

I. IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE

Název práce:	Cyber-physical One-pipe Hydronic Heating Testbed
Jméno autora:	Bc. David Zelenka
Typ práce:	diplomová
Fakulta/ústav:	Fakulta elektrotechnická (FEL)
Katedra/ústav:	Katedra kybernetiky
Oponent práce:	Ing. Michal Salaj, PhD.
Pracoviště oponenta práce:	Danfoss Power Solutions, Nordborg, Danmark

II. HODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH KRITÉRIÍ

Zadání	náročnější
Zvolené téma zasahuje do problematiky fyzikálního modelování toků kapalin, termodynamiky, matematického programování a dynamických systémů popsanych nelineárními algebraickými diferenciálními rovnicemi.	

Splnění zadání	splněno
Student splnil všechny body zadání. V prvních dvou kapitolách autor předkládá fyzický návrh testbedu a prokazuje znalost z oblasti termodynamiky a hydrostatiky při odvozování matematického modelu. Rovněž v práci popisuje fungování předloženého simulátoru budov. Později autor pojednává o obecné formulaci a výhodách prediktivních řídicích algoritmů. Ve třetí kapitole nacházíme návrh prediktivního regulátoru pro zmíněný testbed a popis jeho implementace, jakož i návrh mnohem jednoduššího regulátoru sloužícího jako reference při prokazování výhod MPC. Oba přístupy řízení jsou v závěru práce simulačně porovnány v různých pracovních podmínkách. Autor uvádí nedostupnost reálného testbedu v čase řešení zadané práce.	

Zvolený postup řešení	A - výborně
Autor v práci prokazuje, že jeho přístup k řešení zadání byl systematický. Strukturu řešení hodnotím kladně.	

Odborná úroveň	B - velmi dobře
Přes menší nedostatky, které uvádím v komentáři v závěru posudku, je práce velmi dobrá.	

Formální a jazyková úroveň, rozsah práce	B - velmi dobře
Celkovou formální úpravu předložené práce hodnotím kladně. Diplomová práce je napsána v anglickém jazyce a je dobře srozumitelná až na několik stylistických chyb. Rozsah práce bych označil za „splňující nutné minimum“.	

Výběr zdrojů, korektnost citací	A - výborně
Formát citací hodnotím kladně. Reference jsou v pořádku.	

Další komentáře a hodnocení
Předložená práce je spojena s řízením jednotrubkových otopných systémů, jejichž potenciál je dnes předmětem výzkumu a proto aktuálnost tématu hodnotím kladně. Autor navrhl testbed zajišťující replikaci simulovaných hodnot primárního průtoku a teploty vody v reálném zařízení jež v budoucnu poslouží dalšímu vývoji v problematice jednotrubkový otopných systémů. Úkol je ztížen zahrnutím fyzikálních omezení samotného testbedu do úlohy řízení vyplývajících z nedostupnosti zdroje studené vody, což komplikuje dosažitelnost požadovaných hodnot v určitých pracovních režimech.
Posuzována práce je sepsána v rozsahu 58 stran, je strukturovaná v pěti kapitolách a odkazuje na 21 čerpaných

zdrojů. První kapitola představuje výhody jednotrubkových otopných systémů oproti standardním dvoutrubkovým. Autor představuje kyberneticko-fyzikální testbed a vysvětluje kybernetickou část, která simuluje tepelné interakce v prostorách budovy a dále vysvětluje fyzikální část, která nahrazuje jednu buňku v reálném otopném systému. Při návrhu fyzikální části autor vylepšuje nedostatky první verze systému využitím zásobníku studené vody za účelem zrychlení dynamiky teploty v primárním okruhu. Taktéž zavádí trojcestný ventilu pro lepší regulaci a připomíná také omezení takového řešení. V závěru kapitoly je představen jednoduchý proporcionální regulátor a stručně popsán princip a formulace úlohy nelineárního prediktivního řízení (MPC). V této části bych ocenil krátkou diskusi k řešitelnosti nelineárního MPC.

Druhá kapitola popisuje tepelné a hydrostatické interakce a vliv trojcestného ventilu. Autor zde sestavuje matematický model testbedu. Výsledkem je soustava nelineárních algebraických diferenciálních rovnic (DAE). V kapitole je dále uveden výběr jednotlivých fyzikálních komponent reálného testbedu.

