

SIMULACE PŘESTUPU TEPLA V MODELU UCPÁVKY PÁRY

HEAT-TRANSFER SIMULATIONS IN MODEL OF STEAM SEALING

Milan Schuster

Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Tylova 1581/46, 301 00 Plzeň,
e-mail: schuster@vzuplzen.cz

Abstrakt

Príspevek se zabývá simulačními výpočty proudění páry v modelu rotorové labyrintové ucpávky parní turbíny. Jsou zmíněny možnosti simulací proudění páry a přestupu tepla a tvorba výpočtového modelu. Příspěvek přináší vyhodnocení výsledků proudění páry při různých režimech provozu turbíny, které byly zadány pomocí kombinace povrchových teplot stěn rotoru, vnitřního a vnějšího tělesa. Výsledky popisují způsob tepelného zatížení komponent parní turbíny za různých režimů. Příspěvek dokumentuje výzkum a výsledky pracovního balíku WP5 projektu CESEN.

Abstract

The paper deals with simulations of steam flow in a model of a rotor labyrinth seal of a steam turbine. Possibilities of simulation of steam flow and heat transfer and creation of computational model are mentioned. The paper presents an evaluation of the results of steam flow in various modes of turbine operation, which were entered using a combination of surface temperatures of the walls of rotor, inner and outer body. The results describe the way of thermal loading of steam turbine components under different modes. The paper summarizes the research and results of the WP5 work package of the CESEN project.

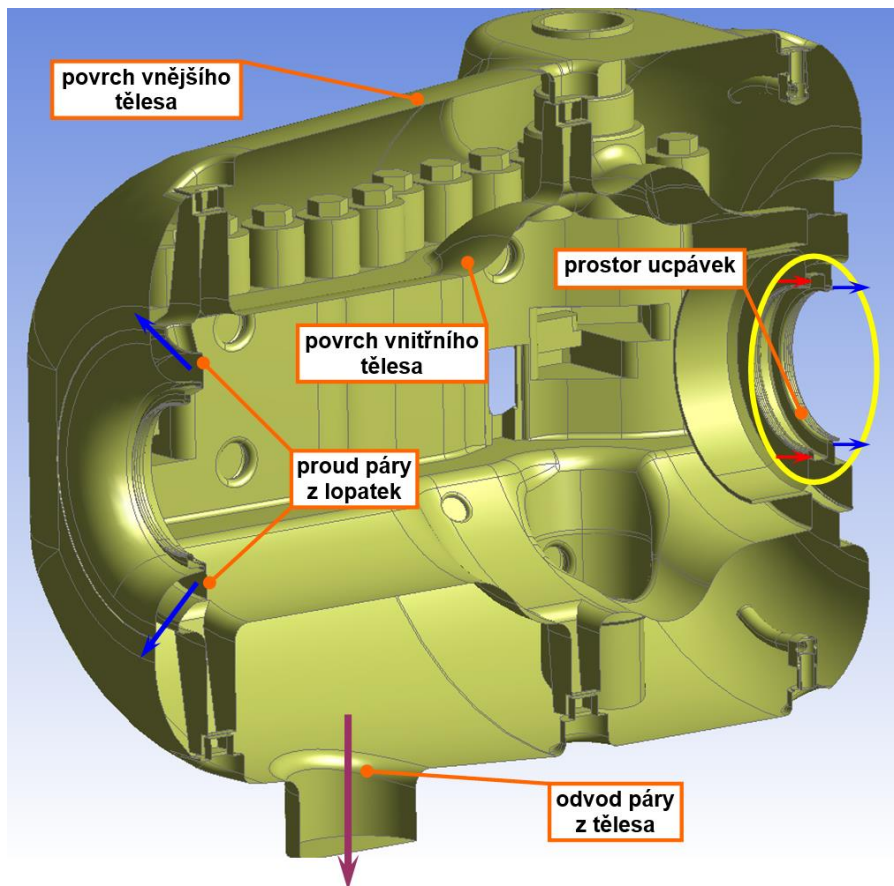
Úvod

Proudění a sdílení tepla, které souvisí s přenosem a přeměnou energií, jsou základními principy funkce většiny energetických zařízení, i parních turbín. Počítačové simulace umožňují zkoumat řadu konstrukčních a provozních variant komponent parní turbíny. Zajímavou částí průtočného traktu parní turbíny z hlediska bilance tepla je jednak prostor mezi vnitřním a vnějším tělesem turbíny, ve kterém proudí pára vystupující z lopatkové části, pára směřující do vnější ucpávky a pára prostupující z vnitřních ucpávek, a jednak vlastní rotorová ucpávka. Na obr. 1 je model prostoru mezi vnějším a vnitřním tělesem vysokotlakého dílu parní turbíny s vyznačením hlavních směrů proudění páry a významných částí (včetně prostoru rotorové ucpávky).

Mezitělesový prostor představuje pomalé proudění páry ve velkém objemu, naopak labyrintová ucpávka představuje přestup tepla z malého množství rychle proudící páry ve velmi úzkém kanálu labyrintu. Simulace přestupu tepla v modelech variant mezitělesového prostoru byly popsány a publikovány v článcích [1] a [2]. Tento příspěvek se stručně věnuje souvislostem simulací přestupu tepla v modelu labyrintové ucpávky.

Výpočtový model ucpávky

Výpočtový model pro CFD simulace úloh přestupu tepla v modelu ucpávky zahrnuje veškeré zadání, tvar modelu, výpočtovou síť a parametry numerického řešení. Základní model ucpávky byl vyvinut a ověřována jeho „těsnící“ funkce pro nominální parametry, popsáno v pracích [3] a [4]. Pro řešení byl celý systém rotorové ucpávky rozdělen do několika sekcí vzhledem k odlišnému tvaru břitů labyrintu a vzhledem k poloze kanálů meziprostoru pro odsávání a odvodu páry, tím vznikly dílčí modely pěti labyrintových sekcí a čtyř meziprostorů kanálů. Celý složený model ucpávky je naznačen v levé horní části na obr. 2a. Model ucpávky byl jednak řešen jako celek a jednak samostatně po jednotlivých sekcích.

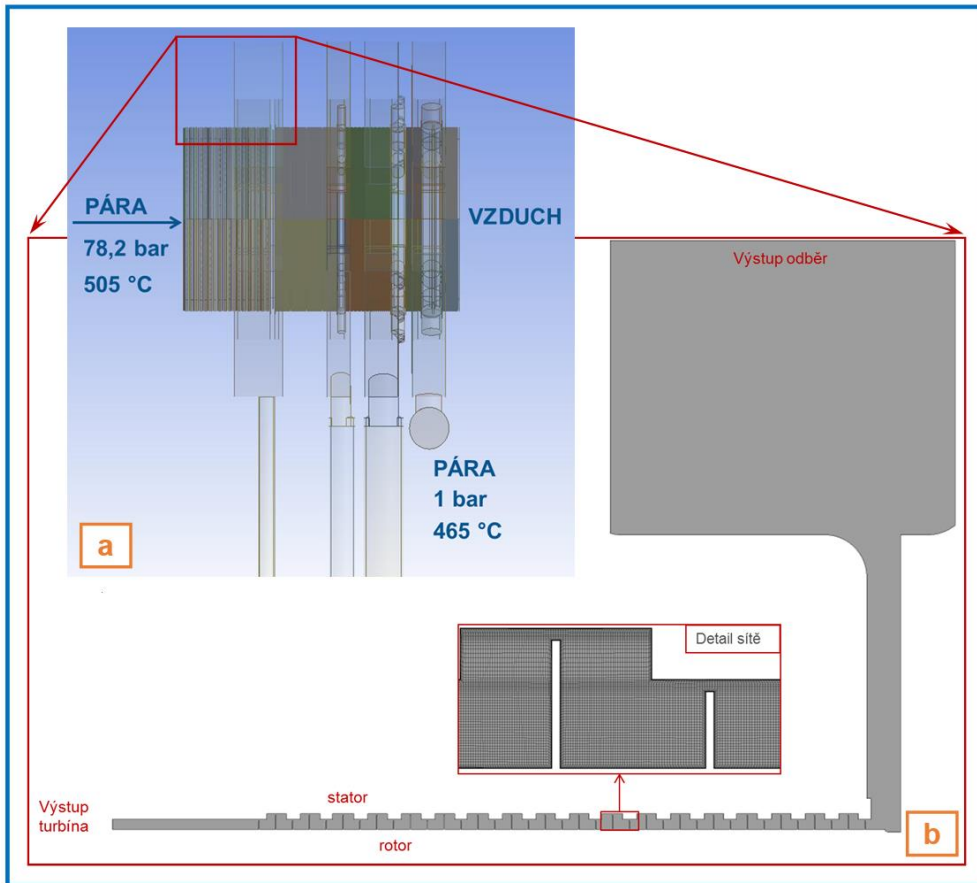


Obr. 1: Schéma řezu modelem mezitělesového prostoru

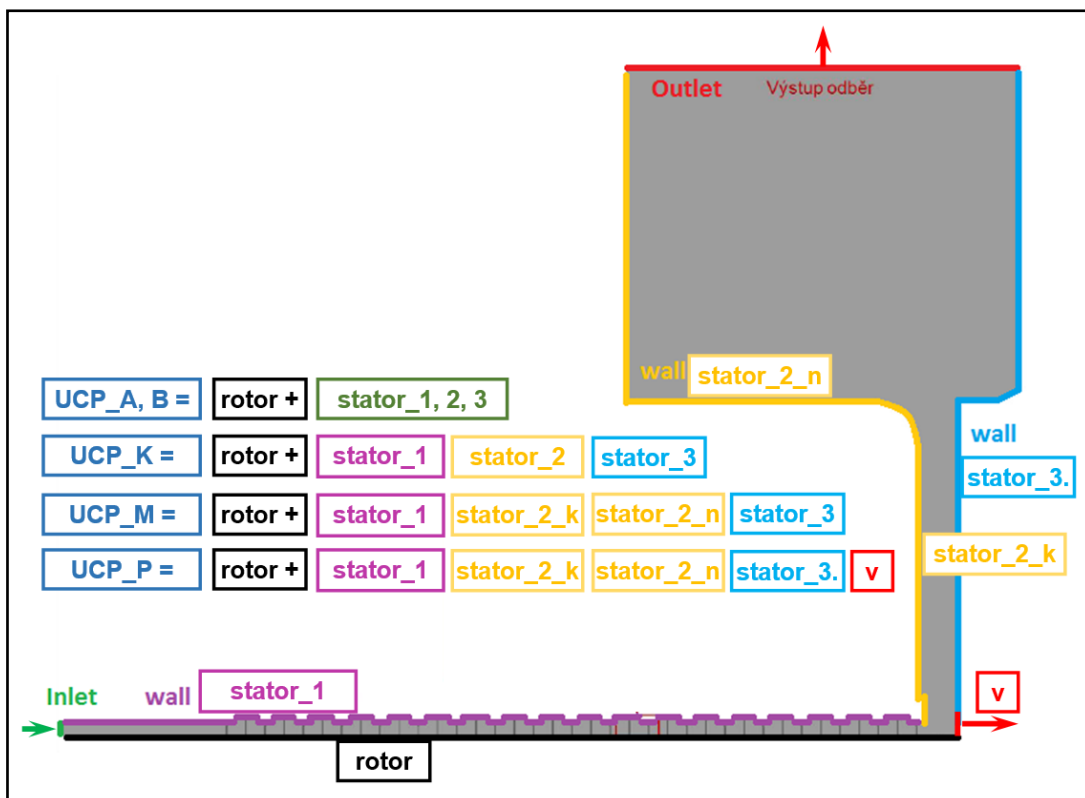
V příspěvku je popisována nejdůležitější přední sekce nejbližší vnitřnímu prostoru průtočné části vysokotlakého dílu turbíny (obr. 2b), která byla vybrána pro další vývoj a inovace výpočtového modelu přestupu tepla. Cílem vývoje výpočtového modelu ucpávky je řešení tepelných polí v ucpávce při různých provozních režimech turbíny. Režimy byly zadávány různými parametry pro okrajové podmínky výpočtů (hodnoty povrchových teplot vybraných stěn modelu).

