

# Oponentní posudek

## disertační práce k získání akademického titulu Doktor (Ph.D)

*Autor práce:* **Ing. Ondřej Rubeš**  
Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav  
mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

*Téma práce:* **Nelineární alternativní zdroje energie**

*Školitel:* **doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.**  
VUT v Brně, FSI, ÚMTMB

*Rozsah práce:* 95 stran

### Rekapitulace cílů práce

Oponovaná disertační práce shrnuje výsledky, dosažené disertantem při teoretickém a experimentálním zkoumání možností využití nelineární tuhosti elektromechanického oscilátoru ve funkci vibračního mikro sběrače a vytvoření metodiky jejího návrhu včetně stanovení optimální velikosti elektrické zátěže tohoto mikro sběrače. Stanoveným kritériem přeměny kinetické energie vibrací na elektrickou energii je dosažení maximálního dodávaného elektrického výkonu. Pro tuto přeměnu jsou zkoumány vlastnosti elektromechanických oscilátorů na bázi elektromagnetické a piezoelektrické přeměny. Uvedená problematika je v současné době předmětem intenzivního výzkumu a vývoje, a je proto nepochybné, že výše uvedené téma práce je disertabilní.

Práce má 95 stran včetně titulního listu a je členěna do třinácti kapitol, přičemž kapitoly 1, 11, 12 a 13 jsou úvod, závěr, seznam použitých zdrojů a seznam vlastních publikací. Kromě toho práce ještě zahrnuje abstrakt v českém a anglickém jazyce, klíčová slova v českém a anglickém jazyce, bibliografickou citaci, čestné prohlášení, poděkování a obsah (dvě strany).

V úvodu (kap. 1 – necelá jedna strana) je stručně uveden současný stav techniky v dané oblasti a naznačeny předmět a cíle vlastní práce.

Obsah kapitoly 2 (Formulace problému a cílů disertační práce – jedna strana) přesně odpovídá jejímu názvu. Je stanoven koncepční cíl práce – vyvinout metodiku návrhu nelineární tuhosti a optimální elektrické zátěže tak, aby byl potenciál nelineární tuhosti co nejvíce využit a odebíraný výkon byl co nejvyšší. Pro řešení úlohy je zvolen mechatronický přístup – postup založený na stanoveném cíli, stanovení čtyř dílčích cílů a řešení problému s podporou simulačního modelování včetně verifikace modelu praktickým experimentem. Zvolený přístup považuji za správný a následný obsah disertační práce přesvědčivě dokumentuje splnění těchto dílčích cílů.

Třetí kapitola (Současný stav poznání – 18 stran) obsahuje velmi rozsáhlý a podrobný přehled v současnosti známých řešení včetně závěrů pro vlastní disertační práci.

Kapitola 4 (Základní srovnání lineárního a nelineárního oscilátoru – 5 stran) je věnována analýze chování kinematicky buzeného lineárního a nelineárního (Duffingova) oscilátoru při změnách amplitudy buzení a tlumení vlastního oscilátoru. Tato kapitola sice nepřináší žádné nové poznatky, je shrnutím známých poznatků, ale ukazuje a zdůvodňuje možnosti dalšího výzkumu v této oblasti.

Závěry z předchozí kapitoly jsou rozvinuty a na řešený problém konkretizovány kapitole 5 (Vliv elektrického tlumení na obecný nelineární mikro sběrač – 6 stran). Nejprve je uveden model Duffingůva oscilátoru s elektrickým tlumením včetně amplitudové a fázové charakteristiky pro různé elektrické tlumení s buzením o amplitudě 0,2 g, poté je uveden a analyzován vztah pro jeho elektrický výkon v závislosti na kmitočtu vibrací a diskutována otázka optimální velikosti elektrického tlumení včetně závěru pro praktický návrh mikro sběrače, který již lze považovat za část tvůrčí práce doktoranda

Kapitoly 6, 7 8 a 9 představují jádro disertační práce a jsou v nich shrnuty podstatné výsledky vlastní tvůrčí práce doktoranda.

V šesté kapitole (Obecný návrh magnetů pro nelineární tuhost oscilátoru – 12 stran) jsou uvedeny výsledky simulačních experimentů pro určení síly odpuzujících se magnetů a její nelinearity při změnách jejich rozměrů. Nejprve je analyzován případ, že všechny tři magnety jsou stejně velké a mění se stejně (změna velikosti magnetů při zachování čtvercového průřezu, při změně šířky magnetů a zachování konstantní výšky, a při změně výšky všech magnetů) při konstantní vzduchové mezeře mezi magnety. Poté je analyzován případ, kdy magnety jsou různě velké a mění se různě (změna velikosti pevných magnetů, změna velikosti pohyblivého magnetu, změna výšky pevných magnetů, změna výšky pohyblivého magnetu, změna šířky pevných magnetů a změna šířky pohyblivého magnetu). V závěru kapitoly jsou pak formulována doporučení po praktický návrh konfigurace magnetů nelineárního mikro sběrače.

V kapitole sedmé (Model, realizace a měření piezoelektrického vibračního mikro sběrače – 17 stran) je nejprve uveden jeho úplný matematický model v časové oblasti, v Laplaceově a Fourierově transformaci a tyto modely jsou dále využity k různým způsobům určení základního parametru (elektromechanického koeficientu) sběrače při různých elektrických zátěžích. Teoretické poznatky pak byly prakticky ověřeny na několika funkčních vzorcích a bylo prokázáno, že ani jedna konfigurace sběrače, pracujícího na bázi piezoelektrického jevu, není schopna splnit stanovené požadavky. Proto byl další výzkum soustředěn na nelineární sběrač, založený na využití principu elektromagnetické indukce, což je obsahem kapitoly osmé.

V kapitole osmé (Model realizace a měření elektromagnetického vibračního mikro sběrače – 18 stran). Nejprve je opětovně uveden matematický model lineárního sběrače a diskutováno je jeho využití pro různé nelineární varianty a z toho plynoucí možnost výpočtu optimální hodnoty zátěžného odporu a následně střední hodnoty výstupního výkonu. Poté je uveden návrh a popsána výroba funkčního vzorku sběrače. Diskutována je změna uložení pohyblivého ramene – rotační vazba je nahrazena tenkým ocelovým nosníkem, tedy obdobnou konstrukcí, jako u sběrače piezoelektrického, je uveden návrh magnetického obvodu, cívky, magnetů, vytvářejících magnetickou pružinu s nelineární tuhostí, nosného rámu s pohyblivým ramenem. Návrh cívky ale nepovažuji za tak triviální úlohu, jak disertant uvádí. Mohla by to být skutečná optimalizační úloha a bylo by zajímavé ji alespoň zformulovat. Následně je popsán způsob testování funkčního vzorku a uvedeny jeho výsledky (určení vlastní frekvence a vlastního tlumení a chování sběrače při harmonickém buzení). Výsledky experimentů potvrzují teoretické poznatky, uvedené v kap. 5 – naměřené závislosti výstupního napětí a středního výkonu na frekvenci dobře korelují s výsledky simulací. Získaná data rovněž umožňují stanovit kvalitu celého obvodu pro daný pracovní bod.

V deváté kapitole (Bezdrátový senzor vibrací napájený elektromagnetickým vibračním mikro sběračem – 2 strany) je popsán experiment, demonstrující praktické využití tohoto sběrače – napájení elektroniky snímače vibrací. Tím byla prokázána možnost praktického využití předmětu disertace – byla ověřena funkčnost zcela autonomního elektronického zařízení s uplatněním v železniční a letecké dopravě.

Obsah desáté kapitoly (Přínosy disertační práce – 1 strana) plně koresponduje s jejím názvem - jsou zde jsou přehledně formulovány teoretické, praktické a pedagogické přínosy práce. Se zde formulovanými přínosy lze souhlasit.

(Závěr – necelá 1 strana) obsahuje stručný přehled obsahu práce a dosažených výsledků, chybí však explicitně formulované návrhy pro další postup prací na daném problému.

### **K požadovaným bodům posudku uvádím:**

1. Téma disertace je nepochybně aktuální, protože získávání elektrické energie z okolního prostředí s přítomností kinetické energie s nízkou hustotou, je stále předmětem intenzivního výzkumu a vývoje.
2. Disertace ve všech podstatných aspektech splnila stanovené cíle – vytvořit metodiku návrhu nelineární tuhosti a optimální elektrické zátěže vibračního sběrače energie tak, aby byl potenciál nelineární tuhosti co nejvíce využit a odebíraný výkon byl co nejvyšší. Disertant se dokázal úspěšně zhostit poměrně komplikovaného úkolu a při jeho řešení vytvořil původní přínos v oblasti analýzy vlastností nelineárních elektromechanických oscilátorů a nové teoretické poznatky verifikoval praktickými experimenty.
3. Postup řešení problému považuji za správný a adekvátní stanoveným cílům. Disertant vhodně využil teoretických poznatků, provedl velké množství simulačních experimentů a tyto vhodně aplikoval na jím řešený úkol. Praktickými experimenty verifikoval vhodnost vytvořené metodiky a dospěl k závěrům využitelným v technické i pedagogické praxi. Původní přínos spočívá zejména v odvození vztahů pro návrh podstatných komponent elektromagnetických a piezoelektrických vibračních mikro sběračů, které odpovídají požadavku dosažení maximálního generovaného elektrického výkonu lineárního i nelineárního sběrače v daném rozsahu frekvencí.
4. Disertační práce má bezpochyby význam pro rozvoj vědního oboru a pro praxi. Navržená metodika návrhu poměrně složité mechatronické soustavy rozvíjí současnou teorii a je využitelná v technické praxi. Za zmínku stojí i poznatky ohledně zpětného vlivu hmotnosti sběrače na hmotnost budící soustavy – to může hrát velkou roli při praktické implementaci sběrače na stanovenou technickou soustavu. Velkou výhodou této metody je univerzálnost, názornost a poměrně malá náročnost na výpočetní výkon při simulacích, a právě pro tyto vlastnosti je vhodná i pro využití v pedagogické praxi.
5. Formální úprava disertační práce je na požadované úrovni a práce má rovněž dobrou grafickou úroveň (obrázky, tabulky, schémata, grafy) a citace umožňují velmi dobrou orientaci mezi převzatými podklady a vlastními výsledky práce disertanta. Po stránce srozumitelnosti, čtivosti a přesnosti vyjadřování však má drobné nedostatky. Namátkou uvádím:
  - str. 11, druhý odstavec shora: místo „...opravu náročné.“ má být „...opravdu náročné.“
  - str. 12, předposlední řádek: místo „..... materiálu vzniká proud,“ má být „...materiálu vzniká napětí,“
  - str. 14, první řádek: místo „..... zdroj proudu,“ má být „...zdroj napětí,“
  - str. 15, druhý řádek: místo „..... vlastnoručně namotaná cívka“ má být „...vlastnoručně navinutá cívka“,
  - str. 25, Tab. 1: chybí definice parametrů v pravé části tabulky,
  - str. 29, druhý odstavec: místo „..... řešení sklízení energie“ má být „...řešení sbírání energie“,
  - str. 36, předposlední odstavec a dále v celé práci: místo „..... dosáhnout optimálního výkonu“ má být „...dosáhnout maximálního výkonu“,

- str. 51, druhý odstavec textu: rovnice (19) obsahuje i elektrické veličiny (R a C),
- str. 52 a 53: nepřesně jsou používány pojmy optimální R, optimální tlumení, maximální tlumení včetně indexu u parametrů v rovnicích (29) až (32),
- str. 55, první odstavec: text není zcela přesný, nulová zátěž je jak ve stavu naprázdno, tak nakrátko. Zde se jedná o hodnotu zatěžovacího odporu,
- str. 56, první odstavec: místo „..... Oproti tuhosti je odpor nulový“ má být „...Oproti tuhosti je tlumení nulové“,
- str. 66, třetí odstavec zdola: místo „..... způsobené elektromagnetickou indukci.“ má být „...způsobené elektromechanickou přeměnou.“,
- str. 66, druhý odstavec zdola: místo „..... vibračním mikro sklížeči dochází“ má být „...vibračním mikro sběrači dochází“,
- str. 66, poslední odstavec: místo „..... délka části jednoho závitu cívky, která se nachází v magnetickém poli“ má být „...aktivní délka jednoho závitu cívky“,
- str. 67, druhý odstavec: místo „..... vyjádřit sílu, kterou elektromagnetická indukce tlumí pohyb“ má být „...vyjádřit sílu, kterou odebraný výkon tlumí pohyb“,
- str. 68, třetí odstavec: místo „..... Pro optimální elektrický výkon“ má být „...Pro maximální elektrický výkon“,
- str. 70, třetí odstavec: místo „..... díky čemuž je cívka rovná“ má být „...díky čemuž je cívka plochá“,
- str. 73, třetí odstavec: místo „..... je vhodné uložení.“ má být „...je vhodné upevnění.“,
- str. 75, poslední odstavec: místo „..... tedy amplitudy kmitání.“ má být „...tedy amplitudy rychlosti kmitání.“,
- str. 83, druhý odstavec: převrácenou (ne obrácenou) hodnotou odporu je vodivost, proč je zaváděn nový pojem „tlumící faktor“?

### **Závěr:**

Celá disertační práce svědčí o tom, že disertant ovládá metody vědecké práce, má hluboké teoretické a praktické dovednosti v oboru, je schopen přinášet nové teoretické poznatky a v technické praxi je aplikovat. Rád konstatuji, že je perspektivním vědecko-výzkumným pracovníkem s nadprůměrnou invencí a experimentální zdatností.

Pan Ing. Ondřej Rubeš prokázal schopnost a připravenost k samostatné činnosti v oblasti výzkumu a vývoje a tím splnil podmínky stanovené v § 47, odst. 4 zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách. Proto doporučuji, aby mu byl po úspěšné obhajobě udělen akademický titul

**„doktor (Ph.D.)“.**

Během rozpravy požaduji zodpovězení následujících otázek:

1. Co si představujete pod pojmem *logaritmické vnímání člověka*? Jak to souvisí s kmitáním oscilátoru s nelineární tuhostí?
2. Odvoďte rovnici (11)! Jestliže jsou rychlost a síla harmonické veličiny, jaká musí být splněna podmínka, abychom dostali výsledek podle této rovnice?
3. V práci část používáte pojmy *optimum*, *optimální*, apod. Vysvětlete, co rozumíte pod pojmy *optimální výkon* a *optimální odpor*!
4. Je elektrická tuhost piezoelektrického sběrače při zkratovaných svorkách opravdu nulová? Je vodivost piezovrstvy (dielektrika) ve srovnání s vodivostí zátěže opravdu

zanedbatelná? Neteče piezovrstvou nějaký, byť malý, proud a výkon se maří na jejím odporu?

5. Nakreslete schéma obvodu pro snížení výstupního napětí pieza při měření třetího vzorku mikro sběrače s piezo vrstvami v módu 31, o kterém pojednáváte na str. 59, a vysvětlete jeho funkci!

Doc. Ing. Vladislav Singule, CSc.  
Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky  
Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně  
Technická 2  
616 69 Brno

V Brně dne 1. března 2022

## **Stručné vyjádření**

### **k předloženým tezím disertační práce Ing. Ondřeje Rubeše**

Předložené teze jsou stručnou a věrnou charakteristikou celého obsahu disertační práce a k jejich obsahu nemám žádné připomínky.

Členění předložených tezí v zásadě odpovídá příslušné směrnici rektora. Doporučuji proto jejich vytištění v Edici PhD Thesis ve stávající podobě.

Doc. Ing. Vladislav Singule, CSc.  
Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky  
Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně  
Technická 2  
616 69 Brno

V Brně dne 1. března 2022