

## I. IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE

<b>Název práce:</b>	<b>Prediktivní řízení založené na modelu pro průmyslovou tavicí pec</b>
<b>Jméno autora:</b>	<b>Filip Vodňanský</b>
<b>Typ práce:</b>	diplomová
<b>Fakulta/ústav:</b>	Fakulta elektrotechnická (FEL)
<b>Katedra/ústav:</b>	Katedra řídicí techniky
<b>Oponent práce:</b>	Ing. Pavel Trnka, Ph.D.
<b>Pracoviště oponenta práce:</b>	Honeywell International, Advanced Technology Europe, Aerospace

## II. HODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH KRITÉRIÍ

<b>Zadání</b>	<b>průměrně náročné</b>
<i>Hodnocení náročnosti zadání závěrečné práce.</i>	
Matematická formulace různých variant prediktivního řízení a následná softwarová implementace jsou poměrně náročné, ale to je kompenzováno tím, že zadání zůstává pouze u simulací.	

<b>Splnění zadání</b>	<b>splněno</b>
<i>Posuďte, zda předložená závěrečná práce splňuje zadání. V komentáři případně uveďte body zadání, které nebyly zcela splněny, nebo zda je práce oproti zadání rozšířena. Nebylo-li zadání zcela splněno, pokuste se posoudit závažnost, dopady a případně i příčiny jednotlivých nedostatků.</i>	
Všechny body zadání byly splněny.	

<b>Zvolený postup řešení</b>	<b>částečně vhodný</b>
<i>Posuďte, zda student zvolil správný postup nebo metody řešení.</i>	
Cílem práce podle zadání je navrhnout prediktivní řízení pro tavicí pec, které má udržovat výstupní teplotu taveniny a minimalizovat ekonomické náklady. Zvolený postup tento cíl řeší pouze částečně. Řeší pouze jeho druhou část a to optimální plánování energetického mixu mezi plyn a elektřinu (power split scheduling) s časově proměnnou cenou a s možností akumulace tepelné energie (Economic MPC).	
První část problému je regulace teploty, která v tomto případě od regulátoru vyžaduje kompenzaci externích poruch (disturbance rejection), kterými jsou především změna v přísunu materiálu k roztavení a změna v odběru taveniny. Obecně je to kompenzace proměnné tepelné zátěže pece. Navržený prediktivní regulátor bude mít při změně tepelné zátěže (při její odchylce od linearizačního bodu) konstantní ustálenou regulační chybu teploty a to i navzdory použití diferenčních penalt na výkony plynu a elektřiny. Pro regulaci teploty bez konstantní poruchy je třeba prediktivní regulátor rozšířit o pozorovatel tepelné zátěže (disturbance observer). Podobný problém bude s neshodou mezi modelem a skutečným systémem. Neshoda v dynamice bude způsobovat degradaci kvality řízení v přechodových režimech, což je přijatelné, ale problémem může být chyba v zesílení modelu (výchýbnost plynu), což bude opět způsobovat konstantní ustálenou regulační chybu teploty. Řešení zmíněného problému nebude složité. Bude k němu stačit doplnit model na vhodných místech o integrátory a navrhnout jednoduchý pozorovatel stavu.	
Postup řešení druhé části problému (Economic MPC) je zvolený vhodně.	

<b>Odborná úroveň</b>	<b>A - výborně</b>
<i>Posuďte úroveň odbornosti závěrečné práce, využití znalostí získaných studiem a z odborné literatury, využití podkladů a dat získaných z praxe.</i>	
Práce je po odborné stránce kvalitní.	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• (Strana 14) Co to znamená "(non)linearly changing reference"?</li> <li>• (Strana 14) "If we decide to keep it as a variable we get so called dense (sequential) MPC and in the other case sparse (simultaneous) MPC." Není to přesně obráceně?</li> <li>• (Strana 29) Figure 4.4 "Block size" neodpovídá popisu v textu.</li> </ul>	

- (Strana 32) Figure 4.12, Proč se hodnota „Remaining gas“ skokově zvýší v čase "Mar 13, 06:00"?
- (Page 36) Formulaci levé strany nerovnostního omezení chybí škálovací koeficient.
- (Page 38) Formulaci levé strany nerovnostního omezení (4.9) chybí škálovací koeficient.