Model ucpávky přední sekce byl vytvořen jako dvourozměrný model s jemnou hustou výpočetní sítí včetně „mezí vrstvy“ (obr. 2b), model umožňuje simulovat procesy s průnikem páry do ucpávky včetně rotace hřídele rotoru, tvaru břitů ucpávky a částí turbínového tělesa jako statoru. Státorem je nerotující plocha vnitřního a vnějšího tělesa, která tvarem svých částí vytváří celý trakt kanálků a labyrintových zahloubení pro vytvoření ucpávky. Rotorem je rotující plocha hřídele se všemi břity pro vytvoření labyrintu. Vstupem do modelu je ploška mezery, kterou vstupuje pára z vnitřních prostor VT tělesa do ucpávky, a výstupem je plocha, kterou pára odchází do kanálků traktu odvodu. Na obr. 3 je schéma modelu přední ucpávky s naznačenými variantami kombinací okrajových podmínek.

Model přední ucpávky byl postupně vyvíjen a vytvořen v několika variantách, které umožňovaly změnu typů okrajových podmínek s cílem simulace změn tepelného zatížení jednotlivých částí modelu při různých provozních režimech turbíny. Model ucpávky ve variantě UCP-A/B řešil změnu teploty páry (na obr. 3), modely UCP-K a UCP-M umožnily rozdělení stěny „statoru“ na několik částí a tím přesněji řešit situace s odlišnou teplotou vnitřního tělesa („stator_1 a _2“) a vnějšího tělesa („stator_3“). Model UCP-P sloužil ke studiu vlivu výstupu páry do následných traktů ucpávky („v“) na celkovou bilanci tepla.



Obr. 2: Model ucpávky pro simulace: a) celá ucpávka, b) varianta přední sekce ucpávky



Obr. 3: Schéma všech variant modelu ucpávky se zvolenými typy okrajových podmínek

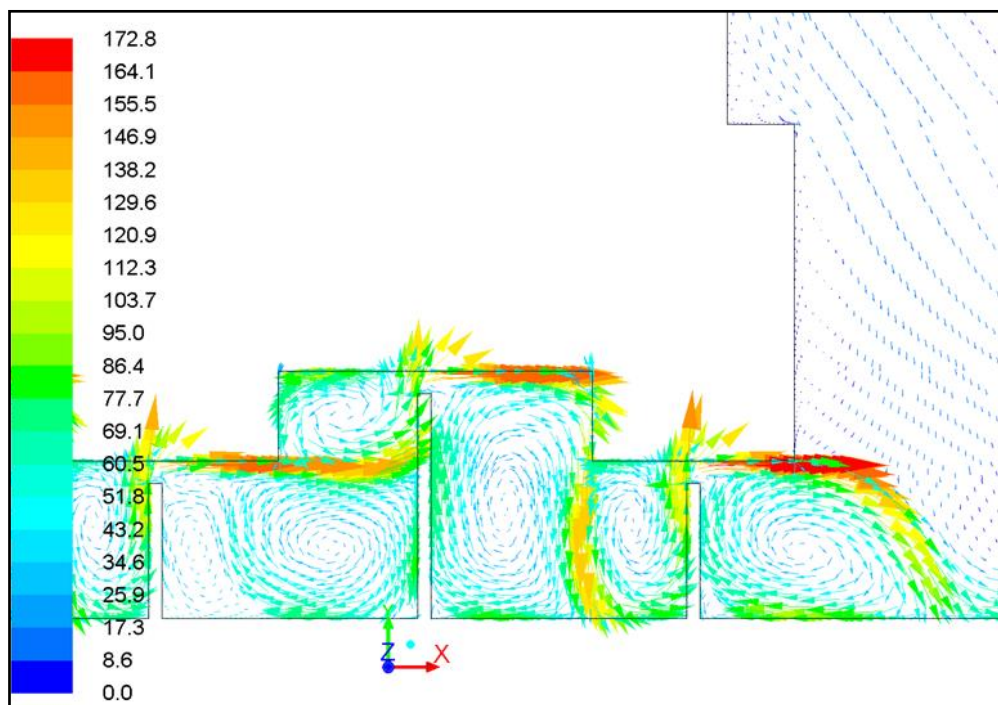
Všechny modely ucpávky byly vytvořeny ve dvoudimenzionální formě a měly prakticky shodné nastavení parametrů numerického procesu simulačních výpočtů. Axisymetrická výpočetní metoda v kombinaci s vybraným turbulentním modelem umožnily řešení simulací prostorového proudění páry a přestupu tepla.

