

Posudek dizertační práce

Název práce: *Prediktivní řízení procesů s využitím prvků umělé inteligence*
Doktorand: *Ing. Jan Antoš*
: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky
Obor dizertace: Automatické řízení a informatika
Školitel: doc. Ing. Marek Kubalčík, Ph.D.,
Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky
Oponent: prof. Dr. Ing. Miroslav Pokorný,
VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky

Předložená dizertační práce je rozčleněna do 8 kapitol včetně závěru, napsaných na 84 stranách textu, je doplněna přílohami a vybavena standardními doplňky. Celá práce je věcně rozdělena do tří tematických okruhů (část teoretická, část experimentální a metodická a část výsledků s diskuzí), struktura kapitol tuto strukturu respektuje.

Dosažení stanovených cílů

Podle deklarace autora v Kap. 4 je práce věnována metodám aplikace nástrojů umělé inteligence v pokročilých systémech prediktivního řízení. Ze sedmi dílčích cílů lze pak jako dizertabilní považovat hlavně vyřešení problematiky návrhu a identifikace abstraktního modelu řízené soustavy, problematiky prediktoru a optimalizace řízení. S ohledem na tyto úlohy pak lze uvažovat jako potenciálně vhodné aplikace umělých neuronových sítí a evolučních algoritmů. Práce obsahuje řešení souvisejících analytických a metodických úloh. Podle mého názoru dosažené výsledky řešení potvrzují, že cíle dizertační práce byly splněny.

Postup a výsledky řešení problému

Zadání tématu dizertační práce je pojato poměrně široce. Kromě řešení jádra tématu - využití neuronových sítí a evolučních algoritmů v prediktivním řízení – je rozšířeno o související úlohy analytické a metodické. Textové části jsou proto dosti komprimovány, obrázky jsou popsány pouze stručně. Některé detailnější informace lze získat z odkazů na dva doktorandovy relevantní časopisecké příspěvky.

Úvodní rešerše současného stavu řešení problematiky syntézy prediktivního řízení je dobrým základem pro vymezení dizertabilního jádra práce. Rešerše je cílově orientována na řízení hladiny nádrží netriviálního typu s přístupy, využívajícími sofistikovaných metod, zvláště metod syntézy modelů pomocí neuronových sítí a prediktorů s využitím evolučních algoritmů. Závěry vedou k zaměření výzkumu nekonvenčního modelování a prediktivního řízení hladiny v nádržích s různými geometriemi. Zobecnující je zamýšlený přístup využívající bezrozměrných veličin a úvahy o výpočtové náročnosti řešení.

Cíle dizertační práce jsou explicitně deklarovány. Hlavním cílem je využití neuronových sítí a vhodných evolučních algoritmů v prediktivním řízení komplexních, obtížně matematicky popsatelných soustav. Relevantní fáze řešení, kterými jsou syntéza abstraktního modelu s požadovanými vlastnostmi a návrh regulátoru zahrnujícího prediktivní a optimalizační funkci, doprovází podpůrné fáze předběžných analýz. Týkají se vhodnosti nástrojů umělé inteligence, volby systému pro prediktivní řízení s vhodným modelem,

identifikace soustavy a úvahy o přenosu získaných výsledků na konkrétní reálnou soustavu. Tento postup je metodicky správný a směřuje k naplnění hlavního cíle dizertace. Obecné využití výsledků řešení opět podporuje záměr dosažení škálovatelnosti a usnadnění přenosu jeho výsledků na reálný systém.

Teoretický rozbor problematiky obsahuje části, týkající se metod vlastního prediktivního řízení, abstraktního modelování, predikce, optimalizace, neuronových sítí a evolučních algoritmů. Podkapitoly jsou velmi stručné, opírají se o literární odkazy a jsou účelově věnovány hlavně těm přístupům, které jsou vhodné pro další řešení.

Experimentální a metodická část práce je opět velmi stručná. Omezuje se pouze na uvedení programových nástrojů pro realizaci výpočtů v software Matlab a Mathematica a na nástin postupů řešení jednotlivých úloh.

Stěžejní částí práce je kapitola, věnovaná řešení jednotlivých úloh a diskuzi dosažených výsledků. Poněkud nekompaktní je přístup, kdy úvodní simulace pro analýzu účelové funkce, prediktoru, optimalizátoru a evolučních algoritmů byly provedeny na lineárním CARIMA modelu tepelné soustavy, přičemž soustavami pro vlastní řešení byly netriviální nelineární nádrže s úlohou řízení jejich hladin. Matematické analytické modely jejich 6-ti variant jsou odvozeny, jejich praktickou využitelnost podporuje zavedení podmínek omezení a saturací stavů.

Kvalita řízení modelových systémů je dokumentována graficky na Obr. 6.35 a Obr. 6.37, není však doložena objektivními hodnotami ztrátových funkcí.

I když je práce po stránce textové stručná, správnost postupů a závěrů potvrzuje dobrá kvalita dosažených výsledků řešení. Kromě úspěšné aplikace neuronové sítě a evolučního algoritmu ve struktuře systému prediktivního řízení jsou příspěvkem práce i metodiky předšedných analýz dílčích úloh. Výsledky těchto analýz nejen zdůvodňují použité postupy řešení, jejich závěry jsou také využitelné pro řešení obdobných úloh v jiných projektech.

Význam pro rozvoj oboru a praxi

Přínosem výsledků řešení dizertační práce v oblasti teoretické je prohloubení analýzy a syntézy systémů sofistikovaného prediktivního řízení.

Přínosem v oblasti praktické jsou úvahy o možnosti přenosu získaných výsledků na tvarově podobné reálné soustavy.

Výsledky řešení lze dobře promítnout i do procesu výuky studentů magisterského a doktorského stupně studia.

Závěr práce neobsahuje představu autora o rozvoji tématu dizertační práce v dalším výzkumu.

Formální úprava a jazyková úroveň

Členění obsahu dizertační práce je správné. Textové i grafické části jsou přehledné, u všech obrázků jsou uvedeny jejich zdroje. Jazyková úroveň je dobrá, práce prakticky neobsahuje žádné chyby.

Publikace autora

Publikační aktivity autora jsou uspokojivé. Jejich seznam obsahuje 5 publikací, týkajících se tématu dizertační práce a 7 publikací ostatních. Dizertabilní jádro práce bylo v indexovaném odborném tisku řádně publikováno.

Otázky k diskusi

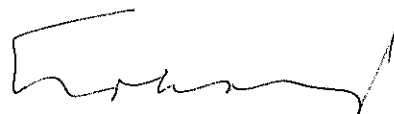
1. Vysvětlíte význam dvojrozměrných a trojrozměrných objektů na Obr. 6,2, Obr. 6.3 a Obr. 6.4 !
2. Čím je zdůvodněn výběr velikosti vzorkovací periody $\Delta t = 0,1s$ podle Obr. 6.25 ?

Závěrečné hodnocení

Předložená dizertační práce pana Ing. Jana Antoše prokazuje jeho odbornou orientaci a schopnost kreativně řešit úlohy v problematice pokročilých prediktivních regulátorů a nástrojů umělé inteligence. Ing. Jan Antoš prokázal při řešení jejího tématu teoretické znalosti, schopnost odborné práce i schopnost aplikace jejích výsledků. Doporučuji proto dizertační práci pana Ing. Jana Antoše k obhajobě, v jejímž rámci odpoví na položené dotazy. Doporučuji pak, aby po obhajobě dizertační práce, která bude komisí posouzena jako úspěšná, byl panu Janu Antošovi, v souladu s §72 Zákona 111/98 Sb. o vysokých školách a příslušnými ustanoveními předpisu o doktorském studiu na UTB ve Zlíně a její Fakultě aplikované informatiky, udělen akademický titul

„D o k t o r, Ph.D.“

v akreditovaném oboru doktorského studia Automatické řízení a informatika.



Ostrava, 10. 7. 2019

Prof. Dr. Ing. Miroslav Pokorný

Oponentní posudek disertační práce Ing. Jana Antoše „Prediktivní řízení procesů s využitím prvků umělé inteligence“

Prediktivní řízení je netriviální partií teorie řízení s četnými aplikacemi v ekonomických úlohách (dá se využít např. k pružné změně chování na finančním trhu podle vývoje cen akcií a kurzů měn a odhadu budoucích hodnot, k změnám úroků a kurzu koruny Bankovní radou ČNB podle odhadu vývoje HDP) a stejně tak v úlohách technických.

V případě technických úloh má na řízení podstatný vliv, zda je o úlohy s „rychlou“ či „pomalou“ dynamikou, v závislosti na tom se u diskretních (či diskretizovaných) modelů volí vzorkovací perioda. Příkladem systémů s rychlou dynamikou jsou systémy elektrické, naopak pomalou dynamiku vykazuje např. odběr tepla (a právě jeho predikce vycházející z meteorologických předpovědí má ve Zlíně tradici).

Významným rysem prediktivního řízení je skutečnost, že se s výhodou dá využít i na řízení nelineárních systémů. Prediktivní regulátor je založen na konfiguraci prediktor – optimalizátor a obvykle pracuje podle strategie pohyblivého horizontu. Klíčovou částí je optimalizátor.

Hledání optimální hodnoty nelineárních úloh je velmi obtížným problémem a metody, které se zde využívají, jsou časově náročné, při zkoumání řešitelnosti je navíc nutné ověřovat splnění složitých Kuhn-Tuckerových podmínek.

Disertant ve své práci ale volí odlišný přístup, optimalizační úlohu navrhuje řešit metodami umělé inteligence.

Vzhledem k obtížnosti zkoumaného problému, velkému spektru metod umělé inteligence, které však v obecném vyjádření jsou jen rámcem, jenž je v konkrétní situaci nutné naplnit vhodnou volbou parametrů a najít jejich nastavení pro řešený problém, předložená práce splňuje nároky na disertační práci a při splnění jejích cílů je **disertabilní**, přínosná pro oblast teorie řízení a samotné **téma práce je aktuální**.

V rozboru současné stavu řešené problematiky se autor zaměřuje na regulaci přítoku do nádrží (i většího počtu vzájemně propojených) s cílem dosáhnout požadované výšky hladiny. Je zřejmé, že u nádrží kulového a kuželového tvaru při konstantním přítoku výška hladiny narůstá nelineárně, a tedy je nutné použít sofistikované metody. K nim (mimo jiné) patří autorem zmíněná Skogestadova metoda určení parametrů PI regulátoru s interním modelem, vykazující menší překmit a kratší dobu ustálení než PI regulátor navržený klasickou Ziegler-Nicholsovou metodou.

Disertant navrhuje pro řešení úlohy regulace výšky hladiny využít neuronové sítě, jimiž se v této aplikační oblasti dostupné práce hlouběji nezabývají. V závěru 3. kapitoly proto podrobněji rozebírá dva základní typy neuronových sítí (vícevrstvou dopřednou síť a síť s radiální bází), popisuje metody učení neuronových sítí a v souvislosti s ním evoluční algoritmy, jejich princip a parametry. Zde lze dodat, že pro metody ze seznamu na str. 28 se již běžně používá česká terminologie: *Hill climbing* – horolezecký algoritmus, *Simulated annealing* – simulované žíhání, *Tabu search* – zakázané prohledávání, *Ant colony* – mravenčí algoritmus, naopak pro *rojení částic* je vhodné zmínit originální termín *Particle swarm optimisation*.

Teoretický rozbor má odraz ve formulaci cílů disertační práce ve 4. kapitole. Analýzu metod umělé inteligence, volbu systému pro prediktivní řízení a vytvoření jeho modelu s parametry získanými identifikací završuje určení prediktoru a optimalizátoru s cílem navrhnout způsob přenosu získaných výsledků z modelu na reálný systém.

V 5. kapitole autor charakterizuje dílčí úkoly pro experimentální část a softwarové nástroje, které k modelování bude využívat. Na ni v 6. kapitole navazuje matematicky rigorózní odvození prediktoru a optimalizátoru modelu CARIMA a zahrnutí dodatečných omezujících podmínek ve formě intervalů pro přírůstky vstupu a hodnoty vstupu a výstupu. Byla vybrána neuronová síť s radiální bází a z evolučních optimalizačních algoritmů horolezecký algoritmus.

V odstavci 6.2 jsou podrobně odvozeny vztahy pro změnu objemu nádrže a výšky hladiny. Autor uvažuje výhradně tělesa, jejichž plášť lze získat rotací rovinné čáry s grafem $y=f(x)$, definované na intervalu $\langle a,b \rangle$, kolem osy x , objem je pak určen vztahem

$$V = \pi \int_a^b f^2(x) dx$$

Statické vztahy pro objem válce, koule, kužele (a kombinovaného dvojkuželu) přitom není nutné ani počítat, protože jsou známy ze základní školy. Složitější je však existence saturace a singularit (způsobené např. úzkých hrdlem dvojkuželu) a jejich vyjádření v modelu, jehož podrobnému rozboru se autor věnuje. Navrhuje např. zavedení „funkce přepadu a dna“, pomocí nichž lze omezit přítok a odtok.

Trénování neuronové sítě navrhuje ve více fázích, nejdříve s „velkým“ počtem neuronů a po vyladění hodnoty *spread* snížení jejich počtu při zachování „dostatečně dobré“ hodnoty energetické funkce, která představuje kritérium kvality naučení sítě.

Prezentované časové průběhy z experimentů řízení výšky hladiny dokládají pro všechny uvažované tvary (kužel, komolý kužel, dvojkužel, koule) vysokou kvalitu řízení (s minimálními překmity a krátkou dobou ustálení) a jak autor v diskusi uvádí, jsou srovnatelné s metodami opírajícími se o kvadratickou optimalizaci.

Přínosná je i škálovatelnost metod pro různé typy systémů, určení kalibračních křivek pro ustálené hodnoty a konečně způsob přenosu výsledků z modelů na reálné systémy. Lze říci, že **disertant všechny vytyčené cíle splnil.**

Nicméně ke zpracování mám několik připomínek. Po formální stránce některá vyjádření nejsou zcela přesná.

- Na str. 20 autor uvádí, že optimální řešení úlohy lineárního programování se nachází v některém z vrcholů polytopu, vymezení oblasti přípustných řešení odpovídajících daným omezujícím podmínkám. Ve skutečnosti je to jeden z možných případů, úloha může mít i nekonečně mnoho řešení, která leží na hraně či stěně konvexního polyedru, vytvořeného průnikem polorovin, odpovídajících nerovnicím v omezujících podmínkách. (Při vnitřně nekonsistentní množině omezujících podmínek úloha nemá žádné řešení.) V případě požadavku na celočíselné řešení optimum nemusí ležet v žádném z vrcholů konvexního polyedru, ale uvnitř něj.
- Str. 27: „*Selekce* – výběr nejkvalitnějších jedinců.“ Tento přístup, známý jako *elitistická strategie*, se nedoporučuje, protože postupně vede ke ztrátě diverzity genetického materiálu, z tohoto důvodu se volí odlišné přístupy, např. ruletová nebo turnajová selekce, kdy vybraní jedinci mají určitou kvalitu fitness funkce, ale ne nutně musí být nejlepší.
- Str. 28: „*Genetické algoritmy* – založené na hledání nejlepšího genu.“ Genetické algoritmy hledají v populaci nejlepšího jedince, tj. nejlepší *chromozom* (řetězec genů), kódující přípustné řešení. Např. v úloze obchodního cestujícího

chromozomy jsou dány permutacemi měst a jednotlivá města v permutaci představují geny.

Disertační práce má velmi dobrou jazykovou úroveň. Jen výjimečně se vyskytují drobné chyby či překlepy.

Na str. 5 má být čárka před „díky které“.

Str. 11: vzájemně pojených tanků – „... spojených ...“

Str. 11: „Ziegler-Nicholasovy metody“; „použití PI (Ziegler-Nicholas)“ – „Nichols“.

Str. 12: „velice mírně horší“ – lépe asi „nepatrně horší“.

Str. 21: Před „a to“ patří čárka.

Str. 31: „(od)tok kapaliny z nádrže“ – „... z/do nádrže“.

Str. 33: v prvním řádku pod nadpisem čárka před „lze“ nepatří.

Str. 40: „Jak je patrné z obrázku tak ...“ – chybí čárka před „tak“.

Str. 69: „vzolena“ – „zvolena“.

Str. 75: „nelze pro komplexní modely jako je neuronová síť zapojit aktuální hodnotu“ – spojení „jako je neuronová síť“ by z obou stran mělo být odděleno čárkami.

Str. 4: „their derivations of mathematical formulas“ – dvojitá přivlastňování, vhodnější by možná bylo „derivations of mathematical formulas for these models“.

Ve větší části textu autor odkazy na literaturu v hranatých závorkách nezvykle připojuje k předchozímu textu bez mezer, někdy i za tečku, která ukončuje větu (např. na str. 15 – „white box“. [26, 80]), odkaz by ale měl být součástí věty.

Dotazy na disertanta:

1. Lze navržené přístupy (při případné úpravě) využít i v úlohách s rychlou dynamikou?
2. V rozboru typů nádrží se zabýváte i tvarem „přesýpací hodiny“. Kde se takové nádrže používají?
3. Jak velké snížení časové složitosti lze očekávat při nasazení paralelních výpočtů, které zmiňujete jako možnost vylepšení algoritmu?

Závěr:

Lze konstatovat, že Ing. Jan Antoš prokázal schopnost a připravenost k samostatné činnosti v oblasti výzkumu a vývoje, navrhl původní metody řízení výšky hladiny v nádržích mnoha tvarů, implementoval je ve vyspělých softwarových nástrojích MATHEMATICA a MATLAB a také prezentoval přenos výsledků z modelu na reálný systém. Publikační činnost doktoranda sice není početná, ale všech 5 uvedených publikací je registrováno v prestižních databázích vědeckých publikací Web of Science a SCOPUS, vztahují se k disertaci a doktorand je jejich hlavním autorem. Disertační práce splňuje podmínky § 47 Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb., a proto ji

doporučuji k obhajobě

před komisí doktorského studijního oboru Automatické řízení a informatika

V Brně dne 30. srpna 2019

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Šeda'.

Prof. RNDr. Ing. Miloš Šeda, Ph.D.
Ústav automatizace a informatiky
Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně

Oponentský posudek disertační práce

Autor: Ing. Jan Antoš

Název: Prediktivní řízení procesů s využitím prvků umělé inteligence

Obor: 3902V037 Automatické řízení a informatika

Školitel: doc. Ing. Marek Kubalčík, Ph.D.

Pracoviště: Fakulta aplikované informatiky, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Oponent: doc. Ing. Renata Wagnerová, Ph.D.

Pracoviště: Fakulta strojní, VŠB – Technická univerzita Ostrava

Aktuálnost zvoleného tématu

Předložená disertační práce se zabývá využitím prvků umělé inteligence pro návrh prediktivního řízení, což je téma velmi aktuální a náročné. Vzhledem k neustále rostoucímu výkonu výpočetní techniky a vývojem nových výkonných numerických metod jsou prvky umělé inteligence stále častěji implementovány v průmyslové praxi.

Splnění cílů disertační práce

Cílem disertační práce je ověřit využití vybraných prvků umělé inteligence pro prediktivní řízení procesů jak v optimalizátoru, tak i v modelu procesu.

Po stručném úvodu a přehledu současného stavu dané problematiky následuje teoretická část práce, kde autor vysvětluje základní pojmy z prediktivního řízení a vybrané prvky umělé inteligence. Poté jsou definovány cíle disertační práce včetně podrobného popisu dílčích cílů a způsobů jejich realizace.

Stěžejní částí předložené disertační práce je kapitola 6, která popisuje předběžnou analýzu a ověření použitých prvků umělé inteligence. Dále jsou zvoleny modelové systémy – nádrže, pro které jsou navrženy a vytvořeny modely pomocí neuronových sítí. Pro modelové systémy byly navrženy prediktivní regulátory a dosažená kvalita regulačních pochodů je podrobně zhodnocena. Protože všechny získané výsledky jsou jen simulační, autor navrhl metodiku, jak dané přístupy implementovat na reálných systémech.

Po stručném zhodnocení přínosu pro vědu a praxi a závěrečném shrnutí následuje seznam použité literatury, obrázků, tabulek, použitých symbolů a zkratk, publikace autora a jeho stručný životopis.

Lze konstatovat, že disertační práce splnila vytýčené cíle.

Zvolené metody zpracování a postup řešení

Disertant navázal na současný stav poznání v oblasti prediktivního řízení, seznámil se s vybranými prvky umělé inteligence, navrhl a realizoval prediktivní regulátory s prvky umělé inteligence i s verifikací dosažených výsledků. Metody a postupy odpovídají problematice a cílům disertační práce, jsou vhodně využity známé metody a přístupy pro nová řešení.

Význam pro praxi nebo rozvoj vědního oboru

Vědeckým přínosem disertační práce je návrh algoritmu využívající principů klasických i evolučních metod a porovnání výpočetní náročností s klasickou metodou kvadratického programování. Hlavním přínosem je návrh modelových systémů (nádrže), realizace jejich matematických modelů založených na neuronové síti RBF a návrh prediktivních regulátorů. Vzhledem k tomu, že byly formulovány zásady, jak implementovat uvedený postup i pro reálné systémy, výsledky práce mohou mít uplatnění nejen v pedagogickém procesu, ale i v technické praxi.

Formální úprava disertační práce a jazyková úroveň

Disertační práce je napsána přehledně, jednotlivé kapitoly na sebe logicky navazují, ale autor měl lépe uvážit členění textu do hlavních kapitol, které svým rozsahem vyvážené nejsou (kap. 5 je příliš krátká, naopak kap. 6 je velmi rozsáhlá, mohla být rozdělena na dvě). Také závěrečné shrnutí mohlo mít jinou formu než popis obsahu jednotlivých kapitol. K formální stránce mám jen pár připomínek a to: literatura by měla být editovaná jednotně (někdy jsou autoři psáni velkými písmeny i s uvedením křestních jmen), nečíslují se kapitoly, pokud nejsou alespoň dvě (4.1 a 6.6.1), text za vzorcem se neodsazuje (většinou se jedná o pokračování odstavce), v úvodních kapitolách jsou obrázky s anglickým popisem, apod. Tyto připomínky však významně nesnižují úroveň práce. Jinak je text psán srozumitelně, bez překlepů nebo gramatických chyb a je vhodně doplněn obrázky.

Publikační aktivita disertanta

V seznamu publikací autora je uvedeno pět publikací, z toho 3 konferenční články (jeden z nich je uveden v citační databázi Scopus) a 2 časopisecké články (z nichž je jeden indexovaný v citační databázi Scopus), což splňuje minimální požadavek. Poslední publikace je z roku 2016, škoda, že autor neprezentoval výsledky své práce i později.

Připomínky k disertační práci

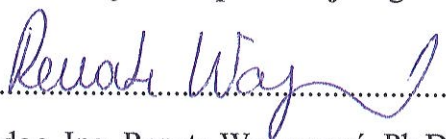
Doporučuji, aby autor v rámci obhajoby odpověděl následující otázky:

1. Pro ověření řízení jste generoval žádaný průběh výšky hladiny tvořený skokovými změnami a lichoběžníkovou změnou, proč je u prvních dvou nádrží jiný průběh žádané veličiny?
2. Čím je způsoben kmitavý průběh výšky hladiny pro zásobník ve tvaru koule v časovém úseku 35 až 60s (obr. 6.35e, popř. 6.40e)?

Závěrečné zhodnocení

Lze konstatovat, že práce splňuje požadavky po formální i věcné stránce a předloženou disertační práci **doporučuji** k obhajobě a po úspěšné obhajobě **doporučuji** Ing. Antošovi udělit titul Ph.D.

V Ostravě 30. 7. 2019

.....

.....

doc. Ing. Renata Wagnerová, Ph.D.