**Formální a jazyková úroveň, rozsah práce**

**B - velmi dobře**

*Posuďte správnost používání formálních zápisů obsažených v práci. Posuďte typografickou a jazykovou stránku.*

Práce je vypracovaná v anglickém jazyce. Některé větné formulace jsou hůře srozumitelné a obecně by si práce zasloužila jazykovou korekturu. Typografické zpracování je bez výhrad.

**Výběr zdrojů, korektnost citací**

**A - výborně**

*Vyjádřete se k aktivitě studenta při získávání a využívání studijních materiálů k řešení závěrečné práce. Charakterizujte výběr pramenů. Posuďte, zda student využil všechny relevantní zdroje. Ověřte, zda jsou všechny převzaté prvky řádně odlišeny od vlastních výsledků a úvah, zda nedošlo k porušení citační etiky a zda jsou bibliografické citace úplné a v souladu s citačními zvyklostmi a normami.*

Způsob citování je v souladu s citačními zvyklostmi a normami.

**Další komentáře a hodnocení**

*Vyjádřete se k úrovni dosažených hlavních výsledků závěrečné práce, např. k úrovni teoretických výsledků, nebo k úrovni a funkčnosti technického nebo programového vytvořeného řešení, publikačním výstupům, experimentální zručnosti apod.*

Práce je solidním základem, na kterém se dá v budoucnu postavit ekonomicky zajímavé řešení praktického problému.

**III. CELKOVÉ HODNOCENÍ, OTÁZKY K OBHAJOBĚ, NÁVRH KLASIFIKACE**

*Shrňte aspekty závěrečné práce, které nejvíce ovlivnily Vaše celkové hodnocení. Uveďte případné otázky, které by měl student zodpovědět při obhajobě závěrečné práce před komisí.*

Navržený prediktivní regulátor tavicí pece sice neřeší problém regulace samotné teploty, jak bylo výše vysvětleno, ale za to vhodně řeší problém ekonomicky optimálního plánování energetického mixu mezi plyn a elektřinu s časově proměnnou cenou a s možností akumulace tepelné energie. Úloha vyžadovala vyřešit formulaci netriviálních omezení na výkonovou a energetickou spotřebu a dále navrhnout řešení redukcí výpočetní náročnost úlohy plánování na dlouhém horizontu. Práce je solidním základem, na kterém se dá v budoucnu postavit ekonomicky zajímavé řešení praktického problému.

Otázky (v případě možnosti předběžné přípravy):

- 1) Můžete porovnat ekonomickou úsporu prediktivního řízení ve srovnání se strategií, která by maximálně využívala aktuálně levnější zdroj? Alespoň v případě bez možnosti akumulace.
- 2) Ukažte, že při prediktivní regulaci triviálního systému  $\mathbf{x}_{t+1} = -\mathbf{a}\mathbf{x}_t + \mathbf{a}\mathbf{u}_t + \mathbf{a}\mathbf{v}_t$  na nulový stav, bude ustálená chyba regulace nenulová, pokud nemeřená porucha  $\mathbf{v}_t$  bude mít nenulovou konstantní hodnotu. Zdůvodněte, proč prediktivní regulátor ustálenou chybu nevykompenzuje a to ani v případě kdy použijete penalty na vstupů (zdánlivě integrační charakter).

Předloženou závěrečnou práci hodnotím klasifikačním stupněm **A - výborně**.

Datum: 6.5.2023

Podpis:

## I. IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE

<b>Název práce:</b>	<b>Prediktivní řízení založené na modelu pro průmyslovou tavicí pec</b>
<b>Jméno autora:</b>	<b>Bc. Filip Vodňanský</b>
<b>Typ práce:</b>	diplomová
<b>Fakulta/ústav:</b>	Fakulta elektrotechnická (FEL)
<b>Katedra/ústav:</b>	Katedra řídicí techniky
<b>Vedoucí práce:</b>	Ing. Petr Havel, Ph.D.
<b>Pracoviště vedoucího práce:</b>	Optimwise, s.r.o.

