



MARTIN LUXA
JAROSLAV SYNÁČ

Efektivita přeměn energie

Možnosti dokonalejší přeměny

Elektrická energie: jedna ze zásadních závislostí naší civilizace

Lidé se během posledních několika desetiletí stávají více a více závislími na energii, kterou pro svou práci nevytváří sám člověk. S určitým zneklidněním bychom si měli přiznat, že většinu energie dnes čerpáme především z elektrických zásuvek a akumulátorů prostřednictvím různých periferních zaříze-

ní, která jsme sestrojili a naučili jsme se je víceméně dovedně ovládat. A energii z potravy nebo energii uloženou v našich tukových zásobách bez zřejmého pracovního užítku likvidujeme v posilovnách.

Výroba elektrické energie, její dostatečné množství, snadná dostupnost, rozumná, ještě akceptovatelná cena, spolehlivost dodávek atd. představují pro současnou lidskou společnost velmi závažný problém. Omezenost a problematičnost tzv. obnovitelných zdrojů, tenčící se zásoby fosilních paliv, problematika bezpečnosti jaderných elektráren, nutnost bezpečného dlouhodobého uložení jaderného odpadu a další aspekty jsou zneklidňující otázky energetické koncepce naší vlasti, Evropy a celého světa.

Ing. Martin Luxa, Ph.D., (*1964) vystudoval na katedře letadel Strojní fakulty ČVUT v Praze. V Ústavu termomechaniky AV ČR, v. v. i., se zabývá především prouděním stlačitelných vazkých tekutin. (www.it.cas.cz)

Dr. Ing. Jaroslav Synáč (*1951) vystudoval Strojní fakultu tehdejší VŠSE, nyní ZČU v Plzni. V Doosan Škodě Power, s. r. o., se zabývá návrhy lopatek parních turbín. (www.doosanskoda.com)

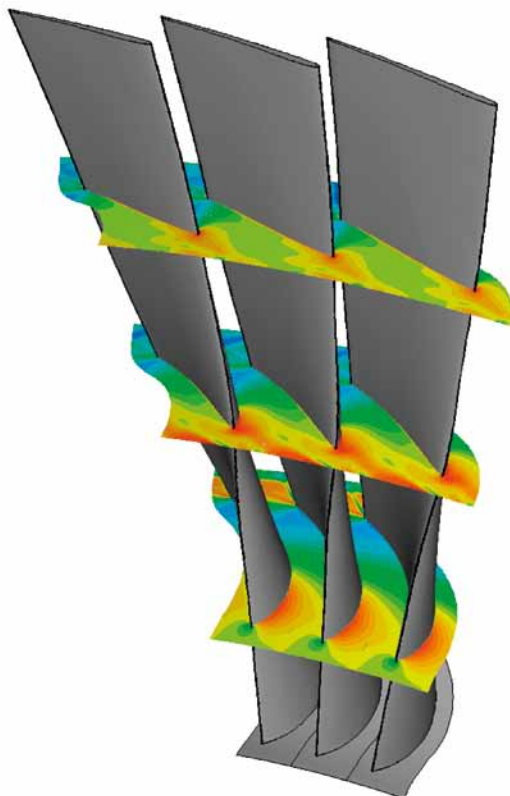
← 1. Rotor nízkotlaké části parní turbíny výkonu 270 MW pro paroplynovou elektrárnu v Počeradech. Na obou koncích jsou osazeny oběžné lopatky posledního stupně, které jsou 1220 mm dlouhé.

Efektivita přeměn energií v elektrárně

Vedle hledání nových způsobů přeměny různých druhů energií na elektrickou energii je aktuálním úkolem kromě jejího efektivního využívání i její co nejefektivnější výroba. V ne příliš vzdálené době nebyly otázky skutečně hospodárné výroby elektřiny a jejího využívání tím, co bylo životně důležité. Před třiceti lety jsme například ve škole ještě slyšeli, že tepelná elektrárna s dobrou účinností je ta, která z chemické energie ukryté ve stu vagonech uhlí pouze třicet vagonů přemění na energii elektrickou. Sedmdesát procent energie se ztrácí energetickými přeměnami v tepelné elektrárně: chemická energie se mění nejprve v kotli elektrárny na energii tepelnou, tepelná pak v parní turbíně na mechanickou, mechanická energie v generátoru na energii elektrickou. Zhruba se v takové tepelné uhelné elektrárně s parní turbínou vyrábí 1 kilowatthodina z 1 kg severočeského hnědého uhlí.

Starší bloky tepelných elektráren mají v současné době účinnost okolo $\eta_{pr} = 35\%$ (viz vagony uhlí nahoře v textu), současný špičkový stav představují moderní bloky s účinností okolo 47% až 50% a předpokladem pro dobu okolo roku 2020 je situace, kdy nové bloky budou mít účinnost až okolo $\eta_{pr} = 55\%$. Zvýšení účinnosti je úměrné zvýšení teplotního a tlakového spádu tepelného oběhu. Proto se zvyšuje tlak a teplota vstupní páry do turbíny. Stále vyšší parametry vstupní páry s sebou přinášejí nutnost vývoje nových materiálů, nových konstrukčních uzlů a technologií.

Současné špičkové bloky pracují na vstupu do parní turbíny s přehřátou párou o teplotě



2. Příklad numerické simulace proudění ve třech řezech mezi rotorovými lopatkami 1220 mm.

až 620 °C a tlakem 30 MPa. U parních turbín, které budou uvedeny do provozu po roce 2020, se předpokládá teplota vstupní páry až 800 °C a tlak 38 MPa.

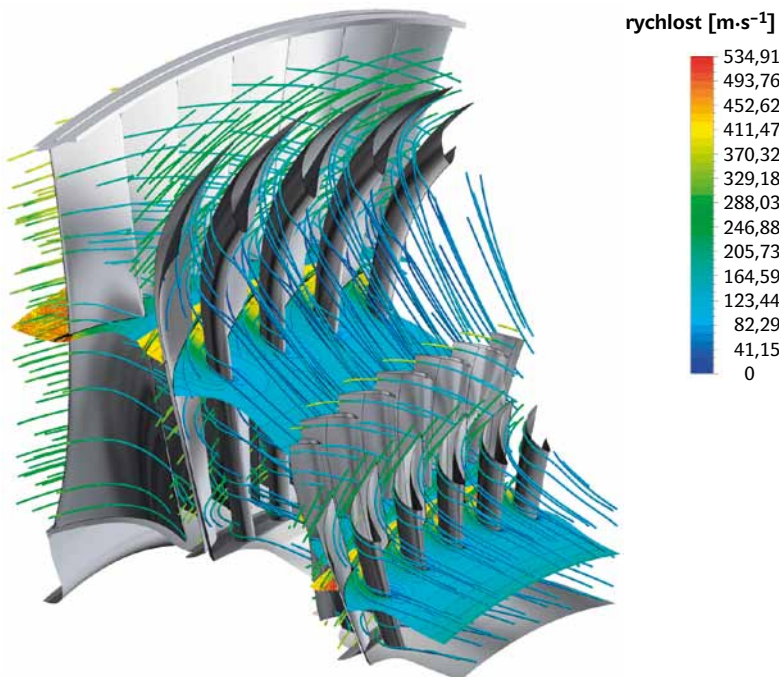
V současné době dochází i k modernizaci elektráren, které jsou již v dlouhodobém provozu. Nové poznatky v oblasti termomechaniky a aerodynamiky umožňují vylepšit především účinnost turbíny. Tak se například podařilo zvýšit výkon každého bloku jaderné elektrárny v Temelíně z 1000 MW na 1050 MW – samozřejmě při stejné spotřebě paliva. Podobně po nedávno dokončené modernizaci jaderné elektrárny Dukovany došlo k podstatnému navýšení jejího výkonu.

3. Příklad numerické simulace proudění posledními dvěma stupni nízkotlaké části parní turbíny. U axiální turbíny protéká pracovní pára souběžně s hlavní osou rotoru jednotlivými řadami rozváděcích a oběžných lopatkových kol. Pára je vhodně nasměrována rozváděcími lopatkami do lopatek oběžných kol, které roztáčí.

Míra efektivnosti energetických přeměn se nazývá účinností. V případě složitých dějů ji lze stanovit součinem dílčích účinností jednodušších procesů, které probíhají v rámci zkoumaného složitějšího děje. Protože platí druhý zákon termodynamický (William Thomson, lord Kelvin of Largs, 1824–1907: „Neexistuje takový termodynamický proces, jehož jediným výsledkem by bylo převádění nějakého množství tepla získaného z termostatu na práci.“), pohybuje se hodnota účinnosti vždy mezi nulou a jedničkou (či mezi nulou a stem procent). Takže například pro účinnost tepelné elektrárny η_{pr} platí:

$$\eta_{pr} = \eta_o \cdot \eta_k \cdot \eta_p \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_{vs}$$

kde η_o je účinnost reálného tepelného oběhu, η_k činnost kotle, η_p účinnost parovodů, η_m mechanická účinnost turbíny, η_g účinnost generátoru, η_{tr} účinnost transformace a konečně η_{vs} je respektování vlastní spotřeby elektrárny. Představíme-li si, že každý z popsaných dějů probíhá se stejnou účinností (např. 90%), bude po vynásobení výsledná účinnost elektrárny $\eta_{pr} = 47,8\%$, tzn. že pouze necelá polovina energie, která je obsažena ve spalovaném uhlí, se odvede do elektrické sítě.



Vysokorychlostní aerodynamická laboratoř

Jedním z výzkumných pracovišť, které dlouhodobě spolupracují s výrobním závodem vyrábějícím lopatkové stroje (tj. třeba axiální nebo radiální turbíny), je Aerodynamická laboratoř Ústavu termomechaniky AV ČR, v. v. i., která se nalézá v obvodu královského zlatohorního města Nový Knín ve středních Čechách. Laboratoř je ukryta v krásné přírodě, v lesích na úpatí kopce Chvojná. Důvodem tohoto podivuhodného umístění akademického pracoviště nebyly sobecké rozmery vědců, kteří na přelomu padesátých a šedesátých let laboratoř navrhli. Důvodem byly dostatečně velké a dobře těsnící podzemní prostory starého zlatého dolu (obr. 4), které slouží jako podtlaková nádoba. Štoly, které tuto nádrž tvoří, byly vyraženy našimi předky do algonkických břidlic. Poslední práce související s případným obnovením těžby zde byly prováděny za protektorátu. Na stě-

nách štol lze místy najít i zajímavé barevné usazeniny (obr. 5).

Princip aerodynamických tunelů, které jsou v laboratoři, spočívá v jejich napojení na tuto nádobu, ve které se odsátím vytváří značný podtlak vůči okolnímu prostředí. Po otevření ventilu dojde k nasávání vzduchu z atmosféry potrubím aerodynamického tunelu. Jsou-li kanály aerodynamického tunelu vhodné tvarovány, lze dosáhnout urychlení proudění až na rychlosti dvojnásobně vyšší, než je rychlost zvuku. Proto je toto zařízení vhodné i pro měření dlouhých lopatek nízkotlakých stupňů parních turbín velikého výkonu, kde se těchto rychlostních poměrů dosahuje.

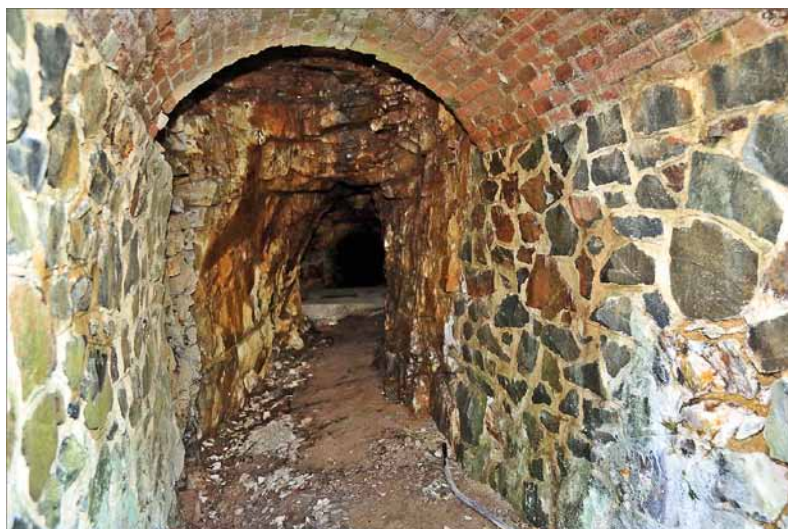
Při návrhu měřeného modelu a při správném nastavení parametrů proudění v aerodynamickém tunelu se musí dbát zásad fyzikální podobnosti (model bývá například menších rozměrů než skutečné dílo, tunelem neproudí vodní pára, ale suchý vzduch

apod.) tak, aby výsledky měření bylo možné použít při návrhu skutečného stroje.

Návrh a výrobu velmi přesného modelu zajišťují ve spolupráci s výzkumníky vysoce kvalifikovaní strojírenští odborníci, laboratoř disponuje poměrně dobře vybavenou dílnou.

Vědci v laboratoři kombinují při měření několik vzájemně nezávislých metod tak, aby vytvořený obraz o kvalitě proudění okolo lopatek byl pokud možno celistvý, objektivní a pravdivý. Při zkoumání proudění se využívá rozličných pneumatických, zviditelňovacích a optických metod. Není bez zajímavosti, že laboratoř disponuje řadou unikátních přístrojů. Jedním z nich je obří Machův-Zehnderův interferometr (obr. 6). Díky němu jsme schopni pozorovat děje, které se odehrávají v zorném poli o průměru až 160 milimetrů.

Zjištěná experimentální data a jejich následný vědecký rozbor představují nezastupitelný podklad pro návrh konečného optimálního tvaru lopatky.



4. Pohled do štoly sv. Václava bývalého zlatého dolu, která tvoří část podtlakové nádrže laboratoře.

5. Příklad barevných usazenin na stěně jedné ze štol.



Parní turbíny velikého výkonu

Přeměna tepelné energie přehřáté páry na energii mechanickou probíhá v parní turbíně (obr. 1). Je to obvykle obrovský stroj, který potichu, bez vibrací a s přesností švýcarského hodinového strojku otáčí neméně velikým elektrickým generátorem. Pára při průtoku lopatkami koná práci – expanduje, tj. klesá její tlak a teplota a narůstá její objem. Ne každý stupeň turbíny, tvořený vždy jedním rozváděcím a oběžným kolem, se podílí stejnou měrou na přeměně tepelné energie proudící páry na mechanickou energii. Z hlediska podílu na celkové přeměně energie jsou zvláště významné poslední stupně, které proto mají podstatný vliv na účinnost celé turbíny. Aby parní turbína měla co největší účinnost, je nutné docílit toho, aby výstupní průřez jejího posledního stupně byl co největší a výstupní rychlost z něj co nejmenší. Tyto požadavky vedou u parních turbín velkých výkonů k návrhům dlouhých neprizmatických oběžných lopatek. Jsou upraveny speciálními závěsy v rotoru. Vnější průměr oběžného kola posledního stupně velké parní turbíny je značný, někdy i přes 4 metry. Obvodová rychlost je proto velká a na lopatce u špičky překračuje rychlost zvuku. Vektorovým složením této obvodové složky rychlosti lopatky a rychlosti expandující pracovní páry dochází k průtoku lopatkovými kanály posledního stupně nejen

1) To se projevuje nejen při experimentálních pozorováních, ale samozřejmě i v matematickém popisu dějů. V oblasti podzvukového proudění jsou parciální nelineární diferenciální rovnice vyššího řádu, které proudění stlačitelné vazké tekutiny složitě a obtížně popisují, eliptického typu, v oblasti nadzvukových rychlostí typu hyperbolického.

6. Nahoře: Aerodynamický tunel na měření turbínových lopatek v Novém Kníně s Machovým-Zehnderovým interferometrem, zavěšeným přes měřicí prostor. 7. Uprostřed: Celkový pohled na budovy laboratoře. Snímek © Naděžda Murmaková.

vysokými podzvukovými, ale i nadzvukovými rychlostmi.

Tato vysoká aerodynamická zatížení vyžadují pečlivý návrh profilů posledních oběžných lopatek. Protože se plně projevují vlivy stlačitelnosti a vazkosti pracovní páry, při obtékání lopatek vznikají soustavy rázových vln, které vedou k nárůstu ztrát. Odlišné je i celkové chování a vlastnosti proudícího média v podzvukových a nadzvukových rychlostech.¹

Jako každé technické řešení je i celek oběžné lopatky posledního stupně parní turbíny řešením komplexním. Kromě aerodynamického návrhu je nutné garantovat dlouhodobou provozovatelnost. Mechanické vlastnosti lopatky, její statická a dynamická pevnost musejí být zahrnuty, spolu s technologií výroby, v jejím finálním aerodynamickém řešení.

Proto se při návrhu optimálního tvaru lopatky, která představuje špičkové technické dílo, vyplácí spolupráce výrobního závodu se specializovanými aerodynamickými laboratořemi. Tuto cestu již před mnoha lety zvolili i ve firmě Doosan Škoda Power, s. r. o., v Plzni, která je předním světovým výrobcem velkých parních turbín (velké jsou nejenom výkonem, ale i rozměry).

Budoucnost výroby energie

Mnozí lidé nabývají přesvědčení, že se celé lidstvo během několika málo příštích desetiletí dostane do stavu výrazného nedostatku energie, který bude omezovat rozvoj společnosti. Lidstvo hledá zásadní východisko např. v celosvětovém úsilí o realizaci řízené termojaderné fúze, která představuje prakticky nevyčerpatelný a ekologicky přijatelný budoucí zdroj energie pro lidstvo. To není vůbec jednoduchý a v dohledné době v praxi snadně zvládnutelný postup získávání energie. Je proto naším důležitým úkolem elektrickou energii nejen efektivně a s rozmyslem spotřebovávat, ale i co nejefektivněji vyrábět. K tomuto cíli směřuje a jemu i slouží spolupráce strojírenských výrobních závodů a vysokorychlostních aerodynamických výzkumných pracovišť.

8. Dole: Interferenční obraz proudového pole mezi profily na středu délky lopatky 1200 pořízený Machovým-Zehnderovým interferometrem. Proužky představují oblasti konstantní rychlosti proudící tekutiny, smysl proudění je zleva doprava. Návrhové podmínky proudění, tj. vstupní Machovo číslo je $M_1=0,358$, rychlost za lopatkami je nadzvuková $M_2=1,325$. Za odtokovou hranou lopatky vidíme úplav a systém vstupních rázových vln. Ty se vyskytují pouze v supersonickém proudovém poli.

