

VÝVOJ PARNÍHO KONDENZÁTORU PRO SIMULACI PROVOZU KONDENZAČNÍCH TURBÍN

M. Cepák, V. Havlena

ČVUT FEL, katedra řídicí techniky

Abstrakt

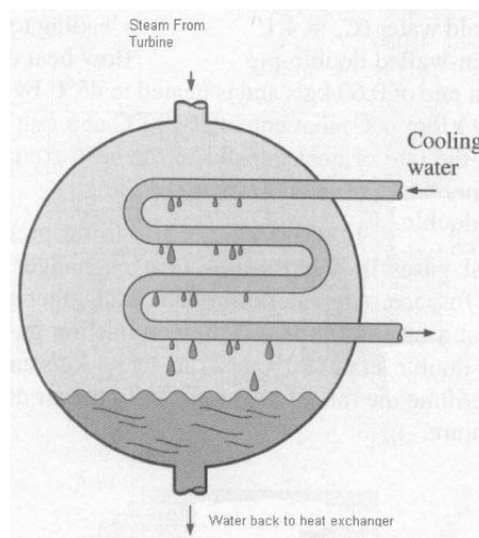
Tento příspěvek se zabývá modelováním parního kondenzátoru a jeho následnou aplikací pro simulaci provozu kondenzačních turbín. Vyvinutý model je po svém návrhu ověřen pomocí reálných dat a následně implementován do knihovny energetických komponent obsahující již dříve navržené jednotky typu tlakový díl turbíny, vstřikovací chladič a tlaková sběrna. Vhodnou kombinací těchto stavebních dílů lze věrně simulovat síť parních turbín a testovat jejich funkčnost.

1 Úvod

Tepelné elektrárny generující vysoký výkon obsahují v mnoha případech několik parních turbín pospojovaných do komplikovaných sítí. V těchto sítích se nejčastěji vyskytují dva typy turbín; protitlaké, jejichž koncové části jsou přivedeny do tlakových sběrů, kudy použitá pára opouští systém, aby mohla být transportována jako zdroj tepla do budov nebo jako technologické medium do průmyslových procesů, a kondenzační, kde se místo sběrnou používá parní kondenzátor, ve kterém se udržuje velice nízký tlak, při němž se pára ochlazuje proudící vodou a tak se transformuje do kapalného stavu. Zatímco model dílu kondenzační turbíny z velké části vychází z modelu dílu protitlaké turbíny [1] a neobsahuje tedy mnoho úskalí, kondenzační jednotka oproti tlakové sběrně představuje komplikovaný tepelný systém. Je to především způsobeno jejím nelineárním chováním, což ještě zvýrazňuje fakt, že v ní ve stejný okamžik koexistují dvě latentní komponenty (pára, voda), jejichž poměr se neustále mění. Popis tohoto procesu spočívá v repetitivním řešení systému parciálních diferenciálních rovnic, což může být vcelku značně namáhavé; proto je třeba brát v úvahu jistá zjednodušení během návrhu modelu.

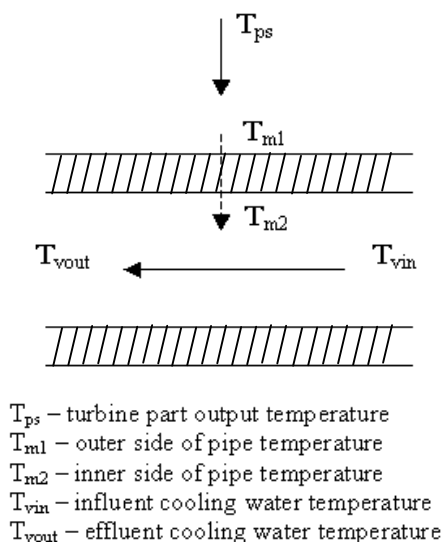
2 Matematický popis

Kondenzační jednotka představuje určitý typ tepelného výměníku s úkolem odebrat páře její teplo. Následkem toho se pára ochladí a změní skupenství, tj. zkapalní. Tento kondenzační proces probíhá pomocí soustavy trubek nainstalovaných v kondenzátoru v několika řadách nad sebou. Potrubím proudí chladící kapalina, kterou je právě pára ochlazována; vzniklý kondenzát se odvádí mimo jednotku do speciální nádrže (obr. 1).



Obr. 1: Kondenzační jednotka

Přestupy tepla odehrávající se v kondenzátoru lze popsat pomocí tří diferenciálních rovnic [2]. Každá reprezentuje jedno rozhraní, kterým musí teplo páry při kondenzaci projít; nejprve prochází vnější stěnou potrubí, následně se šíří stěnou potrubí a nakonec prochází vnitřní stěnou potrubí a je odebíráno proudící vodou (obr. 2). Teplota páry se snižuje, zatímco teplota stěn a chladicí vody roste.

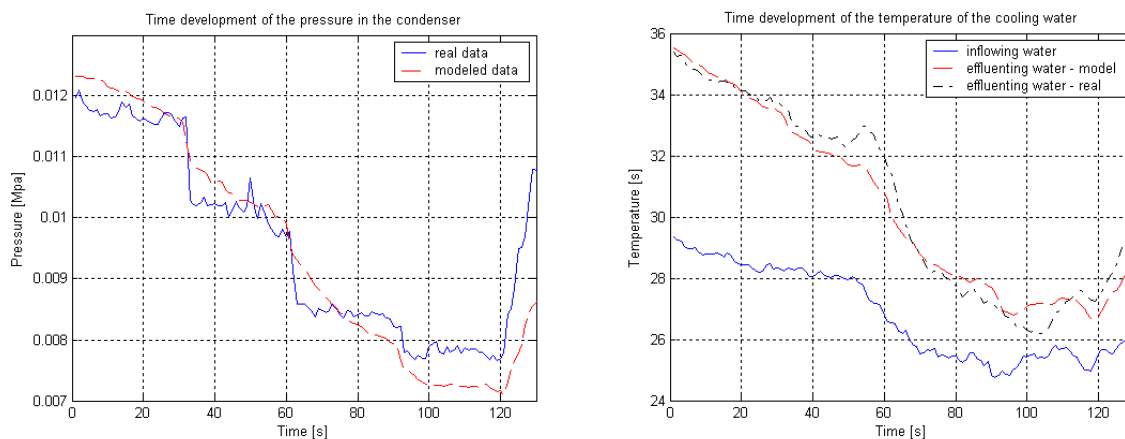


Obr. 2: Proces kondenzace

Přestupy rozhraní jsou charakterizovány tzv. koeficienty přestupů tepla. Jedná se o silně nelineární závislosti obsahující velkou řadu tepelných veličin (dynamická viskozita, tepelná vodivost aj.) a také parametry představující fyzikální vlastnosti kondenzátoru (délka kondenzačního potrubí). Tyto skutečnosti komplikují samotný proces modelování, nicméně prostřednictvím speciálního balíčku popsaného v další kapitole, který supluje parní tabulky, se jej daří vyřešit vcelku obstojně.

3 Parní kondenzátor v nástroji Simulink

Simulační schéma v nástroji Simulink odpovídá systému 4. řádu (3 diferenciální rovnice popisující přestup tepla, 1 diferenciální rovnice popisující tlak v kondenzátoru). Dále obsahuje převážně klasické bloky provádějící algebraické operace. Výpočty koeficientů přestupů tepla se provádí pomocí speciálního balíčku *Steam Property Package (SPP)* vyvinutého společností *HPL Honeywell*. Tento balíček se volá jako standardní matlabovská funkce s odpovídajícími parametry; ve schématu supluje parní tabulky a kromě výše uvedených koeficientů dodává také další tepelné veličiny jako entropie, entalpie aj., které jsou nezbytné pro korektní fungování modelu.

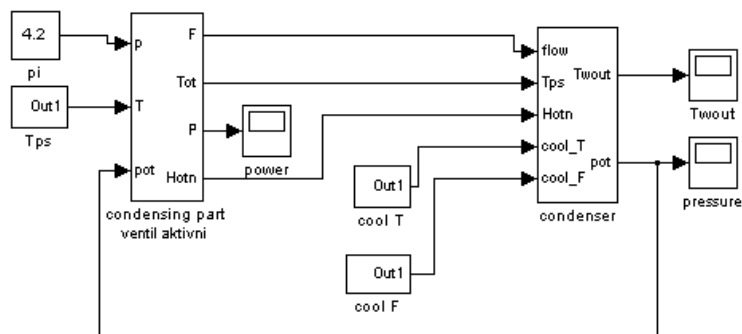


Obr. 3: Validace modelu (vlevo tlak v kondenzátoru, vpravo teplota chladicí vody)

Model byl testován pomocí reálných dat dodaných provozovatelem kondenzační turbíny; porovnání mezi skutečnými a modelovanými průběhy lze shlédnout výše. Bohužel nebyla dodána všechna data nezbytná k validaci, chyběly například informace o fyzikálních vlastnostech kondenzátoru. Tyto neznámé veličiny musely být odhadnuty, což mělo negativní dopad na koherentnost reálných a modelovaných dat. Nicméně i přes tyto komplikace jsou trendy zobrazovaných veličin shodné a samotné hodnoty se liší pouze v řádech jednotek procent.

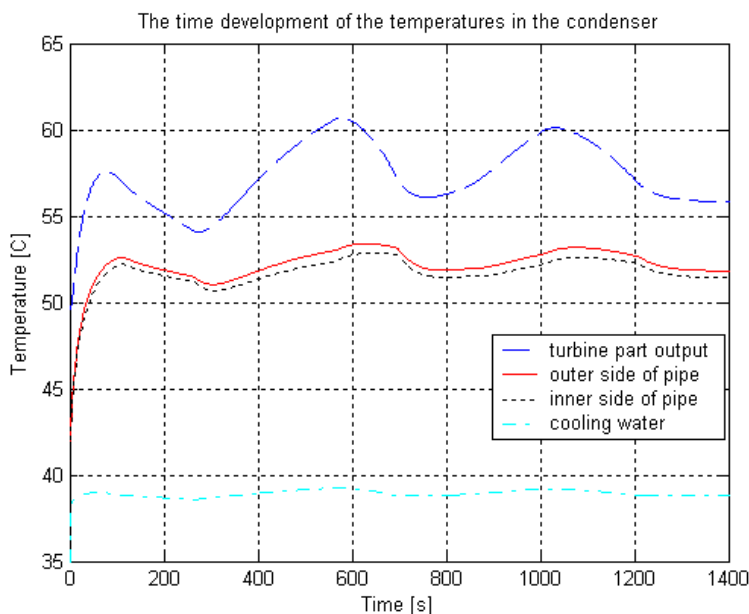
4 Simulace kondenzační turbíny

Druhá fáze testování funkčnosti kondenzátoru spočívala v propojení jednoho dílu kondenzační turbíny s kondenzační jednotkou. Tyto simulace probíhaly pomocí simulačního schématu obsahujícího zmíněné stavební díly ve formě, v jaké byly implementovány pro vznikající knihovnu energetických komponent [3].

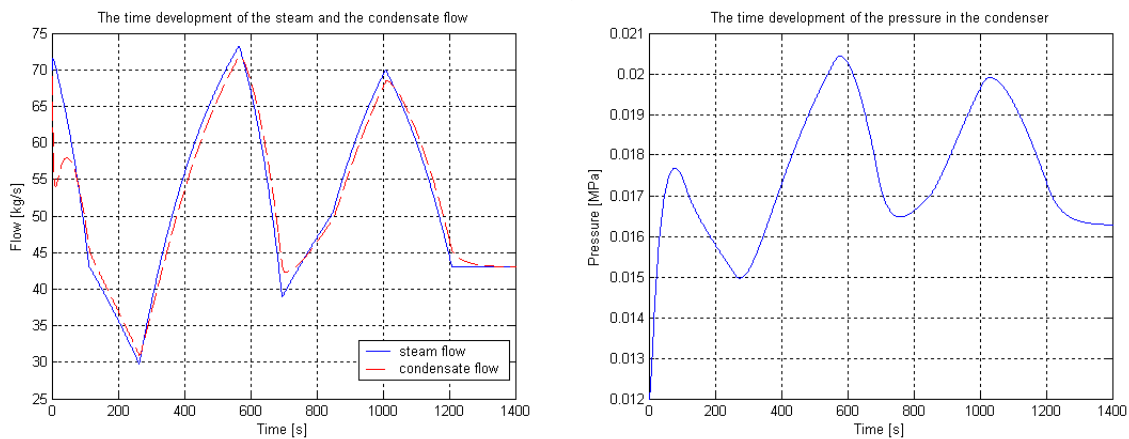


Obr. 4: Schéma kondenzační turbíny v nástroji Simulink

Kondenzační turbína byla testována pro různé polohy vstupního ventilu a pro konstantní hodnoty teploty a průtoku chladicí vody. Pro simulaci byl nejprve použit solver ode45 (Dormand-Price) s relativní tolerancí $1e-3$ a $1e-6$. Výpočet 1200 vzorků zabral 90 sekund pro oba případy, nicméně řešení s tolerancí $1e-6$ bylo stabilnější. Dále byly vyzkoušeny solvery ode32 (Bogacki-Shampine) a ode113 (Adams); tyto metody snížily výpočetní dobu zhruba o 20 procent. Všechny simulace byly prováděny na počítači Pentium 4, 2.5 Ghz, 512 MB RAM.



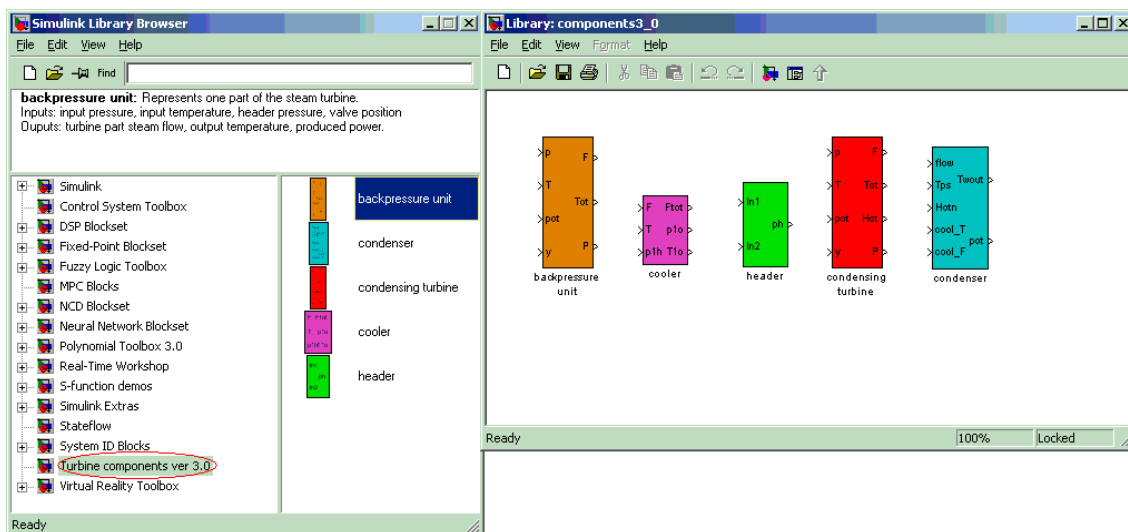
Obr. 5: Teploty v kondenzační jednotce



Obr. 6: Průtoky páry a kondenzátu (vlevo) a z toho resultující tlak v kondenzátoru (vpravo)