## II. HODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH KRITÉRIÍ

<b>Zadání</b>	<b>náročnější</b>
<i>Hodnocení náročnosti zadání závěrečné práce.</i>	
Zadání pokládám za náročnější, jelikož jeho cílem bylo implementovat MPC regulátor s potenciálem pro nasazení v praxi, bylo proto nutné kromě dobrého teoretického pochopení konceptu MPC regulace řešit i specifika konkrétní aplikační oblasti, např. korektní zavedení reálných nákladů na energie do optimalizačního kritéria a implementaci specifických časových a integrálních kritérií reflektujících skutečné technické a ekonomické zákonitosti trhů s elektřinou a plynem.	

<b>Splnění zadání</b>	<b>splněno</b>
<i>Posuďte, zda předložená závěrečná práce splňuje zadání. V komentáři případně uveďte body zadání, které nebyly zcela splněny, nebo zda je práce oproti zadání rozšířena. Nebylo-li zadání zcela splněno, pokuste se posoudit závažnost, dopady a případně i příčiny jednotlivých nedostatků.</i>	
Bez výhrad.	

<b>Aktivita a samostatnost při zpracování práce</b>	<b>A - výborně</b>
<i>Posuďte, zda byl student během řešení aktivní, zda dodržoval dohodnuté termíny, jestli své řešení průběžně konzultoval a zda byl na konzultace dostatečně připraven. Posuďte schopnost studenta samostatně tvůrčí práce.</i>	
Student prokázal schopnost samostatně pracovat a využít teoretické koncepty při praktické implementaci regulátoru.	

<b>Odborná úroveň</b>	<b>A - výborně</b>
<i>Posuďte úroveň odbornosti závěrečné práce, využití znalostí získaných studiem a z odborné literatury, využití podkladů a dat získaných z praxe.</i>	
Jedná o praktické, ale zároveň teoreticky náročnější téma, které by jistě nezvládnul každý student oboru.	

<b>Formální a jazyková úroveň, rozsah práce</b>	<b>A - výborně</b>
<i>Posuďte správnost používání formálních zápisů obsažených v práci. Posuďte typografickou a jazykovou stránku.</i>	
Oceňuji napsání textu práce v anglickém jazyce.	

<b>Výběr zdrojů, korektnost citací</b>	<b>A - výborně</b>
<i>Vyjádřete se k aktivitě studenta při získávání a využívání studijních materiálů k řešení závěrečné práce. Charakterizujte výběr pramenů. Posuďte, zda student využil všechny relevantní zdroje. Ověřte, zda jsou všechny převzaté prvky řádně odlišeny od vlastních výsledků a úvah, zda nedošlo k porušení citační etiky a zda jsou bibliografické citace úplné a v souladu s citačními zvyklostmi a normami.</i>	
Bez výhrad.	

<b>Další komentáře a hodnocení</b>	
<i>Vyjádřete se k úrovni dosažených hlavních výsledků závěrečné práce, např. k úrovni teoretických výsledků, nebo k úrovni a funkčnosti technického nebo programového vytvořeného řešení, publikačním výstupům, experimentální zručnosti apod.</i>	

### III. CELKOVÉ HODNOCENÍ A NÁVRH KLASIFIKACE

*Shrňte aspekty závěrečné práce, které nejvíce ovlivnily Vaše celkové hodnocení.*

Student měl za úkol implementovat teoreticky i prakticky složitou optimalizační úlohu MPC regulace pro specifickou oblast použití. Celý kód byl naprogramován od nuly, pouze s použitím externích numerických solverů, jeho funkčnost byla ověřena na realistických simulačních scénářích a tvoří dobrý základ pro budoucí plánované nasazení celého regulátoru v praxi na skutečné tavicí peci.

Předloženou závěrečnou práci hodnotím klasifikačním stupněm **A - výborně**.

Datum: 5.6.2023

Podpis: