

Inovace parních turbín

Proces inovace parních turbín je v současné době velice aktuální, protože celá řada provozovatelů parních turbín mění svoje výrobní postupy a filosofii podnikání a tím vzniká i nová potřeba elektrické energie a tepla, někdy je také je nutná výroba chladu. Velmi často se modernizuje i zdroj výroby páry, včetně změny palivové základny. To vede ke změně parametrů admisní páry.

Firma EKOL, spol. s r. o. se zaměřuje mimo jiné na realizaci inovací parních turbín a na výrobu nových parních turbín do výkonu 60 MW. Bude představena inovace parní turbíny výkonové třídy 30 MW. Původní turbína byla protitlaková s jedním regulovaným odběrem páry, typového označení PR 32,5 – 9,0/1,0/0,12. Zákazník z Thajska chtěl v 1. etapě tuto turbínu předit na čistě protitlakovou, typ. Označení R 21,5 – 9,0/0,6 a ve 2. etapě na turbínu s vyššími vstupními parametry o výkonu 40 MW typ. Označení R 40 – 11,5/0,6. Jednotlivé inovační kroky představují celou řadu úprav původní konstrukce. V článku budou popsány jednotlivé kroky a budou představeny dosažené výsledky. 2. etapa inovace představuje kompletní změnu průtočného kanálu turbíny, což vedlo k výrobě nového rotoru, nového rotorového i statorového lopatkování. Přitom se podařilo umístit nový rotor do původní skříně.

Výchozí stav představuje parní turbína typového označení PR 32,5 – 9,0/1,0/0,12,

Základní technické parametry turbíny PR 32,5 – 9,0/1,0/0,12 jsou následující:

Vstupní pára

Jmenovitý tlak na rychlozávěrných ventilech turbíny	9,0	MPa
Jmenovitá teplota na rychlozávěrných ventilech turbíny	535	°C

Regulovaný odběr

Jmenovitý tlak	1,0	MPa
Maximální tlak	1,3	MPa
Minimální tlak	0,8	MPa
Maximální průtok páry do odběru	150	t/h

Protitlak

Jmenovitý protitlak	0,12	MPa
Maximální protitlak	0,25	MPa
Minimální protitlak	0,097	MPa

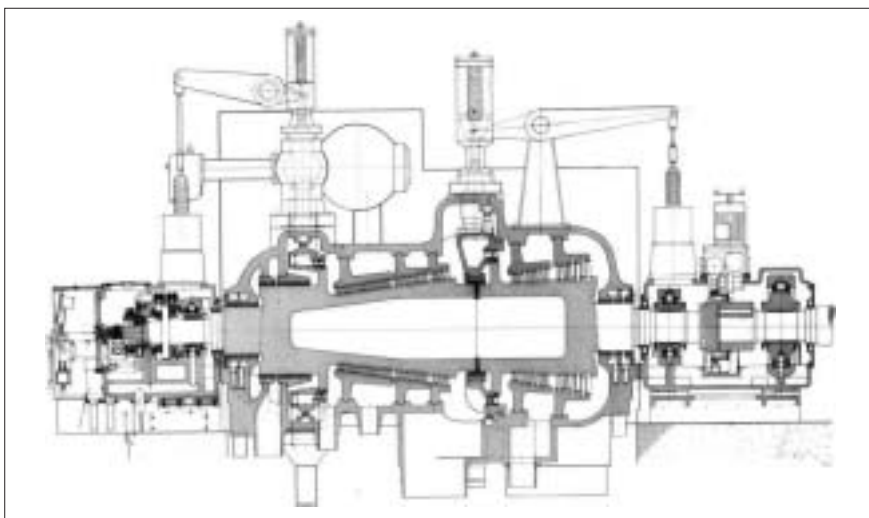
Průtoky páry

Vstupní pára při jmenovitých parametrech	220	t/h
Vstupní pára – maximálně přípustný	230	t/h

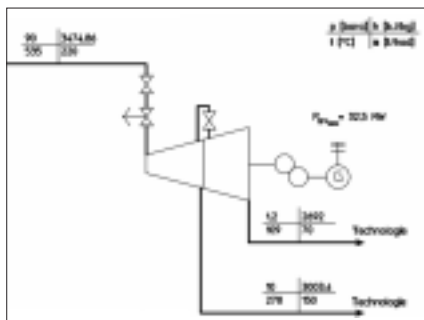
Pára do NT části

Při jmenovitých parametrech	125	t/h
maximálně přípustný	130	t/h
Jmenovitý výkon na svorkách generátoru	32 500	kW
Jmenovité otáčky turbíny	3 000	1/min

jejíž řez je na obr. 1 a zjednodušené schéma na obr. 2.



Obr. 1 - Podélný řez parní turbínou typového označení PR 32,5 – 9,0/1,0/0,12



Obr. 2 - Zjednodušené schéma

CÍLE INOVACE

Provést inovaci parní turbíny PR 32,5 – 9,0/1,0/0,12 ve dvou etapách. V etapě 1 změnit technické parametry a konstrukci turbíny tak, aby vznikla parní turbína protitlaková, typového označení R 22-9,0/1,6 se jmenovitým výkonem 21,5 MW a v etapě 2 změnit technické parametry a konstrukci turbíny tak, aby vznikla parní turbína protitlaková typového označení R41-11,5/0,6 s jmenovitým výkonem 40 MW. Požadavky na zvýšené parametry

admisní páry a zvýšené namáhání všech funkčních částí inovovaných parních turbín řešit už v etapě 1. V etapě 2 provést inovaci průtočné části parní turbíny s cílem zvýšit vnitřní termodynamickou účinnost lopatkování použitím bandážovaných rotorových a statorových lopatek.

Technické parametry a stručný popis inovované parní turbíny podle etapy 1

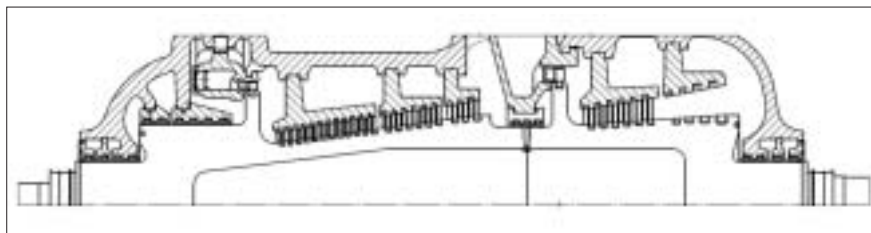
Podélný řez průtočnou částí parní turbíny protitlakové R 22 – 9,0/0,6 je na obr. 3 a zjednodušené tepelné schéma je na obr. 4.

Parní protitlaková turbína R22 – 9,0/0,6 je navržena jako jedno-tělesová vícestupňová turbína s horizontálně dělenou skříní, lopatky jsou uloženy ve čtyřech nosičích. Pátý nosič, který byl součástí původní turbíny, je odstraněn, stejně jako nízkotlakové regulační ventily. Lopatkování je přetlakové, s VT akčním regulačním stupněm. NT akční stupeň pracuje s třemi plně otevřenými dýzovými skupinami. Čtvrtá dýzová skupina je v oblasti difuzoru příslušného regulačního ventilu zaslepená.

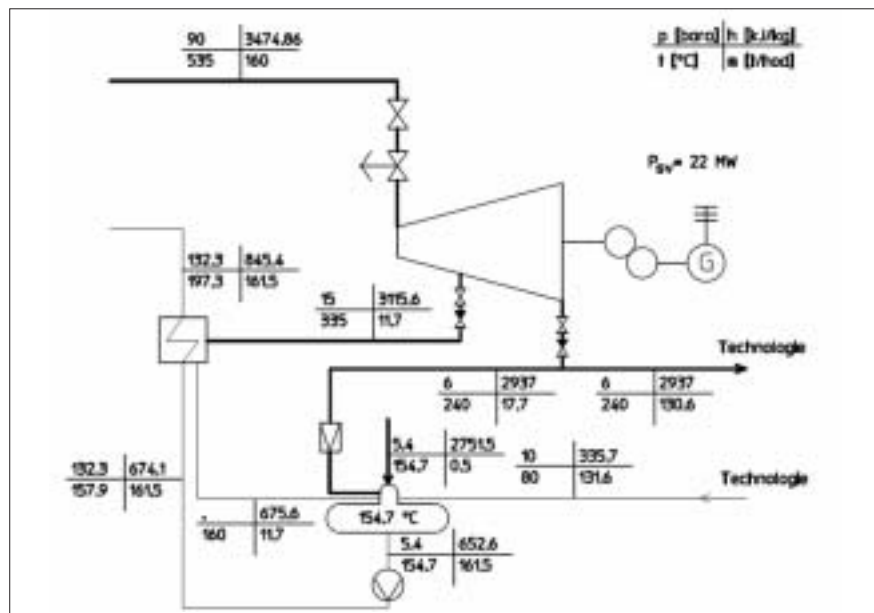
Technické parametry a popis inovované parní turbíny podle etapy 2

