

# POSLEDNÍ NÍZKOTLAKOVÉ STUPNĚ PARNÍCH TURBÍN S TRANSSONICKÝM A SUPERSONICKÝM PROUDEM PÁRY

## TRANSONIC AND SUPERSONIC STEAM FLOW OF THE LAST TURBINE STAGES

Jaroslav Synáč

Katedra energetických strojů a zařízení, Fakulta strojní, Západočeská univerzita v Plzni

### Abstrakt

Poslední nízkotlakové stupně jsou obtékány transsonickým nebo i supersonickým proudem mokré pracovní páry. Jsou uvedeny ztráty transsonického a supersonického proudu pracovní páry, které jsou generovány v lopatkových kanálech posledních stupňů. Příspěvek se také zabývá zvýšením výkonu, modernizací průtočných částí parních turbín jaderných elektráren Dukovany a Temelín, se zaměřením na přínos modernizace posledních nízkotlakových stupňů.

### Abstract

The transonic or supersonic flow of working wet steam is detected in the last stages of steam turbines low pressure parts. In text below there are presented losses generated in a turbine airfoil channel by transonic or supersonic flow. Next is modernization of turbine flow path discussion focused on the last stages of steam turbine commission on Czech nuclear power stations Dukovany and Temelin. Total power output profits of steam turbines are presented.

### Transsonický a supersonický proud pracovní páry

Poslední turbínové stupně parních turbín velkých výkonů jsou charakteristické transsonickým a u extrémně dlouhých oběžných lopatek, supersonickým proudem mokré pracovní páry. Přejít proud přehřáté do mokré páry probíhá v závislosti na rychlosti proudu, chemické čistotě napájecí vody v nukleačních stupních. To jsou zpravidla nízkotlakové předposlední stupně. Návrhové rozdělení entalpického spádu respektuje rozváděcí lopatku jako nukleační. Tato primární kondenzace vzniká přechodem mezní křivky (resp. pod Wilsonovu linii v závislosti na tzv. podchlazení). Vytváří směs páry a kapek vody o velikosti 1 až 2  $\mu\text{m}$ , se kterou pracují stupně za nukleačním stupněm. Primární kondenzace způsobuje sice termodynamickou ztrátu, ale protože trajektorie málo hmotných kapiček je shodná s trajektorií páry, nezpůsobí erozi následující oběžné lopatky. Ztráta nukleačního stupně vlivem vlhkosti je však násobně větší a lze ji omezit snížením rychlosti expanze proudu do subsonické hodnoty.

Sekundární kondenzace vzniká usazením kapek primární kondenzace a následným rozpadem vodních filmů na povrchích průtočné části. Spektrum kapek s velikostí 5 až 10  $\mu\text{m}$  obsahuje i relativně velké kapky 85 až 180  $\mu\text{m}$ . Protože jsou hmotné, jejich trajektorie je odlišná od parní fáze, a kromě ztrát způsobují erozi oběžných lopatek. V parní turbíně se odstředěná vlhkost odvádí odvodněním z povrchu statoru, u posledních stupňů pak štěrbinami duté rozváděcí lopatky do vnější části difuzoru a dále do kondenzátoru. Tato aktivní erozní ochrana se kombinuje, pokud je to možné, s pasivní erozní ochranou. Nejjednodušší je zakalení náběžné hrany, nebo lépe nanášení ochranného povlaku při co nejmenším vnesení tepla do základního materiálu oběžné lopatky.

Transsonický proud pracovní páry se objevuje u všech posledních i předposledních turbínových stupňů. Poslední stupeň s délkou oběžné lopatky 1220 mm (48") je ještě plně „transsonickým stupněm“. To znamená, že po celé délce oběžné lopatky má pracovní mokrá pára subsonickou a na výstupu z lopatky supersonickou rychlost při nominálním režimu. Geometrický tvar profilů lopatky respektuje omezení negativního vlivu interakčních ztrát rázovou vlnou generovanou odtokovou hranou sousedního profilu s mezní vrstvou na podtlakové straně profilu. Tato interakce vede vždy k zesílení impulzové tloušťky mezní vrstvy a úměrnému vzrůstu ztrát.

Nesmí dojít k odtržení mezní vrstvy a tím k enormnímu vzrůstu ztrát. Předpokladem je zajistit, v porovnání s laminární, interakci rázové vlny s adhezivnější turbulentní mezní vrstvou. Supersonický průtok pracovní mokré páry se objevuje asi v 10 % délky listu oběžné lopatky 1375 mm (54°). Představu o struktuře supersonického průtoku v na špičce této lopatky dává interferogram na obr. 1. Náběžná hrana generuje odlehlou kolmou rázovou vlnu, za kterou je proud subsonický (zelená oblast) s následnou silnou expanzí. Příslušné energetické ztráty v porovnání s následnými interakčními však nejsou významné. Pro vstupní hodnotu Machova čísla 1,45 jsou menší než 2 %, viz obr. 2. Součinitel ztrát kinetické energie je definován rovnicí (1):

$$\zeta = 1 - \frac{\lambda_2^2}{\lambda_{2is}^2}, \quad (1)$$

kde izentropické Lavalovo číslo je definováno rovnicí (2):

$$\lambda_{2is} = \sqrt{\frac{\kappa+1}{\kappa-1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_{2s}}{p_{1t}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]}. \quad (2)$$

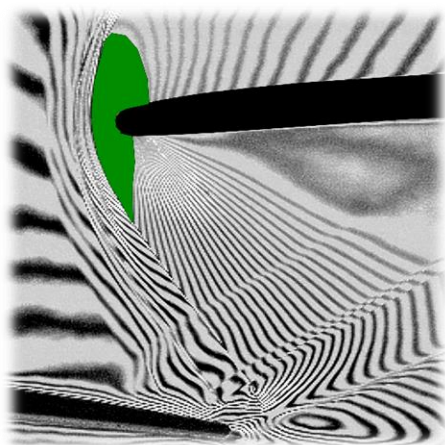
$\kappa$  je poměr tepelných kapacit ( $\gamma$  na obr. 2),  $\lambda$  je Lavalovo číslo proudu,  $p_{2s}$  a  $p_{1t}$  jsou tlaky, statický za resp. totální před profilovou mříží.

### **Přínosy aplikace nových posledních nízkotlakových stupňů v českých jaderných elektrárnách**

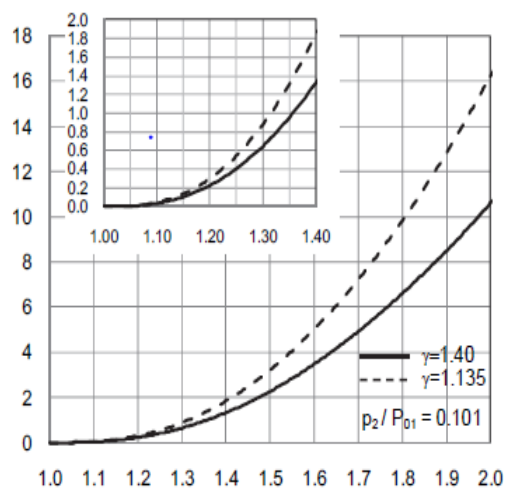
V jaderné elektrárně Dukovany (EDU) pracuje celkem 8 parních turbín s původním nominálním výkonem 220 MW jedné turbíny. Turbíny pracují se sytou vodní párou a s otáčkami rotoru 50 Hz. Modernizaci posledních turbínových stupňů provedl plzeňský Doosan Škoda Power. Původní poslední oběžná lopatka se 2 tlumícími vazbami průvlečným drátem na obr. 3, byla nahrazena novou volnou oběžnou lopatkou s transsonickými profily na obr. 4. Podobný způsob profilování byl použit i pro rozváděcí lopatky posledního stupně a pro předposlední stupeň.

Jaderné elektrárna Temelín (ETE) je a na rozdíl od EDU monobloková. Pracují zde 2 parní turbíny vyrobené v plzeňské Škodovce s původním nominálním výkonem 1000 MW jedné turbíny. Turbíny pracují se sytou vodní párou a s otáčkami rotoru 50 Hz. Modernizaci nízkotlakových stupňů provedl, podobně jako v EDU, plzeňský Doosan Škoda Power. Původní volná oběžná lopatka posledního stupně bez tlumících vazeb drátem na obr. 5, byla nahrazena novou lopatkou s délkou pracovního listu 1220 mm (48°) drátem na obr. 6. Tato lopatka je tlumena 2 tlumícími vazbami, středovou výčnělkovou vazbou a bandáží na špičce pracovního listu. Radiální vůle je definována vůlí mezi těsnícím břitem bandáže lopatky a statorem. Současně byla přepracována celá průtočná část nízkotlakového dílu. Původní 4 stupně v každém proudu byly nahrazeny pětistupňovým uspořádáním s novými oběžnými i rozváděcími lopatkami, na obr. 7. Také přínos nových nízkotlakových dílů vedl k tomu, že v únoru roku 2016, při nízké teplotě chladící vody a odpovídajícímu nízkému tlaku v kondenzátoru, dosáhla parní turbína rekordního výkonu 1100 MW.

V tabulce 1, jsou přínosy modernizací parních turbín jaderných elektráren Dukovany a Temelín. Celkový nárůst výkonu o 381 MW je významným zvýšením výrobní kapacity elektrické energie České republiky. Úspěšná modernizace celé průtočné části turbín, včetně nového typu radiálního těsnění stupňů a moderních vysokotlakových rozváděcí lopatek spolu s výše popsanou rekonstrukcí nízkotlakových dílů, dokumentuje nejen zkušenosti ale i vysokou aktuální úroveň znalostí přeměny tepelné energie v kinetickou. Patří k nim i znalost chování pracovní přehřáté a mokré páry v aplikaci na zvyšování účinnosti, dlouhodobé provozovatelnosti a spolehlivosti parních turbín Škoda.



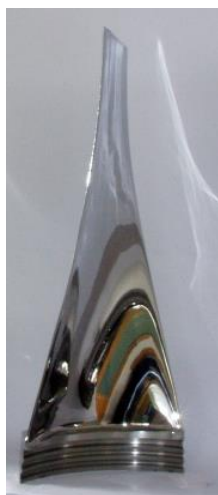
Obr. 1: Supersonický průtok v profilové mříži (laboratoř ÚT AVČR Nový Knín)



Obr. 2: Energetický ztrátový součinitel v [%] kolmé rázové vlny



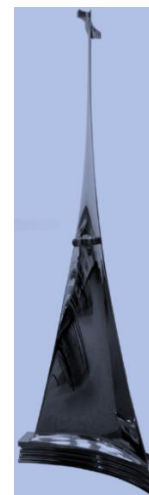
Obr. 3: EDU původní oběžná lopatka posledního stupně



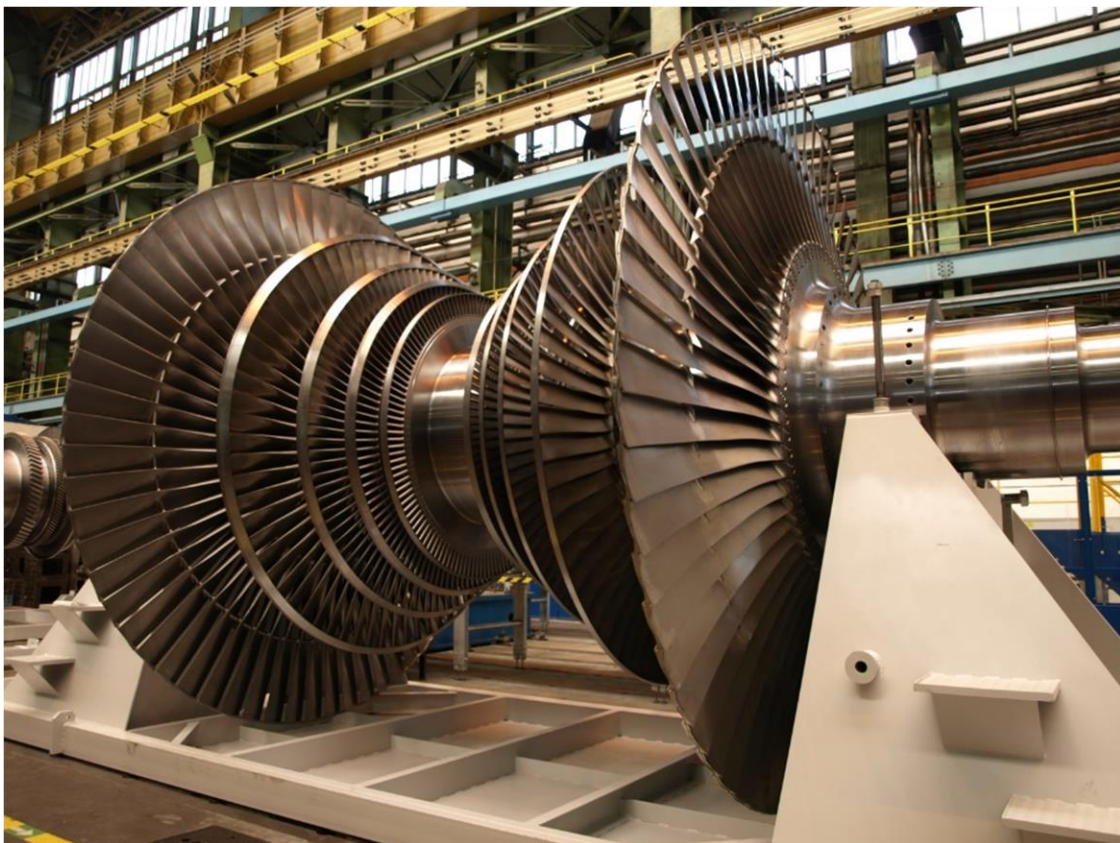
Obr. 4: EDU nová oběžná lopatka posledního stupně



Obr. 5: EJE původní oběžná lopatka posledního stupně



Obr. 6: EJE nová oběžná lopatka posledního stupně



Obr. 7: Nový nízkotlakový olopatkový rotor pro parní turbínu ETE

Tabulka 1: Celkový přínos modernizací EDU a ETE

	Navýšení výkonů modernizací	Celkem
Dukovany (EDU)	8 x 29 MW	232 MW
Temelín (ETE)	2 x 74,5 MW	149 MW
Celkem		381 MW

### Poděkování

V článku prezentované výsledky a výstupy byly finančně podpořeny programem na podporu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje EPSILON, TAČR TH2020057, Podprogram 2 Energetika a materiály.