Ve třetí kapitole autor podrobněji rozebírá návrh proporcionálního regulátoru a to ve třech různých režimech v závislosti na hodnotách teplot v ohřevném tělese, zásobníku studené vody a referenční teploty v primární větvi. Později přechází k formulování úkolu prediktivního regulátoru, sestavuje kriteriální funkci a popisuje omezení. V této části chybí komentář ke způsobu ladění vah kriteriální funkce. Dále autor předkládá implementaci algoritmu řízení v prostředí Matlab / Simulink. Vzhledem k matematickému modelu popsanému algebraickými diferenciálními rovnicemi je úloha řízení nelineární. Zde oceňuji autorovo využití balíčku CasADi a IPOPT při implementaci řešení, které podstatně snižuje výpočetní čas a zlepšuje řešitelnost úlohy. Zde by byla vhodná argumentace pro výběr právě IPOPT-u z množství volně dostupných řešičů. V podkapitole 3.1 nacházím nekonzistenci v označování, kde proměnná T_{sp} není definována a zřejmě vyjadřuje již definovanou referenční teplotu T_{ref} . Na straně 30 v úseku 'Constraints' jsou první tři věty málo srozumitelné. Podobně na straně 31 v úseku 'Primary return temperature' mi není jasné proč odhad veličiny představuje výhodu při optimalizaci oproti její přímo měřené hodnotě.

Simulační výsledky jsou prezentovány ve čtvrté kapitole. Z porovnání jasně vyplývá, že průběh řízení nelineárním MPC značně kvalitativně převyšuje proporcionální regulátor, což je zřetelně vidět na prvním scénáři (zvýšení primární teploty). Na straně 42 ve čtvrtém řádku jsou chybně zpracovány odkazy k obrázkům.

V závěru autor shrnuje strukturu práce, dosažené výsledky a představuje budoucí cíle. Avšak argumentace, že mnohem lepší kvalita řízení MPC vychází ze znalosti budoucích hodnot referenčního vstupů považuji za nedostatečnou a vágní.

Zmiňované nedostatky nejsou závažné a text je zpracován velmi dobře. Přestože pro nedostupnost reálného zařízení nebylo možné ověřit fungování navrhovaného řízení experimentálně, je výsledek práce přínosem a podkladem pro další praktické úlohy v tomto rozsáhlém projektu.

III. CELKOVÉ HODNOCENÍ A NÁVRH KLASIFIKACE

Student dovedl systematicky přistupovat k návrhu fyzického i softwarového vybavení testbedu a zpracovat téma prediktivního řízení. Prokázal znalosti z modelování a sestavil regulátor od návrhového kritéria až po formulaci složité nelineární optimalizační úlohy, kterou navíc dokázal efektivně vyřešit s pomocí dostupných veřejných balíčků.

Předloženou závěrečnou práci hodnotím klasifikačním stupněm **B - velmi dobře**.

Otázky oponenta závěrečné práce:

1. Vysvětlete, proč při snaze minimalizovat používání studené vody z nádrže zahrnujete do účelové funkce vstupní signál průtoku studené vody \dot{m}_1 a ne přímo teplotu studené vody T_T , případně obojí. Při navrhovaném tvaru účelové funkce, jaký vliv má současné zahrnutí absolutní hodnoty \dot{m}_1 společně s jejím přírůstkem $\Delta\dot{m}_1$?
2. Navrhovaná účelová funkce je formulována jako vážený součet částečných kritérií. Jakým způsobem jste postupoval při ladění jednotlivých váhovacích matic? Zkoumal jste vliv jednotlivých nastavení, případně, prováděl jste srovnání na základě ukazatelů kvality? Pokud ne, jaké ukazatele byste volil a proč?
3. Jako referenci pro porovnávání nelineárního MPC jste používal jednoduchý proporcionální regulátor a jako výhodu pro MPC uvádíte znalost budoucích hodnot referencí. Uvažoval jste srovnání nelineárního MPC navrženého v práci s komplexnějším přístupem jako např. lineárním prediktivním regulátorem? Postačoval by takový regulátor? Popište případné nedostatky lineárního MPC aplikovaného na tomto případě.

Datum: 29.1.2019

Podpis: