Prof. Dr. ing. Jiří Marek, Ph.D., DBA
Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně
Technická 2896/2, 616 69 Brno
T: +420731127113, E: marek@fme.vutbr.cz, W: www.uvssr.fme.vutbr.cz

POSUDEK DIZERTAČNÍ PRÁCE

Jméno doktoranda: **Ing. Jiří KROUPA**

Název dizertační práce: Návrh digitálního dvojčete obráběcího stroje

Školitel: doc. ing. Vladislav Singule, CSc.

Pracoviště: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Studijní program: Stroje a zařízení

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství (Stroje a zařízení)

Dizertační práce pojednává o tvorbě digitálního dvojčete obráběcího stroje. V práci je využit systémový přístup, který byl v roce 1990 rozpracován na VUT v Brně. Obecná forma systémového přístupu od prof. Janíčka, je v této dizertační práci aplikována na systému podstatných a nepodstatných veličin v konkrétní formě, kdy je chápáno digitální dvojče jako technický objekt pracující nejenom v prostoru, ale také v čase.

Výsledkem práce je metodika návrhu digitálního dvojčete, sestavená na základě systémového rozboru kyber – fyzikálního systému, přičemž je stanovena struktura a prvky s vazbami, pomocí kterých je možné digitální dvojče implementovat. To vše dizertant prezentuje na případových studiích, kde tyto výsledky verifikuje experimentálními metodami.

Aktuálnost tématu dizertační práce
Téma dizertační práce považuji za velmi aktuální, a to zejména z důvodu toho, že neexistuje jednotná metodika návrhu digitálního dvojčete, a dále lze pozorovat nejednoznačný pohled vědecké komunity na tuto problematiku. Jak sám správně doktorand uvádí na str. 7 (kapitola Motivace), existují dva pohledy na to, co je vlastně digitální dvojče a jaká je jeho struktura. To samo o sobě není až tak problematické, jako je problematická ta skutečnost, že neexistuje metodika, která by stanovovala, jak toto digitální dvojče vůbec sestavit, oživit a posléze provozovat.
Metodika by sama o sobě byla potom katalyzátorem úspory času při sestavování digitálního dvojčete, zredukovaly by se chyby, což má bezesporu finanční efekt pro jejich tvůrce. Na tyto zmíněné aspekty, zejména pak vymezení pojmu digitálního dvojčete a metodiku jeho návrhu, dává odpověď předložená práce, a proto *její téma považuji za vysoce aktuální.* Dovoluji si dále tvrdit, že dizertační práce bude předmětem ještě mnoha vědeckých diskuzí a východiskem pro další navazující práce nejenom z FSI, VUT v Brně.

Splnění stanového cíle dizertační práce
Ing. Kroupa si za cíl své dizertační práce (str. 23) stanovený na základě poznatků z rešerše, vytýčil nejenom vymezit návrh pojmu digitálního dvojčete, ale i sestavit metodiku jeho návrhu. Digitální dvojče chápe jako kyber – fyzikální systém s určitou strukturou a vazbami (obr. 8, str. 29), což doložil systémovým rozborem podstatných a nepodstatných veličin majících na něj vliv (obr. 6, str. 26). Taktéž zcela jasně demonstruje tu skutečnost, že takto jím chápané digitální dvojče je možné realizovat v kterékoliv části životního cyklu technické soustavy (obr. 7, str. 27).

Dalším cílem doktoranda je vytvoření metodiky návrhu digitálního dvojčete, které prezentuje od str. 37 dále své dizertační práce. Za přínosné zde považuji sestavení jeho originální metodiky, která dle mého názoru dává předpoklady k tomu, že svojí komplexností a jednoznačností skutečně povede při své aplikaci k ušetření času a omezení chybovosti.
I když lze z textu práce jasně chápat, jak se doktorand dívá na vymezení pojmu digitálního dvojčete, a písemný částečný náznak vymezení tohoto pojmu lze nalézt na str. 42 v kapitole 4.5, nenašel jsem pregnantní prohlášení typu Digitální dvojče je.....Tento fakt však nikterak nesnižuje kvalitu práce. *Konstatuji tedy, že cíle dizertační práce byly splněny.*

