

# Parní turbína a zvýšení účinnosti cyklu v českých uhelných elektrárnách

Referát porovnává účinnost cyklu původních a obnovených elektráren v české energetice. Popisuje se konstrukční a materiálové řešení nových parních turbín ŠKODA, které jsou dodávány do obnovených elektráren. Dalším krokem ke zvyšování účinnosti výroby elektrické energie v uhelných elektrárnách je využití nadkritických parametrů páry. Popisuje se konstrukční a materiálové řešení nadkritické parní turbíny ŠKODA 660 MWe a další stroje pro vysoké parametry, které jsou v portfoliu tohoto výrobce. Porovnává se účinnost nadkritického a podkritického bloku a vliv přehřívání na účinnost bloků menšího výkonu. Diskutuje se vzájemná vazba teploty a tlaku páry. V závěru je naznačen další možný vývoj parametrů páry až do teplot 700 až 720 °C a možnosti českých výrobců při výzkumu a vývoji zařízení pro tyto parametry. Uvádí se návrh demo jednotky s turbínou na vstupní teplotu 700 °C.

Tvrdá soutěž mezi jednotlivými výrobními technologiemi a druhy paliv nutí projektanty a výrobce technologických zařízení hledat nové cesty zvyšování účinnosti uhelných elektráren. Tato práce si klade za cíl ukázat dosažený pokrok v době od 60. let minulého století a pokusit se o výhled pro druhou dekádu tohoto století. Uváděné údaje jsou založeny na prakticky ověřených hodnotách výrobce parních turbín ŠKODA. Analýza účinnosti je proto zaměřena na účinnost tepelného cyklu uhelné elektrárny v rozsahu strojovny tak, jak se obvykle prezentuje na tepelných bilančních schématech a jak se uvádí v garancích účinnosti pro parní turbínu. Nezabývá se tedy účinností kotle ani problematikou vlastní spotřeby elektrárny.

Uhelné elektrárny v československé energetice byly budovány na bázi dvou základních projektů – bloku 110 MWe a bloku 200 MWe. Tyto elektrárny byly vybaveny z velké většiny zařízeními československých výrobců. Tyto bloky byly stavěny i v zahraničí a turbíny ŠKODA 110 MWe byly vyráběny v licenci i v Indii firmou BHEL. Parních turbín 110 MWe bylo vyrobeno více než šedesát bloků, turbín 200 MWe je v provozu

## Bloky 110 MWe

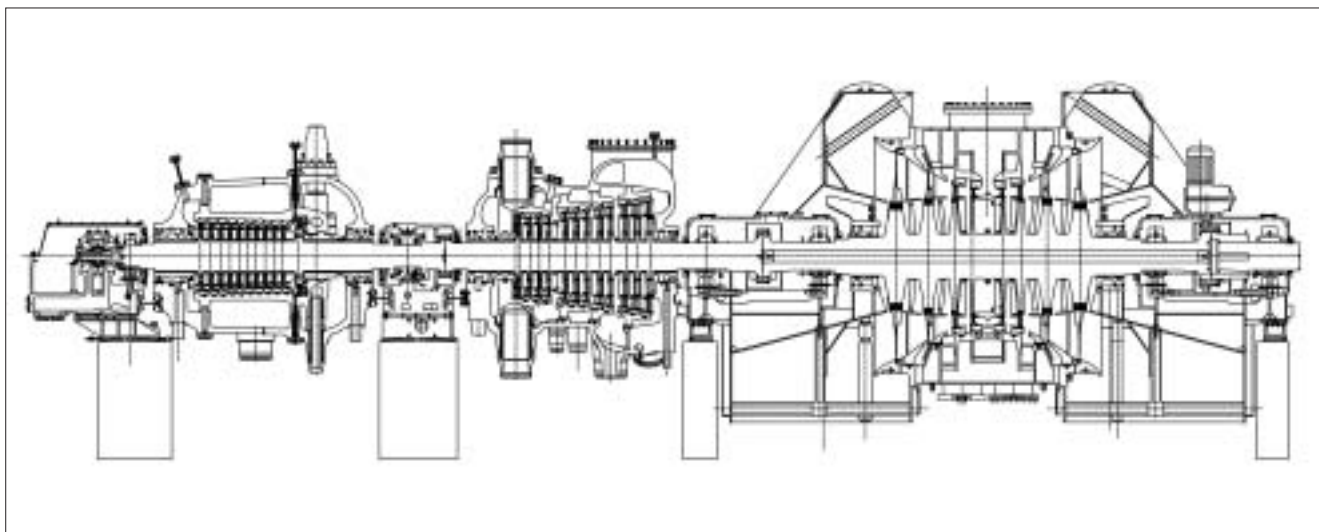
Tyto stroje vznikaly konstrukčně koncem padesátých a začátkem šedesátých let. Původní záměr byl použit teploty páry 565 °C a takto byly také první bloky projektovány. V té době byly turbíny stavěny výhradně z tuzemských materiálů. Vývoj žárupevných materiálů pokračoval ještě v šedesátých a sedmdesátých letech a dokonalejší poznání jejich vlastností bohužel přineslo snížení teploty páry na 535 °C a tato hodnota zůstala zachována i pro větší bloky 200 MWe a později 500 MWe. Možnost zvýšení teploty se naskytlá až v 90. letech, kdy se otevřel pro výrobce světový trh ocelí.

Pokusíme-li se odhadnout ztrátu na účinnosti cyklu snížením teploty admissní a přehřáté páry, kdy zhruba platí, že každých 10 °C zhorší účinnost o 0,25 % pro admissní páru a dalších 0,25 % pro přehřátou páru, dostaneme zhoršení tepelné účinnosti cyklu o 1,5 %. Konfigurace parní turbíny 110 MWe byla tehdy třítělesová. Bylo to dáno především technickými možnostmi výroby výkonných rotorů a odlitků turbínových těles. Dnes by se takový stroj stavěl jako jednotělesový nebo dvoutělesový. Třítělesová konfigurace je při modernizacích

První stroje 110 MWe vykazovaly tepelnou účinnost cyklu 42,2 % a toto číslo bude sloužit jako základ pro porovnání s moderními stroji pro uhelné elektrárny. Začátkem šedesátých let byla tato účinnost velmi dobrá i v porovnání se světem. U některých elektráren byly problémy s provozem vysokotlakých ohříváků napájecí vody a jejich přínos pro účinnost bloku v kontextu posuzování s uvažováním komínové ztráty. Vyřazení vysokotlakých ohříváků z provozu pochopitelně projektovou účinnost elektrárny zhoršovalo.

Ani další rekonstrukce tohoto stroje už tak úspěšné nebyly. V osmdesátých letech se prováděla obnova flotily těchto strojů v československé energetice. Důvody byly dva. Prvním důvodem byla materiálová obnova teplotně exponovaných částí, především vysokotlakých a středotlakých rotorů a vnitřních těles, druhým důvodem pak byl ambiciózní plán posílení úlohy kombinované výroby elektřiny a tepla ve velkých elektrárnách.

Provozovatel měl zájem z hlediska snadné údržby o to, aby hlavní díly všech turbín byly záměnné, i když požadavky na provoz jednotlivých strojů byly velmi rozdílné. Jedna část turbín, se

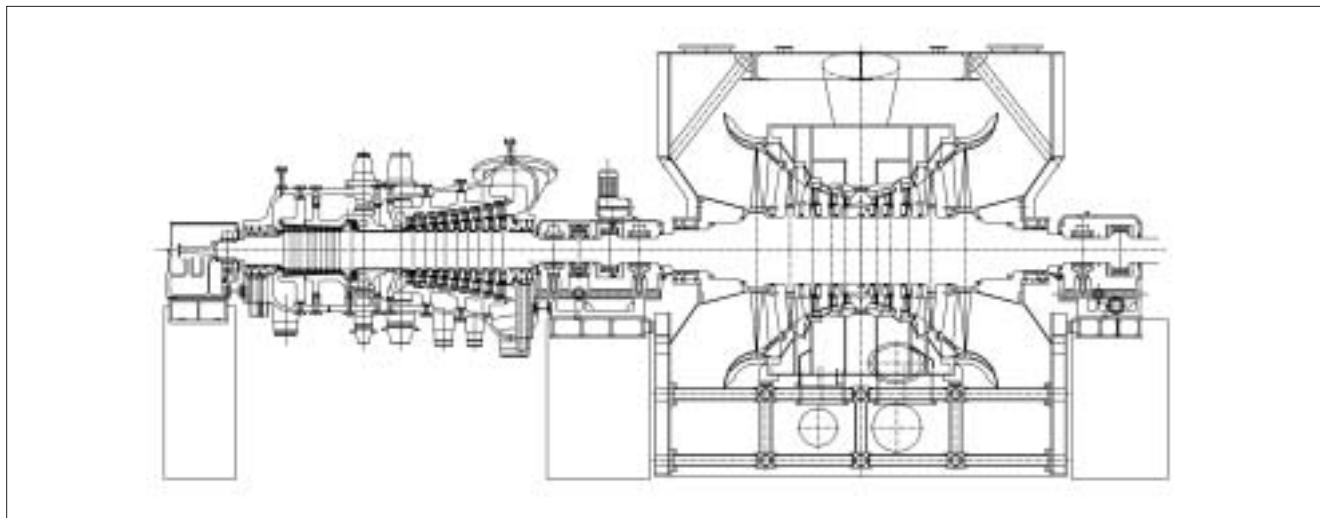


Obr. 1 – Řez turbínou 110 MWe

několik desítek. Další etapou vývoje byl uhelný blok o elektrickém výkonu 500 MWe, který byl v tuzemsku postaven pouze jeden, a to v Elektrárně Mělník. V současné době probíhá výstavba prvního bloku nové generace s nadkritickými parametry páry o elektrickém výkonu 660 MWe v Elektrárně Ledvice.

těchto turbín spíše na překážku, a to zvláště pro zlepšení účinnosti VT dílu, který byl původně koncipován s regulačním stupněm typu Curtis, který zpracovával velký entalpický spád se špatnou účinností. Přesto ale provozovatel požadoval při modernizacích zachování této konfigurace, aby se nemusel měnit základ turbosoustrojů.

kteřou se nepočítalo v dlouhodobém horizontu, byla opravena výměnným způsobem bez ambic zlepšit účinnost, pouze prodloužit životnost a odstranit deficit výkonu kvůli stárnutí průtočné části. Perspektivní turbíny byly překonstruovány na teplárenské, přičemž původní konfigurace kondenzační turbíny zůstala. Nová turbína měla



Obr. 2 - Řez turbínou 200 MWe

umět odběr tepla v páře i v horké vodě. Odběr páry byl z důvodu tlakové úrovně pamí sítě zařazen za přehřívák kotle, před středotlaký díl turbíny. Tímto umístěním byl zároveň chráněn přehřívák kotle proti velkému snížení průtoku páry v případě velkého odběru páry. Požadavky na funkci turbíny byly nakonec tak různorodé, že hledisko účinnosti ustoupilo do pozadí. Dosažená účinnost cyklu 42,7 % byla jen o málo lepší než původní turbíny.

Zlepšení účinnosti se mělo opírat hlavně o lepší zatěsnění průtočné části, jeho konstrukční provedení se však v dlouhodobějším provozu neosvědčilo. Poslední modernizace turbíny 110 MWe se uskutečnila až v první dekádě nového století, kdy použitím nového profilování průtočné části a jejím dokonalejším zatěsněním, převzatým z plynových turbín se dosáhlo tepelné účinnosti cyklu 44,4 %, což je o 5,2 % lepší než původní stroj.

### Bloky 200 MWe

Parní turbína o výkonu 200 MWe byla vyvíjena v šedesátých letech, na bázi prakticky stejných materiálů jako turbína 110 MWe. Pro tento stroj byl vyvinut ve Škodě nový koncový stupeň o délce 840 mm, který v té době byl na velmi dobré technické úrovni. Původně se předpokládala teplota páry 565 °C, ale podobně jako u turbín 110 MWe se nakonec aplikovala teplota 535 °C na admisní i přehřáté páře. Tlak páry se zvýšil na 16,5 MPa, a to byl prakticky jediný parametr, který zvýšil tepelnou účinnost cyklu. Vliv zvýšeného tlaku se dá odhadnout na 1,5 až 2 %, když pro subkritický cyklus uvažujeme vliv každého 1 MPa jako změnu účinnosti o 0,5 až 0,6 %.

U prvních strojů bylo dosaženo porovnávací tepelné účinnosti 44,4 %, což je o 5,2 relativních procent lepší než stroje 110 MWe. Větší část tohoto přírůstku účinnosti je nutno přičíst zlepšené termodynamické účinnosti turbíny, kde kromě některých zlepšení proudových vlastností turbínových stupňů (nová generace lopatkových profilů) přispěl také faktor velikosti turbíny. Těchto turbín bylo vyrobeno několik desítek pro potřeby domácí energetiky

i pro export. Nikdy však nebyla realizována žádná modernizace tak jako u turbín 110 MWe.

Až koncem první dekády dochází ke kompletní modernizaci dvou elektráren v české energetice, z nichž jedna je však vybavena stroji konstrukce sovětské LMZ. Tyto modernizace využívají objektu původní elektrárny a některých původních zařízení, ale kotel a strojovna jsou projektovány jako nová technologie, odpovídající technické úrovni době. Proto bylo možno zvýšit i parametry cyklu na tlak 17,5 MPa a teplotu 570 °C na admisní a 575 °C na přehřáté páře.

Nové materiály, které byly vyvinuty ve vývojových programech Evropské unie, toto zvýšení umožňují. V případě modernizace Elektrárny Pruněv bylo možno změnit i konfiguraci turbíny. Bylo použito moderní dvoutělesové koncepce s kombinovaným vysokotlakým a středotlakým dílem (viz obr. 2). Aplikací nově vyvinutého 3D lopatkování turbíny se podařilo zvýšit termodynamickou účinnost turbíny, takže spolu s vlivem zvýšených parametrů páry se podařilo dosáhnout zatím nejvyšší účinnosti subkritického uhelného bloku 47,6 %, a to je o více než 7 procent lepší než původní 200 MWe bloky.

V české energetice je v provozu ještě blok 500 MWe, který prošel modernizací vysokotlaké části turbíny. Parametry páry však zůstaly na původní úrovni, takže z hlediska účinnosti cyklu je tento blok překonán blokem o polovičním výkonu, ale s vyššími parametry cyklu.

Jak bude patné ze souhrnného porovnání účinností a jejich vývoje za poslední půlstoletí, připravovaný uhelný blok pro nadkritické parametry o výkonu 660 MWe představuje z hlediska účinnosti přeměny energie skokovou změnu. Nové zárupevné oceli, které byly vyvinuty v evropských programech COST a jsou vyráběny předními evropskými firmami, umožňují dnes postavit parní turbínu pro teploty páry 600 °C admisní a 610–620 °C přehřáté. Podle terminologie zavedené v USA se jedná o parametry USC (ultrasupercritical), pokud je teplota cyklu vyšší než 1 100 °F (593 °C).

Nadkritická turbína ŠKODA 660 MWe je postavena z těchto evropských materiálů.

Následující přehled uvádí označení materiálů rozhodujících komponent.

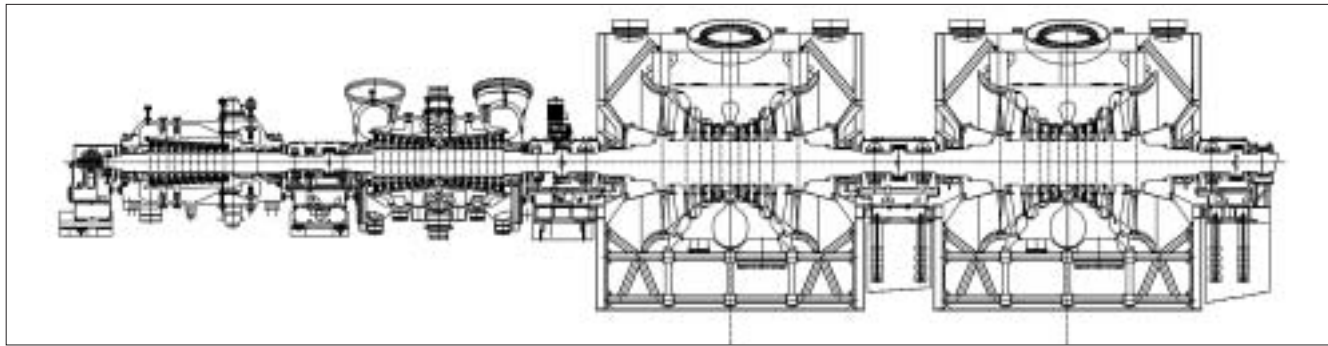
### Materiály hlavních dílů parní turbíny Ledvice 660 MWe

