

Disertační práce našeho doktoranda mezi nejlepšími

23.3.2026 - | Fakulta strojní ČVUT v Praze

Ing. Pavel Skopec, Ph.D. z Ústavu přístrojové a řídicí techniky Fakulty strojní ČVUT v Praze má rád techniku a je přesvědčený, že v budoucnosti budou technologie podobně důležité jako třeba AI. Věnuje se výzkumu a neuhýbá před žádnou výzvou. Hledání nových cest pro řešení aktuálních úkolů je pro něj někdy i zábavné. Na Fakultě strojní proto nikoho nepřekvapilo, že se jeho disertační práce umístila v soutěži o Cenu Wernera von Siemense za rok 2025 mezi deseti nejlepšími.

Pavel Skopec v rozhovoru vysvětluje, proč je zdokonalování technologií důležité a vývoj nového řešení, i když se jedná třeba o ohřev oceli, dokonce někdy i zábavný.

V soutěži o Cenu Wernera von Siemense 2025 jste se s disertační prací zařadil mezi desítku nejlepších. Jak jste se k tématu disertace dostal?

Mého školitele prof. Tomáše Vyhlídala jsem měl už během bakalářského studia zde na FS. Prof. Vyhlídala mě propojil s firmou, která vyvíjela řídicí systémy pro hutní průmysl. V té firmě se rozjížděl projekt pro optimalizaci energeticky náročných tepelných zařízení, což se právě týkalo ohřívacích pecí. Měl jsem za úkol pracovat na vývoji modelu pece a následném návrhu řízení. Tenkrát jsem studoval na Katedře řídicí techniky na FEL. Tohle téma jsem zpracoval i jako diplomovou práci, kterou mi vedl prof. Vladimír Havlena, který mě nasměroval do metodologie, kterou jsem využil i v této práci, zejména mě přivedl k metodám redukce řádu modelu. Téma diplomky jsem dále rozvedl v disertaci zpět na FS.

Proč jste řešil právě optimální řízení pece na ohřev oceli?

Průběžná pec je velice zajímavý komplexní systém s prostorově-distribovanými parametry, spletitou dynamikou a nelinearitami. Pece jsou velmi energeticky, čili i environmentálně, náročné, běží téměř nepřetržitě, a zároveň ovlivňují kvalitu výsledného ocelového produktu. Proto vylepšení pokročilého řízení procesů, s anglickou zkratkou (APC), může být přínosné, a to i za cenu vyšší složitosti a nákladů na vývoj. Navíc je v dnešní době dostatek výpočetního výkonu pro implementaci sofistikovanějších metod řízení.

Moje teze byla, že APC může být vylepšeno pomocí detailního, rádoby přesnějšího modelu procesu, který ale musí být výpočetně zvládnutelný. Téma řízení a modelování pecí je stále živé i v dnešních publikacích.

Co se na takové peci řídí?

Pec je žáruvzdorná komora, kde z jedné strany vstupují slaby/bramy, které se skrze jednotlivé zóny pohybují k výstupu do válcovny. Některé zóny jsou vytápěny hořáky. Měření na peci typicky zajišťují zónové teplotní senzory a infračervené měření povrchové teploty výstupního slabu. Úkolem APC je pak poskytnout teplotní setpointy pro řízení hořáků, nebo přímo řídit průtok směsi paliva, a to tak, aby pec pracovala efektivně a dosahovala požadovaného ohřevu. Hlavní uvažovaná poruchová veličina je nepravidelný tok vsázky. Lze říct, že čím větší a častější je porucha, tím větší je přínos řízení.

Co přesně jste v disertaci řešil a jaké metody jste použil?

Vyvinul jsem detailní stavový model pece podobný CFD. CFD odkazuje na výpočetní dynamiku tekutin, který je dostatečně rychlý pro účely řízení. Ovšem, jedna věc je mít model, a další ho přímo využít pro řízení, což se povedlo. Záměrně jsem aplikoval metodu konečných objemů, FVM, na přenos tepla, zejména pro detailní modelování sálání v celém prostoru pece. Odvodil jsem interpretaci měření teplotních senzorů, která je důležitá pro odhad stavu. Sestavil jsem komplexnější CFD model pro verifikaci modelu pro řízení. Vyvinul jsem koncept řízení, který kombinuje statickou i dynamickou optimalizaci. Prediktivní strategie řízení využívá tento výjimečně detailní model pece a redukce řádu modelu zachovávající strukturu a byla nezbytná pro podporu jeho proveditelné implementace v reálném čase.

