

prof. Ing. Dagmar Janáčová, CSc.  
Ústav automatizace a řídicí techniky  
Fakulta aplikované informatiky  
Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Nad Stráněmi 4511  
760 05 Zlín  
E-mail: [janacova@utb.cz](mailto:janacova@utb.cz)

## **OPONENTNÍ POSUDEK**

### **disertační práce**

Téma práce : **Hybrid Modeling of Mechanical Digital Twin by Finite Element Method and Graph Neural Networks**  
(Hybridní modelování digitálního dvojčete mechanické struktury metodou konečných prvků a grafových neuronových sítí)

Doktorand : **Ing. Marek Ciklamini**  
Školitel : **prof. Ing. Tomáš Vyhlídal, Ph.D.**  
Konzultant: : **Ing. Matouš Cejnek, Ph.D.**  
Obor : Strojní inženýrství  
Řízení a systémové inženýrství  
Pracoviště : Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze

Oponentní posudek jsem vypracovala na základě jmenování děkanem Fakulty strojní, Českého vysokého učení technického v Praze panem doc. Ing. Miroslavem Španielem, CSc. do funkce oponenta disertační práce.

Předložená disertační práce je zaměřená na návrh digitálního dvojčete mechanické struktury s využitím hybridního modelování metodou konečných prvků s grafovými neuronovými sítěmi (GNN).

Práce obsahuje 142 stran textu včetně příloh. V seznamu literatury je uvedeno 73 položek. Zvlášť uvedený je seznam publikací autora disertační práce, který obsahuje 10 publikací v časopisech a příspěvků na mezinárodních konferencích (v šesti případech je prvním autorem a ve všech ostatních případech je druhým autorem).

V první a třetí části práce se doktorand zaměřil na zpracování velmi podrobné literární studie týkající koncepce digitálních dvojčat hybridního modelování metodou konečných prvků s grafovými neuronovými sítěmi. Druhá kapitola obsahuje vytyčené cíle disertační práce.

V praktické části se zaměřil na ověření hypotézy vhodnými experimenty, pro stanovení základních rámců pro usnadnění výběru optimálně fungujících regresorů. Zejména v kapitola 6 se autor pečlivě věnoval diagnostice modelu na základě celkového experimentu, aby bylo možné pochopit výkonnostní model v kontextu poskytování sestaveného správného přeneseného chování konkrétního fyzikálního modelu. Tím jsou zdůrazněny předpoklady nesprávných předpovědí systému, a proto je soubor monitorovacích metrik využít jako zásadní pro digitální dvojče reálného systému.

Dále jednotlivé kapitoly autor zhodnotil a dosažené výsledky podrobně diskutoval v závěru práce.

## **Splnění cílů**

V disertační práci se autor zaměřil na návrh metodologie a řešení problému souvisejících s vytvořením digitálního dvojčete s využitím několika technik modelování.

Hlavním cílem bylo dosažení podobnosti experimentálních dat struktury mechanického systému.

Díličí cíle práce lze stručně charakterizovat následovně:

- Návrh metodiky pro predikci konkrétního mechanického zařízení
- Návrh systému pro autentický a přesný provoz a celkové nastavení architektury digitálního dvojčete mechanického systému s kombinací technik FEM a GNN.
- Extrakce informací z FE modelu představujícího strojní zařízení.
- Optimální nastavení regresorů, aby je bylo možné využít k řešení regresní úlohy na uzlech grafů odrážejících PM.
- Výběr vhodných dat FEM pro sestavení tréninkového datového souboru.
- Vhodná diagnostika a verifikace modelu digitálního dvojčete.

Konstatuji, že autor zvolil vhodné metody řešení a zpracování. Vytyčené cíle práce jsou splněny v celém rozsahu.

Autor musel velmi dobře zvládnout problematiku hybridního modelování digitálních dvojčat mechanických konstrukcí pomocí metod FE a regresorů založených na GNN. Pečlivou studií poskytl výchozí základ pro budoucí výzkum a praktické aplikace v oblasti modelování digitálních dvojčat mechanických konstrukcí.

## **Aktuálnost téma**

Téma práce považuji za vysoce aktuální a přínosné, protože digitální dvojče - model reálného zařízení v dnešní době umožňuje simulovat jeho funkčnost, napomáhá odhalit různé chyby a nesrovnalosti ještě předtím než se reálné zařízení uvede do provozu. Autor využil několik technik modelování.

## **Význam práce pro praxi, přínosy práce**

Význam předložené práce pro praxi je značný, jelikož řízení s využitím digitálního dvojčete lze použít k modelování chování systému a k předpovědím, jak bude reagovat na různé vstupy. Tyto informace lze využít v řídicí smyčce založené na modelu, kde řídicí systém upravuje vstupy do systému na základě předpovězených výstupů z digitálního dvojčete.

## **Formální a jazyková úroveň**

Po formální stránce je předložená práce vcelku precizně zpracovaná. Grafické provedení obrázků je kvalitní, i když by bylo často vhodnější, aby obrázky měly větší velikost. Jednotlivé kapitoly mají logickou strukturu a dobře navazují.

## **Připomínky:**

- Seznam použitých zkratk a symbolů je neúplný, rovněž by měl být abecedně seřazen.
- Odkazy na literaturu by měl být uváděny v textu vzestupně (první odkaz na literaturu [38] je uveden na str. 7, další odkaz [40] na str. 9 (citace literatury [1] je až na straně 17, [2] je dokonce až na straně 38).
- Nejednotné značení symbolů v rovnicích a textu (např. rovnice 3.8, 3.13)

Uvedené připomínky však významně nesnižují celkově vysokou odbornou úroveň disertace a její přínosy v oboru.

**Otázky:**

1. Jakým způsobem byly vybírány epochy v modelu, aby byla zajištěna rovnováha mezi efektivitou a výkonností modelu?
2. Měl jste k dispozici i reálný model?

**Závěrečné hodnocení**

Pan Ing. Marek Ciklamini si předsevzal zvládnout náročný úkol, který v celém rozsahu velmi úspěšně vyřešil. Osvědčil, že ovládá vědecké metody práce při řešení konkrétního úkolu, prokázal své hluboké teoretické znalosti. Kladl důraz zejména na nalezení metod syntézy a interpolace mezi regresními modely, jež se mohou přizpůsobit a efektivněji předpovídat chování reálného systému. Tento přístup umožňuje dosáhnout rovnováhy mezi přesností a praktičností, neboť cílem práce bylo vytvořit modely, které poskytnou cenné poznatky a předpovědi a zároveň zohlední přirozenou složitost a nejistoty přítomné v reálných systémech. Na základě zkušenosti shromážděných v průběhu této disertační práce autor vyvinul vysoce přesné modely vhodné pro řízení digitálního dvojčete.

Rovněž kladně hodnotím vysoký počet publikací disertanta, kde je většinou prvním autorem a v dalších druhým autorem a spoluautorství na dvou mezinárodních patentech.

Závěrem konstatuji, že disertační práce pana Ing. Marka Ciklamini je zpracována na vysoké odborné úrovni. Přináší nové poznatky, ukazuje na jeho vynikající odborné schopnosti i způsobilost k samostatné ucelené tvůrčí vědecké práci. Předložená disertační práce splňuje náročné podmínky pro doktorské řízení v souladu s § 47 Zákona o vysokých školách č. 111/98 Sb., a proto ji

**d o p o r u č u j i k o b h a j o b ě .**

Ve Zlíně, dne 25. 4. 2024

prof. Ing. Dagmar Janáčková, CSc.  
oponent