-12.

Na straně 75 není dobře definovaná komplementární citlivostní funkce. Nepsal bych, že „je definována jako podíl Fourierových obrazů signálu buzení  $w$  a výstupu systému  $y$ “, ale naopak, tak jak je to ve vzorci (5.9), podíl výstupu systému a buzení. Definice komplementární citlivostní funkce v textu pokračuje, jako by se jednalo o citlivostní funkci, protože ta vyjadřuje, jak je zesilována, případně zeslabována porucha působící na výstupu soustavy, tedy šum měření. Neplatí také, že komplementární citlivostní funkce by měla být v pásmu vysokých frekvencí amplitudu menší než jedna. To je jenom následek toho, jak vypadá běžná citlivostní funkce, jaké jsou požadavky na řízení, a toho že nás tlačí Bodeho integrál.

Na straně 133 je v krátkosti popsána metoda nejmenších čtverců. Jsou uvažovány dvě varianty formulace problému (rovnice (11.30) a rovnice v odstavci mezi rovnicemi (11.31) a (11.32)). Správně



se píše, že je možné převést jeden problém na druhý transpozicí pravé a levé strany rovnice. Zvláštní jsou potom rovnice (11.31) a (11.32), kde jsou stejné symboly použity pro vyjádření v jednom případě sloupcových a ve druhém případě řádkových vektorů.

Odvození určení polohy těžiště levitujícího rotoru na straně 135 nejspíš není správně, nebo doplňující obrázek neodpovídá matematickému popisu. Druhý řádek rovnice (11.34) popisující rovnost momentů uvažuje, že obě AML působí na koncích rotoru, což není pravda. Působí v místě, kde jsou umístěna AML.

#### 4. Význam pro praxi

Při pohledu na výrobní program společnosti Doosan Škoda Power, v jejíž spolupráci předložená práce vznikla, je zřejmé, že výroba parních turbín tvoří významnou část jejich produkce. Vyrábějí parní turbíny pro generování vysokých výkonů. Nepatrné zvýšení účinnosti potom může znamenat dosažení významného navýšení objemu produkce elektrické energie a tedy zisku. Realizovaný testovací přípravek je výraznou zmenšeninou reálných turbín. Přesto se dá očekávat, že by mohl pomoci zjistit vztahy mezi působícími silami a tlaky v ucpávkách, případně upravit stávající simulační nástroje k dosažení větší shody mezi simulací a realitou a jejich použití by mohlo vést k návrhu turbín s menším únikem par a s větší účinností. **Přínos práce pro praxi a přímá použitelnost výsledků výzkumu řešeného v souvislosti s přípravou disertační práce je podle mého názoru zřejmá.**

#### 5. Vyjádření k publikacím

Podle Scopus je disertant autorem 7 článků (u šesti z nich na pozici hlavního autora) na které má 9 citací s celkovým h-indexem 2. Jedna časopisecká publikace je v Q2. Na IEEEExplore jsem našel jeho 2 články, zatím bez citací. **Celkový publikační profil je tedy poměrně nízký.** Podílí se na něm dle mého názoru následující tři faktory. Prvním je velmi **specifická oblast bádání** podílející se na nízkém počtu citací, druhým je **prakticky zaměřené téma práce** vyžadující vývoj a realizaci testovacího zařízení a třetím je, a zde si dovoluji spekulovat, **zájem zadávající/spolupracující firmy na uchování dosažených výsledků pro svoji potřebu.**

#### 6. Formální úprava disertační práce

**Po formální stránce hodnotím předloženou disertační práci jako dobrou. Má logickou strukturu a postupně seznamuje čtenáře s celou řadou realizovaných činností.** Mírně rušivě působí rozdílná velikost fontů, jejich typ a sklon v obrázcích. Střídají se náhodně, od malých až po velké, jako třeba v obrázku 3-8. Často se v práci vyskytují slova se špatnou koncovkou, ve špatném pádě. Jako by autora napadl nějaký tvar věty a během psaní přešel na tvar jiný. Zde tak nejspíš chybělo pečlivé závěrečné přečtení a korekce dokumentu.