- Přívodní potrubí admisní páry: P92
- Ventilové komory VTRZR: G-X12CrMoVNbN9-1
- Tělesa VT a ST dílů: G-X12CrMoVNbN9-1
- Rotory VT a ST: X14CrMoVNbN10-1
- Rotory NT: 27NiCrMoV15-6
- Oběžné lopatky VT: Bohler T550
- Oběžné lopatky ST: Bohler T505SC
- Koncová lopatka NT: Bohler T671
- Klíčové šroubové spoje ve vysoké teplotě: Inconel 718

Parní turbína je tandemového uspořádání (obr. 3). Skládá se z jednoho kusu jednoproudého VT dílu, jednoho dvouproudého ST dílu a dvou dvouproudých NT dílů s výstupem dolů. Turbína je kondenzační s přehříváním, s devíti odběry pro regeneraci a třemi neregulovanými odběry pro teplofikaci. Regenerace je tvořena pěti NT ohříváky a třemi VT ohříváky.

Vstup páry do VT dílu turbíny je přes samostatné ventilové bloky po obou stranách turbíny. Ventilový blok je tvořen jedním odlehčeným rychlozávěrným ventilem a dvěma neodlehčenými regulačními ventily. Odtud je pára vedena čtyřmi převáděcími potrubími do okružního kanálu vlastního dvouplášťového VT dílu. VT díl má horizontální dělicí rovinu staženou inconelovými závrtnými šrouby. Průtočná část je tvořena 10 stupni s 3D tvarovanými profily a je ve špičkové partii zatěsněna voštinovými ucpávkami. Tyto ucpávky umožňují minimalizovat radiální vůle nadbandážových ucpávek. Rozváděcí kola jsou mechanicky skládaná. Z VT dílu je vyveden jeden regenerační ohřev.

Přehřátá pára do ST dílu vstupuje přes čtyři záchytné ventily do okružního kanálu dvouproudého ST dílu. ST díl je rovněž dvouplášťového provedení. I ST díl má horizontální dělicí rovinu staženou inconelovými a ocelovými



Obr. 3 - Řez turbínou 660 MWe

ZVYŠOVÁNÍ ÚČINNOSTI CYKLU U TURBÍN ŠKODA						
	parametry	r. 1960 - 1970	r. 1970 - 1980	r. 1985 - 1990	úprava parametrů	r. 2000 - 2010
110 MWe	12,8 MPa / 535 °C / 535 °C	42,2 %	-	42,7 %	12,8 MPa / 535 °C / 535 °C	44,4 %
200 + 250 MWe	16,5 MPa / 535 °C / 535 °C	44,4 %	-	45,3 %	17,5 MPa / 570 °C / 575 °C	47,6 %
500 MWe	16,5 MPa / 535 °C / 535 °C	-	46,3 %	-	17 MPa / 535 °C / 565 °C	47,4 %
USC 660 MWe	-	-	-	-	28 MPa / 600 °C / 610 °C / 28 MPa / 600 °C / 620 °C	51,4 / 51,5 %

Tab. 1 - Zvyšování účinnosti cyklu u turbín ŠKODA

závrtnými šrouby. Průtočná část je tvořena 2 × 8 stupni s 3D tvarovanými profily a je ve špičkové partii zatěsněna voštinovými ucpávkami. Rozváděcí kola jsou mechanicky skládaného provedení.

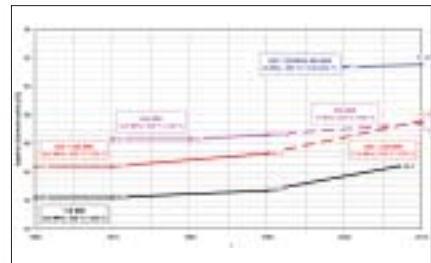
Ze dvou výstupů ST dílu je pára vedena vždy jedním převáděcím potrubím do jednoho NT dílu. Vnitřní těleso NT dílu je řešeno jako odlitek z nodulární litiny a je na vstupu do průtočné části turbíny vybaveno spirální skříň, která zajišťuje rovnoměrnou distribuci páry do vlastní průtočné části dvouproudového NZ dílu. NT díl obsahuje 2 × 5 stupňů. Koncová lopatka je délky 1 085 mm. Rozváděcí kola v přední části turbíny jsou skládané koncepce, poslední dvě rozváděcí kola jsou svařovaná. Rozváděcí kolo koncového stupně je osazeno dutou rozváděcí lopatkou umožňující odsávání vodního filmu a tím omezující erozi oběžných lopatek.

Všechny rotory turbíny jsou kované monobloky a jsou uloženy v radiálních segmentových ložiscích, každý rotor vždy ve dvou.

#### Vývoj účinnosti uhelných elektráren, výhled do budoucnosti

V tabulce č. 1 a na grafu v obrázku č. 4 jsou uvedeny účinnosti cyklu a jejich vývoj za posledních padesát let. Podkritické bloky dosáhly účinnosti 47,6 %, což je zvýšení oproti roku 1960 o 12,8 %. Další zvyšování účinnosti je možné aplikací USC bloků, které jsou v současné době na úrovni 51,5 %, což je o skokových 8 % výše než nejlepší subkritický cyklus.

Padesát let vývoje a ekonomický tlak na zvyšování účinnosti přinesly zvýšení efektivity přeměny energie o plných 22 %, což asi málokdo čekal. Další vývoj bude samozřejmě odvislý od cen materiálů, paliv a elektrické energie.



Obr. 4 - Schéma zvyšování účinnosti cyklu u turbín ŠKODA

Důležitou roli budou hrát politická rozhodnutí o penalizaci méně účinných zdrojů. Nezávisle na výhledu těchto těžko predikovatelných cen a rozhodnutí se intenzivně pracuje na další skokové změně účinnosti uhelných elektráren - dosažení teplot 700-720 °C. Evropa i USA mají svoje podporované výzkumné-vývojové programy, ve kterých české firmy (a ne vždy jejich vinou) nemají odpovídající zastoupení.

Proto ŠKODA POWER připravuje výstavbu demo jednotky na vysoké teploty, která by ověřila technologie niklových slitin a v neposlední řadě ztraktivnila české firmy jako partnery pro společné výzkumné-vývojové programy.

**Ing. Karel Duchek,**  
**Ing. Josef Peleška, Ing. Miroslav Kapic,**  
ŠKODA POWER a.s.,  
karel.duchek@skoda.cz

## Steam turbine and increase of cycle efficiency in Czech coal power plants

The report compares efficiency of cycles in original and renewed power plants in the Czech power energy. It describes construction and material solution of new steam turbines ŠKODA, which are being supplied into the renewed power plants. Another step to increasing efficiency of electricity production in coal power plant is the usage of above-critical parameters of steam. It describes construction and material solution of above-critical steam turbine ŠKODA 660 MWe and another machinery for high parameters which are in the portfolio of this pro-

ducer. It compares efficiency of the above-critical and the below-critical unit and the impact of reheating for the unit efficiency with smaller performance. The mutual bond of temperature and steam pressure is being discussed. In the conclusion, another possible development of steam parameters is proposed up to the temperatures of 700 to 720 °C and the possibilities of Czech producers during research and development of equipment for these parameters. It contains design of demo unit with turbine for input temperature of 700 °C.

## Паровая турбина и повышение КПД цикла на чешских угольных электростанциях

Статья сопоставляет КПД цикла исходных и реконструированных электростанций в чешской энергетике. В ней описываются решения конструкции и материалов новых паровых турбин „ŠKODA“, которые поставляются на реконструированные электростанции. Следующим шагом к повышению КПД производства электрической энергии на угольных электростанциях является использование сверхкритических параметров пара. Описывается решение конструкции и материалов сверхкритической паровой турбины „ŠKODA“ 660 МВт и дальнейшего оборудования для высоких параметров,

которые находятся в портфеле этого завода-изготовителя. В статье сопоставляется КПД сверхкритического и докритического блоков и влияние перегрева на КПД блока меньшей производительности. Рассматривается взаимная связь температуры и давления пара. В заключение анализируется дальнейшее возможное развитие параметров пара вплоть до температур 700 ÷ 720 °C и возможности чешских заводов-изготовителей по исследованию и разработке оборудования для этих параметров. Рассматривается проект блока - образца с турбиной для температуры на входе 700 °C.