Byla studie zpracována jen teoreticky, nebo jste závěry již ověřil experimentálně?

Dobrá otázka. Klíčovým omezením je nedostatek experimentální validace, která je u takových průmyslových systémů problematická z mnoha praktických důvodů. Chtěl bych poznamenat, že jsem kladl důraz na realizaci teoretických metod spíše než na kvantifikaci výkonu pro konkrétní průmyslovou pec. K ověření jsem použil CFD software ANSYS Fluent, který je o něco realističtější, zejména díky detailnímu modelu sálání a spalování. Srovnání teplotních profilů mezi modelem pro řízení a tímto CFD modelem, ukázalo přiměřeně malou chybu, což poskytuje počáteční důvěru. Dalo by se říct, že sestavení takového CFD modelu by možná samo o sobě mohlo být slušné téma na disertaci.

Nicméně, zúčastnil jsem se i měření v peci v Ostravě za pomoci slabu s termočlánky a tepelně izolovaným dataloggerem, které realizoval Výzkumný tým Infračervené technologie ze Západočeské univerzity v Plzni.

Jakými nejvýznamnějšími výstupy z dosavadních výzkumných projektů byste se mohl pochlubit?

Když nepočítám diplomku a disertaci, hlavním výstupem je časopisecká publikace popisující detailní model pece s orientací na řízení. Navazující článek o samotném řízení je nyní v recenzním procesu. Předběžná studie byla představena na konferenci AISTech v Atlantě a na konferenci Process Control jsem měl tři příspěvky: Redukce modelu využívající balanced truncation v 1D vedení tepla, techniku aproximace predikčního modelu a studii odhadu tepelného stavu slabu. Pracoval jsem také na průmyslových nabídkách pro reálné nasazení řízení pece, takže téma nezůstalo jen v akademické rovině.

Vyhovuje Vám více týmová práce nebo raději pracujete sám?

Obecně mi vyhovuje kombinace obojího. Co se týká tématu mé disertace, tak jsem ho řešil převážně samostatně. Na jednu stranu jsem měl volnost ve výběru metod řešení, ale na druhou stranu jsem občas tápal, abych našel funkční a originální řešení.

Máte možnost také předávat své poznatky a zkušenosti mladším studentům?

V rámci úvazku zde na Ústavu přístrojové a řídicí techniky jsem vedl cvičení na kurzech Optimálního a prediktivního řízení, kde jsem studenty částečně seznamoval i s metodami, které jsem v disertaci aplikoval. Dále cvičím základní kurz Automatického řízení.

Plánujete v budoucnu pokračovat ve výzkumu anebo se věnovat spíše výuce? Na čem nyní pracujete?

Spíš se vidím ve výzkumu než ve výuce, i když práce se studenty je pro mě určitě užitečná a

rozvíjející zkušenost. Po několika letech věnovaných tématu disertace bych se navíc rád posunul i k novým problémům. V současnosti pracuji hlavně na výzkumu zaměřeném na optimalizaci na bázi modelu, konkrétně pro procesy válcování kovu a pro procesy s dopravním zpožděním.

Co byste řekl návštěvníkům Dne otevřených dveří, kteří přicházejí s učiteli nebo rodiči a s představou, že technika je nudná práce a patří minulosti?

„Zažít nudu – jó, to vadí“, jak se zpívá. Nuda je asi subjektivní, hledání technických řešení může být i vzrušující. Technika je vlastně takové funkční umění. Technika a technologie mají v čase čím dál větší význam, a proto je asi dobré ji chápat. Avšak s příchodem AI je volba oboru studia vyzývavá otázka. Kdybych zúžil otázku jen na řídicí techniku, tak jde o dost náročnou multi-oborovou disciplínu. Je třeba rozumět řízeným procesům v různých doménách, matematice, programování, ale mít zodpovědnost za validaci a reálné nasazení. Takže by se dalo říct, že je o zábavu postaráno, a že tato expertíza může mít budoucí uplatnění. Takový inženýr řídicích systémů by pak mohl dát AI práci.

<https://www.fs.cvut.cz/aktuality/3225-212/disertacni-prace-naseho-doktoranda-mezi-nejlepsimi>