5 Kompletní knihovna energetických komponent

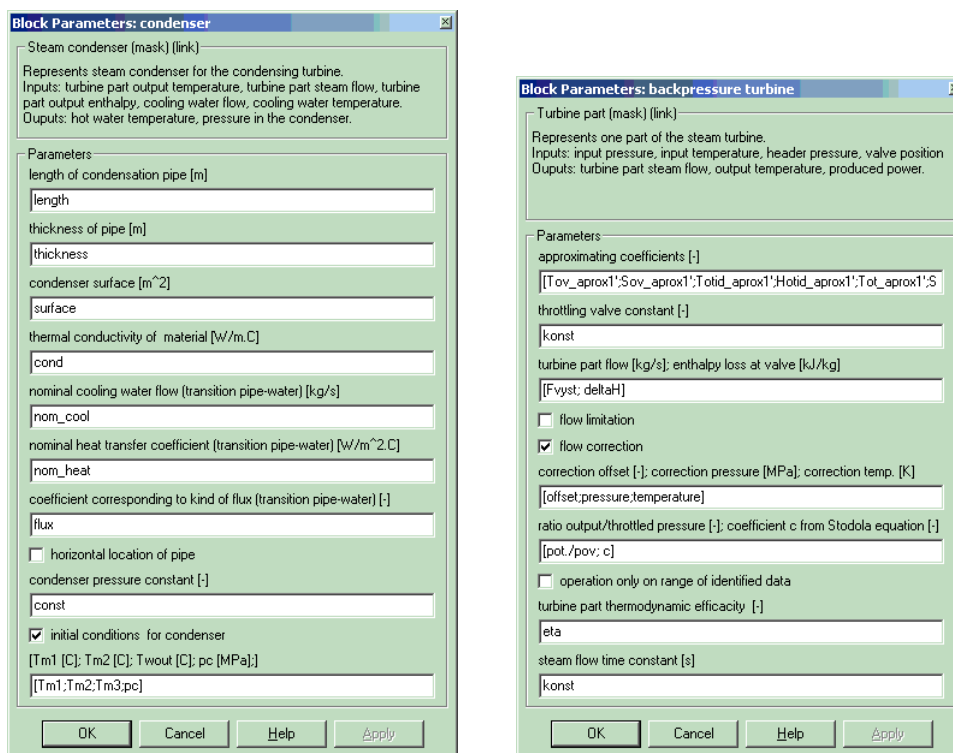
Navržený model parního kondenzátoru byl implementován do vyvíjené knihovny energetických komponent, čímž došlo k jejímu zkompletování. Ta má tak v současné době celkem pět prvků; protitlaký a kondenzační díl turbíny, tlakovou sběrnou, vstřikovací chladič a kondenzátor. Každá komponenta má vlastní masku parametrů, kterou se daný prvek ovládá. Omezuje se tím zásah uživatele do jejího vnitřku a umožňuje mu provádět pouze povolené změny.



Obr. 7: Kompletní knihovna energetických komponent

Kromě této klasické verze knihovny byla vyvinuta také verze pro pomalejší počítače. Komponenty této verze neobsahují přímé volání balíčku *Steam Properties Package*, ale používají aproximace používaných tepelných veličin. Tyto veličin jsou na zadaném rozsahu aproximovány pomocí dvourozměrné lineární regrese a získané koeficienty se zadávají do masky parametrů příslušných komponent. Chyba až na výjimky dosahuje řádu desetin procenta; pro případy, kdy je přesnost výpočtu příliš nízká, je třeba použít aproximace vyššího řádu. Nevýhodou tohoto přístupu je nutnost znát rozsah používaných veličin před samotným spuštěním simulace, což může působit komplikace v případech, kdy dojde k překročení uživatelem zvolených mezí.

Energetická knihovna je skoro ideálním nástrojem pro analýzu a simulaci sítí parních turbín a sběren v tepelných elektrárnách a také následnou optimalizace výroby elektrické energie a dodávání technologické páry; tímto modulárním způsobem modelování lze dosáhnout velice jednoduchého návrhu zadaného problému, čímž dojde k časové úspoře a jejímu následnému využití při řešení samotného optimalizačního úkolu.



Obr. 8: Maska parametru kondenzátoru (vlevo) a maska s aproximací *SPP* (vpravo)

6 Závěr

V tomto příspěvku byl navržen model parního kondenzátoru. Následně byla provedena jeho validace na reálných datech a tento prvek byl implementován do knihovny energetických komponent. Porovnání mezi reálnými a modelovanými daty vykázalo koherentnost trendů a pouze drobné rozdíly v průbězích. Tato přesnost umožňuje vyvinutý prvek použít s dalšími energetickými komponentami na simulaci energetických zařízení, přičemž se velká využitelnost předpokládá zvláště při řešení komplexních optimalizačních úloh regulace elektrické energie v rozlehlých systémech.

References

- [1] Cepák, M. *Simulation of the Steam Turbine in Matlab Environment*. In.: 2nd International Industrial Simulation Conference 2004, p. 251-255, Malaga, Spain.
- [2] Cídl, J. *Mathematical model of the steam turbine with suppressed vacuum*. In.: Control of Power systems '04 (on CD), 2004, Slovak University of Technology in Bratislava, Bratislava, Slovakia.
- [3] Cepák, M., Havlena, V. *Knihovna energetických komponent pro simulaci provozu parních turbín*. In.: Matlab 2004, Prague, 2004, Czech rep. VŠCHT, part 1-2, p. 60-63.

Poděkování

Tento výzkum je podporován společností Honeywell Prague Laboratory (96/95017/13135), grantem Ministerstva průmyslu a obchodu 1H-PK/22 a grantem 102/03/H116 Grantové agentury České republiky.