Následuje výčet některých formálních připomínek, které snižují kvalitu textu. Použití media místo média, označení síly malým  $f$  namísto velkým  $F$ , označení poloměru velkým  $R$  namísto malým  $r$ , označení délky velkým  $L$  namísto malým  $l$ , označení jednotky odporu jako Ohm namísto velkého řeckého písmena omega. Dále nečinění rozdílu mezi řídicí a řídící, měřící a měřící. Na straně 56 a 61 je odkaz na kapitolu D. Jako oddělovač desetinné části čísla je někdy používána desetinná čárka, někdy tečka.

## 7. Dotazy na disertanta

1. Diskutujte rozdíl, mezi Notch filtrem a klasickým filtrem typu pásmová propust/zádrž z hlediska dosažitelných vlastností. Bylo by možné rozebrat rozdíl mezi GNF používaným v literatuře (Herzog, 1996) a variantou použitou v disertační práci?
2. Pro vybuzení harmonických vibrací je v práci použit obecný notch filtr. Jaká je jeho výhoda ve srovnání s tím, kdy by se požadované chování přidávalo k žádané hodnotě (k signálu  $w$ )?
3. Na obrázku 5-18 je notch filtr umístěn před regulátorem, kdežto na obrázku 5-12 je nakreslen filtr za PID regulátorem. Kde je ve vaší aplikaci skutečně umístěn a proč?
4. Pro roztočení rotoru byl vybrán střídavý asynchronní motor. Byla tato volba něčím opodstatněná?

## 8. Závěrečné vyjádření oponenta

Disertační práci Ing. Kalisty považuji za přínosnou pro obor kybernetika, protože přináší nové poznatky o identifikaci dynamických koeficientů ucpávek. Práci považuji za původní, a jak bylo popsáno výše, dosažené výsledky shledávám přínosné pro praxi.

Za vývojem přípravku je vidět obrovské množství práce. Jeho koncepci i finální realizaci považuji za velmi zdařilou. Vyzdvihnul bych velký záběr práce zahrnující mechaniku tekutin, elektroniku, pohony, řízení aktivních magnetických ložisek, zpracování signálů, návrh snímačů, využití snímačů pro měření, programování a nejspíš i další.

Realizovaným přípravkem, vyvinutými metodami, sepsanou disertační prací i publikačním profilem projevil disertant schopnost a připravenost k samostatné činnosti v oblasti výzkumu. Splňuje tak podmínky, které jsou uvedené v § 47 odstavce 4 zákona o vysokých školách. Doporučuji proto předloženou práci k obhajobě a udělení akademického titulu Ph.D.

V Brně 5.6.2023

doc. Ing. Petr BLAHA, Ph.D.

## **OPONENTNÍ POSUDEK NA DISERTAČNÍ PRÁCI S NÁZVEM „IDENTIFIKACE VLASTNOSTÍ UCPÁVEK ROTAČNÍCH STROJŮ“**

**a) Zhodnocení významu disertační práce pro obor**

V oblasti dodávek parních turbín je ze strany zákazníků neustálý tlak na vyšší účinnost turbínového cyklu. To mimo jiné vede ke zmenšování patních průměrů rotorů parních turbín. Důsledkem této návrhové modifikace se rotory parních turbín stávají pružnější, což zvyšuje riziko výskytu nestability těchto rotorů způsobené prouděním páry v ucpávkových partiích průtočných částí parních turbín při provozu na výkonu. Z tohoto úhlu pohledu je téma disertační práce velmi aktuální.

**b) Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle**

Cíle disertační práce byly splněny. Výstupem této práce je jednak zkušební zařízení pro testování dynamických vlastností labyrintových ucpávek parních turbín, a jednak metoda identifikace těchto vlastností. Aplikované postupy řešení a použité metody jsou plně v relaci s posledními trendy v zahraničí.