Postup řešení problému a výsledky dizertační práce s uvedením konkrétního přínosu doktoranda
Postup řešení, který ing. Kroupa prezentuje ve své práci, považuji za správný, jasný a logický. Ukazuje pomocí systémového přístupu (str. 25 a dále) a jeho jednotlivých atributů strukturu digitálního dvojčete, definuje potřebné prvky a vazby mezi nimi. Konkrétní přínos doktoranda lze spatřovat v nasazení postupů systémového přístupu na tvorbu digitálního dvojčete, což je samo o sobě zárukou toho, že nebude opomenut žádný prvek a jeho vazba z poměrně komplikovaného kyber – fyzikálního systému, kterým digitální dvojče je. Velký přínos spatřuji též v metodice (str. 36 a dále) a zejména pak v jejím detailním zpracování.

Pokud je dle mého názoru digitální dvojče sestavováno na základě předložené metodiky v kterékoliv fázi životního cyklu technického objektu, tak díky navrženému postupu doktoranda bude dán velký předpoklad k tomu, že nebude opomenut žádný prvek a vazba tohoto tvořeného kyber – fyzikálního systému.
Lze prohlásit, že postup doktoranda je originální a má všechny atributy jeho přínosu zmíněné výše.

Význam pro praxi a rozvoj vědního oboru
Systémový přistup lze považovat za „kuchařku", která doporučuje, jaké základní ingredience mají být součástí našich činností, aby tyto byly zdařile a efektivně vykonávány. Je nápovědou, na jaké podstatné skutečnosti, týkající se určitého technického objektu, by řešitel neměl zapomenout ve všech svých činnostech s touto entitou, a jak by měl tyto činnosti realizovat. Pokud přihlédneme k této charakteristice pojmu systémový přístup tak mohu prohlásit, že *je dizertační práce přínosem pro teoretický rozvoj oboru.*
Je to také proto, že navržená metodika byla doktorandem verifikována na případových studiích (str. 43 a dále) a dále byla ověřena na reálných strojích a jiných ne strojírenských aplikacích. V tom, lze spatřovat také velký přínos pro praxi, protože dizertant doložil praktické realizace digitálních dvojčat, která začínají pracovat v praxi a *proto je práce přínosem pro praxi.*

Formální úprava disertační práce a její jazyková úroveň
Formální úprava dizertační práce je v pořádku, i přes drobné překlepy (např. str. 36, 4. řádek od spodu chybí tečka ve větě), což nijak nesnižuje vědeckost předložené práce. Citace jsou provedeny řádně, práce je uspořádána v logickém sledu.

Disertační práce splňuje podmínky uvedené v § 47 odst. 4 zákona 111/1998 Sb. a obsahuje původní a uveřejněné výsledky nebo výsledky přijaté k uveřejnění. Student prokázal tvůrčí schopnosti v dané oblasti výzkumu oboru Konstrukční a průmyslové inženýrství. Práce splňuje požadavky standardně kladené na disertační práce v daném oboru Konstrukční a procesní inženýrství.

Dizertační práci ing. Jiřího Kroupy doporučuji k obhajobě a po úspěšné obhajobě doporučuji udělit titul Ph.D.

K práci mám následující dotazy a prosby o upřesnění:

1. Sestavte slovně novou definici digitálního dvojčete vycházející z vaší dizertační práce.
2. Kolik času lze předpokládat, že bylo ušetřeno, pokud při sestavování digitálního dvojčete byla použita vaše metodika?
3. Nabídl jste metodiku průmyslovým partnerům, nebo kolegům z jiných VŠ k diskuzi?
4. Jak chcete dál danou vědní oblast rozvíjet a kterým směrem?
5. Uvažujete o komercializaci vámi navržené metodiky, a jak by jste ji komercializoval?

K předloženým tezím mám následující doporučení a to zejména ke členění:

- chybí kapitola Současný stav řešené problematiky – doporučuji dopracovat;
- kapitolu 3 (Systémový přístup pro návrh digitálního dvojčete) doporučuji přejmenovat a doplnit na Zvolené metody zpracování, kde bude doktorand využívat právě tohoto přístupu;
- kapitolu 5 Přínos dizertační práce doporučuji přejmenovat na Hlavní výsledky a přínos dizertační práce.

V Brně, 26. 4. 2022

prof. Dr. ing. Jiří Marek, Ph.D., DBA
oponent dizertační práce