FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
Katedra řídicí techniky
Ing. Jiří Dostál

V Praze dne 29. 1. 2019

POSUDEK VEDOUCÍHO DIPLOMOVÉ PRÁCE BC. DAVIDA ZELENKY

Úvod

Cílem diplomové práce „Cyber-physical One-pipe Hydronic Heating Testbed" studenta Bc. Davida Zelenky bylo navrhnout testovací zařízení pro jednotrubkovou otopnou soustavu. Budova a velká část soustavy jsou simulovány, navržené testovací zařízení zde připravuje okrajové podmínky pro jednu vybranou reálnou topnou buňku. Testovací zařízení slouží pro návrh a validaci algoritmů pro řídicí prvek topné buňky.

Zpracování tématu

Aby student mohl zpracovat zadanou práci, musel nejdříve nastudovat problematiku otopných soustav a jejich hydraulického a tepelného modelování. Dále také musel nastudovat prediktivní řízení. V těchto tématech student navazoval na předešlou práci kolegů.

Originální příspěvky práce začínají sestavením matematického modelu systému pomocí diferenciálně-algebraických rovnic a navržením zpětnovazební regulace. Z hlediska řízení se jedná o mnoha rozměrový nelineární DAE systém s přepínanou dynamikou. Student zde navrhl základní řešení s řízením pravidly a lokální P smyčkou na zdroji tepla. Dále student provedl pokus o návrh optimálního stavového regulátoru, nicméně tato aktivita byla pro nadměrnou složitost a malý přínos ukončena před dokončením samotné syntézy. Hlavním přínosem práce je formulace a funkční implementace prediktivního řídicího algoritmu. Tento regulátor již věrně sleduje zadané referenční hodnoty a v neposlední řadě také prodlužuje akci-schopnost testbedu minimalizací teploty v nádrži studené vody. Pro implementaci multiple-shooting NMPC, David použil nástroj CasADi, který zjednodušuje řešení optimalizačního problému díky semi-analytickým gradientům V práci je uveden příklad sledování referenčních signálů jak pro modelové situace, tak pro kritický výřez ze simulace celé otopné sítě uvnitř simulované budovy.

Aktivita a samostatnost při zpracování práce

Student přistupoval k řešení zadané práce proaktivně a samostatně. Dokázal si během krátké doby osvojit mnoho nových přístupů a nástrojů. Sám přicházel s nápady na řešení nastalých problémů a obratně je aplikoval, větší problémy vždy řádně a rychle konzultoval.

POSUDEK OPONENTA ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

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 nelinearnimi algebraickymi diferencialnimi 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 řídících 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 tesbed 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 prace 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 standartním 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 hydrostatického 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 chybi 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 dalsi praktické úlohy v tomto rozsáhlém projektu.

ČVUT
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

POSUDEK OPONENTA ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

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 závěřečné práce:

1. Vysvětlete, proč při snaze minimalizat 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, připadně obojí. Při navrhovaném tvaru účelové funkce, jaký vliv má současné zahrnutí absolutní hodnoty $\dot{m}_1$ společne 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: