

## I. IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE

|                                   |                                                      |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------|
| <b>Název práce:</b>               | Termodynamické oběhy pracující v nadkritické oblasti |
| <b>Jméno autora:</b>              | Daniel Kříž                                          |
| <b>Typ práce:</b>                 | diplomová                                            |
| <b>Fakulta/ústav:</b>             | Fakulta strojní (FS)                                 |
| <b>Katedra/ústav:</b>             | Ústav procesní a zpracovatelské techniky             |
| <b>Oponent práce:</b>             | Ing. Aleš Vojáček                                    |
| <b>Pracoviště oponenta práce:</b> | XRG Simulation GmbH                                  |

## II. HODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH KRITÉRIÍ

| <b>Zadání</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>náročnější</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| <i>Hodnocení náročnosti zadání závěrečné práce.</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                   |
| <p>Téma zadání je velice aktuální, zejména pak hlavní zaměření práce na možnosti akumulace elektrické energie. Svou náročností práce odpovídá nadstandartu diplomových prací. Ocenil bych například to, že se práce věnuje nejen stacionárním modelům, což je běžně k vidění u diplomových prací, ale hlavně dynamickým modelům (výměníků, potrubí, atd.), které jsou pak součástí termohydraulického okruhu a zkoumá se vývoj důležitých veličin (např. teplot, tlaků apod.) v čase. Dále bych pak ocenil prokázanou velice dobrou orientaci diplomanta v poměrně rozsáhlé termohydraulické knihovně ClaRaPlus, která byla použita při řešení diplomové práce.</p> |                   |

| <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> |                |
| Diplomová práce splnila rozsah zadání v plné šíři.                                                                                                                                                                                                                                                 |                |

| <b>Zvolený postup řešení</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | <b>vynikající</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| <i>Posuďte, zda student zvolil správný postup nebo metody řešení.</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                   |
| <p>V předložené práci je nejprve představena problematika oběhů pracujících v nadkritické oblasti se zaměřením na CO<sub>2</sub>. Jsou shrnuty výhody a nevýhody oproti jiným pracovním látkám. Neškodilo by, kdyby se zde také uvedlo porovnání jednotlivých oběhů (pracujících s možnými adepty pracovních látek) z hlediska jejich termodynamické účinnosti. V úvodu práce je také zmíněno nosné téma práce a čili možnosti akumulace elektrické energie. V tabulce 1 jsou porovnány různé technologie pro akumulaci energie. Práce se pak věnuje zejména termohydraulickému modelování experimentálního zařízení Sofia, jako systému akumulace elektřiny do tepla a zpět využívající ke konverzi energií tepelný oběh s nadkritickým CO<sub>2</sub>. Zde by nebylo od věci porovnat účinnosti (z hlediska přeměny energií) možných řešení akumulace elektřiny.</p> <p>Stěžejní část diplomové práce je dynamické simulování termohydraulického okruhu Sofia. Pro sestavení dynamického modelu byla zvolena knihovna ClaRaPlus naprogramovaná v jazyce Modelica a vyvíjená a spustitelná v prostředí Dymola. Modelica je specializovaný objektově orientovaný jazyk založený na rovnicích pro fyzikální modelování. Je určen pro simulaci složitých systémů obsahujících mechanické, elektrické, elektronické, hydraulické, tepelné, řídicí, elektrické nebo procesně orientované dílčí komponenty. ClaRaPlus umožňuje uživatelům dynamicky simulovat termohydraulické okruhy od experimentálních zařízení po elektrárenské celky. A tedy perfektně se hodí pro podobné projekty jako Sofia, která je řešen v diplomové práci.</p> <p>Jazyk Modelica je založen na rovnicích, a tak na rozdíl od blokově orientovaných jazyků (např. Simulink) nebo kauzálním modelování, je výpočetní strategie (numerika např. numerická integrace apod.) ponechána na samotném nástroji, tedy Dymole. Tento přístup umožňuje kombinovat komponenty (předdefinované nebo sestavené na míru) pomocí konektorů a ponechat odvození výpočetní kauzality na nástroji. To diplomantovi nejen výrazně ušetří čas při programování, ale pomáhá to vyhnout se řadě chyb a umožňuje to opakované použití komponent. Na rozdíl však od řady komerčních uzavřených softwarů s podobným portfoliem, např. APROS, FLOWMASTER, ASPEN, atd. je ClaRaPlus flexibilní a otevřený software, t.j. diplomant má možnost procházet a upravovat zdrojový kód jednotlivých komponent a tuto schopnost diplomant velice</p> |                   |

dobře prokázal při nutných úpravách, např. korelací přestupu tepla a tlakových ztrát nebo při tvorbě mikrokanálových a deskových výměníků dobrou orientaci v knihovně.

Pomocí jednotlivých komponent knihovny ClaRaPlus (nebo její doprogramované nadstavbě) byl sestaven model systému Sofia umožňující stacionární, ale zejména dynamické výpočty zahrnující řídicí systém. Byla také využita knihovna UserInteraction, která je součástí Dymoly a celý systém pak představoval v podstatě simulátor, podle kterého se pak dají doladit různé neduhy systému, nastavit řídicí systém a sestavit tak velice detailní „digitální dvojčce“ („digital twin“), což jak je zmíněno v závěru práce je plánováno jako budoucí práce. Model by se dal také určitě uplatnit jako simulátor pro trénink operátorů. Byla by tak škoda v tak již velice dobře propracovaném modelu nepokračovat a nedovést tak projekt skrz analýzy pro spouštění systému Sofia. To už je však nad rámec této diplomové práce.

## Odborná úroveň

**A - výborně**

*Posuďte úroveň odbornosti závěrečné práce, využití znalostí získaných studiem a z odborné literatury, využití podkladů a dat získaných z praxe.*

Z provedení diplomové práce je vidět, že se diplomant jejímu vypracování podrobně věnoval a porozuměl dané problematice termohydraulických okruhů, s CO<sub>2</sub> jako pracovní látkou, pracujících v nadkritické oblasti.

## Formální a jazyková úroveň, rozsah práce

**A - výborně**

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

Po formální stránce diplomová práce odpovídá standartu běžných technických dokumentů. V diplomové práci jsem nezaregistroval prakticky žádné překlepy, celý text je srozumitelný a vložené grafy a obrázky přehledné.

## 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.*

Student ve své práci použil relevantní zdroje, které jsou řádně citované a nedošlo k porušení citační etiky.

## 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.*

Vyzdvihl bych zvláště programátorské znalosti v jazyce Modelica prokázané při tvorbě/nastavbě komponent knihovny ClaRaPlus, dále pak poměrně detailní porovnání výsledků simulací s naměřenými daty mikrokanálových výměníků a v neposlední řadě dobrou grafickou úroveň práce.

### 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.*

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

- Zvolené téma diplomové práce je aktuální. Výsledky práce, zvláště pak termohydraulický model akumulárního systému elektřiny Sofia, vzniklý na základě knihovny ClaRaPlus, by mohl být využit v praxi, např. při navrhování jiných termohydraulických okruhů, nejen pro účely nadkritických oběhů se superkritickým CO<sub>2</sub>.

- Po formální stránce diplomová práce odpovídá standartu běžných technických dokumentů. Práce je dobře strukturovaná a jednotlivé kapitoly se vyznačují srozumitelným dobře členěným textem.
- Z provedení diplomové práce je vidět, že se diplomant jejímu vypracování podrobně věnoval a porozuměl dané problematice termohydraulických okruhů, s CO<sub>2</sub> jako pracovní látkou, pracujících v nadkritické oblasti.

Pár otázek nebo doplňujících informací se nabízí:

1. Porovnání konvekčního parního oběhu se superkritickým CO<sub>2</sub> oběhem, např. Braytonovým a se superkritickým vodním oběhem - výhody/nevýhody.
2. Porovnání účinností (zhlediska přeměny energií) možných řešení akumulace elektřiny.

Datum: 22.8.2022

Podpis: Ing. Aleš Vojáček