Nastavení parametrů okrajových podmínek na stěně děleného statoru modelů UCP odpovídalo tepelnému zatížení za provozu turbíny, které bylo zadáváno pomocí povrchových teplot stěn modelu. Pro všechny modely UCP byly zadávány teploty pro stěnu „rotor“ 490 °C. Pro základní model UCP-A/B byla teplota stěny „stator“ proměnná v rozsahu 490–520 °C. Ostatní modely UCP s dělenou stěnou statoru měly zadáno pro stěnu „stator_3“ 490 °C, pro stěny „stator_1“ a „stator_2“ byly teploty proměnné opět v rozsahu 490–520 °C s tím, že teplota pro „stator_2“ byla rovna nebo menší než teplota stěny „stator_1“. Příklad kombinací teplot pro jednotlivé modely UCP je patrný z tabulek výsledků (tab. 1).

Výsledky

Výzkumné úkoly v rámci balíku WP5 projektu CESEN byly zaměřeny jednak na vývoj a testy výpočtových modelů pro řešení tlakových a teplotních polí v úzkém kanálu turbínové ucpávky (včetně ověření ucpávací funkce modelové ucpávky) a jednak na zjištění podmínek přestupu tepla mezi rotorem, státorem a párou za různých režimů provozu turbíny.

Výsledné výpočtové modely umožnily simulovat procesy přestupu tepla v rotorové ucpávce za různých podmínek. Vývoj rychlostního pole v modelu ucpávky při nominálním provozu je na obr. 4, situace je ilustrována vektory rychlosti páry ve výstupní části modelu ucpávky. Změny velikosti rychlosti, změny směru proudění a zavření páry při průchodu labyrintem ukazují těsnící funkci ucpávky.



Obr. 4: Proudění páry v části ucpávky na výstupu do odváděcího kanálu (vektory rychlosti, hodnoty v m/s)

Výsledkem simulací přestupu tepla v částech modelové ucpávky jsou hodnoty součinitele přestupu tepla. Součinitel umožňuje vyjádření tepelného zatížení a změn přestupu tepla v modelu ucpávky za různých provozních režimů. Simulace režimů jsou zadávány pomocí povrchových teplot stěn těles a rotoru v okolí ucpávky. V tab. 1 jsou uvedeny získané hodnoty součinitele přestupu tepla pro jeden typ modelu ucpávky v pořadí podle vzestupné hodnoty zadávané teploty stěny „stator_1“ (490–520 °C) pro všechny kombinace zadaných teplotně zatěžovacích variant (pro vybraný model označeno K01 – K34). Hodnoty výsledného součinitele přestupu tepla jsou pro všechny stěny modelu různé. Pro stěny „rotor“ a „stator_3“ jeho hodnota vykazuje určitý vývoj a citlivost ke změnám zadání variant. Pro stěnu „stator_1“ je pro většinu variant hodnota součinitele záporná, dáno vlivem teplejší stěny „stator_1“ vzhledem k teplotě páry. Hodnoty součinitele pro stěnu „stator_2“ ukazují pro tento model UCP-K na složitější souvislosti mezi teplotou stěny a proudící páry. Proto byl připraven model ucpávky UCP-M, u kterého byla stěna „stator_2“ upravena pro lepší sledování hodnot součinitele, byla rozdělena na úzkou část odváděcího kanálu „stator_2_k“ a rozšířenou část výstupu „stator_2_n“, v obou částech jsou odlišné podmínky proudění páry.

Tab. 1: Hodnoty součinitele přestupu tepla pro model UCP-K (popis v textu)

Zadáno			Součinitel přestupu tepla [W/m ² K]			
var.	tepl. stěn BC (stator 1/2) [°C]		rotor	stator_1	stator_2	stator_3
K01	490	490	1381.008	575.907	10.990	42.049
K11	500	490	1803.629	-645.505	15.897	82.803
K12	500	500	1827.026	-645.198	-297.746	150.043
K21	510	490	2263.831	-3045.842	44.030	133.647
K22	510	500	2340.827	-3141.156	-304.763	168.170
K23	510	510	2261.383	-3075.783	-1292.250	215.468
K31	520	490	2734.415	-8931.239	62.665	189.514
K32	520	500	2676.774	-6606.447	-245.196	230.277
K33	520	510	2700.406	-7224.231	-1200.633	295.295
K34	520	520	2678.959	-6679.385	1950.226	309.229

Výsledné hodnoty součinitele přestupu tepla dokládají a dostatečně kvantifikují tepelnou bilanci a podmínky přestupu tepla v částech labyrintové ucpávky za různých provozních režimů turbíny. Pro další studium tepelných poměrů jsou hodnoty součinitelů přestupu tepla uloženy v datových souborech a v jednoduchých grafických výstupech. Výsledkem projektu jsou i výpočtové modely variant ucpávky (UCP-i), které lze využít k dalším výpočtům přestupu tepla v labyrintové ucpávce i pro jiné provozní stavy (a jiné rozsahy zadávaných povrchových teplot.

Závěr

Příspěvek je zaměřen na problematiku řešení simulací sdílení tepla v rotorové labyrintové ucpávce (jako části reálné parní turbíny) při zahrnutí podmínek různých provozních režimů. Etapový výzkum problematiky přinesl jednak odladěný výpočtový model labyrintové ucpávky s ověřenou těsnicí funkcí [4], jednak sadu inovovaných výpočtových modelů přední sekce ucpávky [5] a konečně soubory hodnot součinitele přestupu tepla, které charakterizují tepelné poměry v ucpávce při zadaných provozních režimech turbíny [6]. Výsledky výzkumů jsou využitelné při sledování tepelného zatížení komponent parní turbíny a při hodnocení vlivů změn provozních režimů na funkci ucpávky.

Poděkování: Příspěvek vznikl v rámci řešení výzkumného projektu centra kompetence TAČR č. TE01020068 (CESEN – Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky).

Literatura

- [1] Schuster, M. (2013): Simulace termodynamiky komponent parní turbíny. *Sborník 8. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Srní, str. 177-180. ISBN 978-80-261-0272-4
- [2] Schuster, M. (2014): Modelování procesů sdílení tepla v energetických zařízeních. *Sborník 9. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Srní, str. 211-214. ISBN 978-80-261-0406-3
- [3] Klečková, J., Hamza, J. (2014): Proudění páry v labyrintové ucpávce. *Sborník konference „ANSYS 2014 – Setkání uživatelů a konference“*, TechSoft Eng. Praha, Dolní Morava. ISBN 978-80-905040-9-7
- [4] Klečková, J. (2015): *Modelování proudění páry v rotorové ucpávce parní turbíny*. Výzkumná zpráva, VYZ-VZ-35/15/058, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. a CESEN, Plzeň.
- [5] Schuster, M. (2018): *Analýza proudění a přestupu tepla v modelu turbínové ucpávky*. Výzkumná zpráva, VYZ-VZ-36/18/018, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. a CESEN, Plzeň.
- [6] Schuster, M. (2019): *Inovovaný model turbínové ucpávky pro simulace tepelného zatížení*. Výzkumná zpráva, VYZ-VZ-36/19/010, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. a CESEN, Plzeň.