**c) Stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce**

Výsledky této práce jsou přínosné zejména s ohledem na rizikovost návrhu dynamických vlastností rotorových soustav parních turbín (viz bod a). Dalším přínosem této práce je implementace automatického řízení magnetických ložisek v uzavřené regulační smyčce za účelem regulace vynuceného kmitání rotoru na zvolené frekvenci ve tvaru kruhové orbity rotoru při měření a následné identifikaci dynamických vlastností labyrintové ucpávky. Pokud vím, tak v zahraničí se používá pouze dopředné/programové řízení bez zpětné vazby (např. Texas A&M University).

**d) Vyjádření k systematice, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce**

Struktura disertační práce s ohledem na členění textu do kapitol a podkapitol je přehledná. Disertant vede čtenáře spolehlivě postupem prací na dané problematice bez zbytečného odvádění pozornosti jinými směry. V práci jsou jasně definované cíle a jejich následné plnění. Formální úprava i jazyková úroveň rovněž odpovídají tomu, jak by disertační práce měla vypadat.

**e) Vyjádření k publikacím studenta**

Počet i úroveň publikací odpovídá požadavkům na uchazeče o akademický titul Ph.D.

**f) Jednoznačné vyjádření oponenta, zda doporučuje či nedoporučuje disertační práci k obhajobě**

Na základě výše uvedeného předloženou disertační práci **DOPORUČUJI** k obhajobě a pokládám následující dotazy:

- Na straně 78 nerozumím tvrzení, že DC složka je ze signálu odstraněna integrací tohoto signálu zejména s ohledem na skutečnost, že integrátor má na nulové frekvenci nekonečné zesílení.
- Na straně 89 nerozumím vztahu (6.1). Vypadá to, jako kdyby nevyvážek rotoru byl roven hmotnosti celého rotoru.
- V práci mi chybí test nezávislosti reziduí určených rozdílem sil daných vztahy (6.11) potažmo (6.12) a (6.5).
- V práci je uvedeno, že závislost kalibračních koeficientů na směrovém úhlu  $\Phi$  je nahrazena střední hodnotou. Postrádám zde specifikaci chyby, která touto aproximací vznikne.
- Rozsahy variability diskrétních bodů funkce na Obr. 6-8 neodpovídají střední absolutní chybě uvedené na Obr. 6-9.
- Kolik měření bylo provedeno pro jednotlivé frekvence precese rotoru, aby bylo možné určit střední absolutní chybu znázorněnou na Obr. 6-9?
- Obávám se, že ve vztahu (7.2) veličina  $R_s$  značí poloměr vnitřního povrchu kavity a ne poloměr rotoru.
- Na straně 109 je řečeno, že harmonický průběh radiální a tangenciální síly s frekvencí, která je rovna polovině frekvence precese rotoru, ukazuje na anizotropii systému. Neukazuje to spíše na nelinearitu systému s ohledem na skutečnost, že na vstupu systému je jiná frekvence než na výstupu systému?
- Na straně 109 je řečeno, že závislost středních hodnot radiální a tangenciální síly na frekvenci precese rotoru neodpovídá předpokladům. Tomuto tvrzení nerozumím. Jestliže budou hodnoty těchto sil pro jednotlivé frekvence precese rotoru dosazeny do vztahu (7.4), koeficienty  $K$ ,  $k$ ,  $C$ ,  $c$ , určující příslušné lineární funkce, budou nalezeny.
- Na Obr. 7-11 je vidět kvadratická závislost radiální síly na frekvenci precese rotoru. Dle mého názoru je to vlivem setrvačné síly od kmitajícího rotoru. Jaký je Váš názor?

V Plzni dne 11. září 2023

Doc. Ing. Václav Černý, Ph.D.

Doosan Škoda Power s.r.o.