Podélný řez průtočnou částí parní turbíny protitlakové R41-11,5/0,6 je na obr. 5, zjednodušené tepelné schéma je na obr. 6.

Parní protitlaková turbína R41-11,5/0,6 je navržena jako jedno-tělesová vícestupňová



Obr. 3 - Podélný řez lopatkováním inovované parní turbíny protitlakové, typ. označení R 22-9,0/0,6, etapa 1



Obr. 4 - Zjednodušené tepelné schéma parní turbíny R 22 - 9,0/0,6

Základní technické parametry inovované parní turbíny R 22-09/0,6 jsou následující:

Jmenovitý tlak na rychlozávěrných ventilech turbíny	9,0	MPa	
Jmenovitá teplota na rychlozávěrných ventilech turbíny	535	°C	
Průtok páry do turbíny	jmenovitý maximální minimální trvalý	160 165 75	t/h
Tlak páry v nereg. odběru	jmenovitý	1,5	MPa
Teplota páry v nereg. odběru	jmenovitá	339	°C
Průtok páry do nereg. odběru	jmenovitý	10,6	t/h
Tlak páry v protitlaku	jmenovitý maximální – trvalý minimální – trvalý	0,6 0,7 0,5	MPa
Teplota páry v protitlaku	jmenovitá maximální maximální bez zatížení za chladičem páry	243 294 400 200	°C
Množství páry do protitlaku	jmenovitě maximální minimální trvalé	138 151,9 73	t/h
Jmenovitý výkon turbíny		21 500	kW
Maximální výkon		22 000	kW
Otáčky turbíny	jmenovitě	3 000	1/min

turbína s horizontálně dělenou skříňí, lopatky jsou uloženy ve třech nosičích. Nízkotlakové regulační ventily jsou odstraněny, otvory do skříňě zaslepeny. NT dýzová skříň je odstraněna. Lopatkování je přetlakové-bandážované, s VT akčním regulačním stupněm.

Celokovaný svařovaný turbinový rotor je uložen v tlakově mazaných radiálních ložiskách. Je vybaven dvoustupňovým odlehčovacím pístem s labyrintovým, bezdotykovým těsněním. Zbytek nevyvážené osové síly od průtoku páry turbínou je zachycen oboustranným axiálním ložiskem

s naklápěcími segmenty. Rotor je dynamicky vyvážen a jeho kritické otáčky jsou dostatečně vzdáleny od otáček provozních. Uložení turbinové skříňě, skořepinového provedení, umožňuje volnou tepelnou dilataci.

Vnější i vnitřní ucpávky jsou labyrintové s odpruženými statorovými kroužky v takovém provedení, které umožňuje relativní posuv turbinové skříňě proti turbínovému rotoru bez vzájemného dotyku těchto komponentů. Spojka mezi turbínou a generátorem je pevná. Spojení turbíny a generátoru je provedeno pomocí spojovacího mezikusu. Proti původnímu turbosoustrojí je použit jiný typ generátoru.

Parní turbína, je vzhledem k vysokým vstupním parametrům a velkému množství vstupní páry, vybavena čtyřmi regulačními difuzorovými ventily. Vstupní ventily tvoří dva bloky. Každý blok je složen z rychlozávěrného ventilu a dvou regulačních ventilů, které jsou umístěny na horní části turbinové skříňě. Dva ventily jsou přímo napojeny na horní části turbinové skříňě a dva jsou s dýzovými skupinami ve spodní části turbinové skříňě spojeny potrubím.

Dýzová skříň, která slouží k rozvedení páry k dýzovým skupinám je zakončena hrdly s pístními kroužky, které těsní vstup páry od regulačních ventilů.

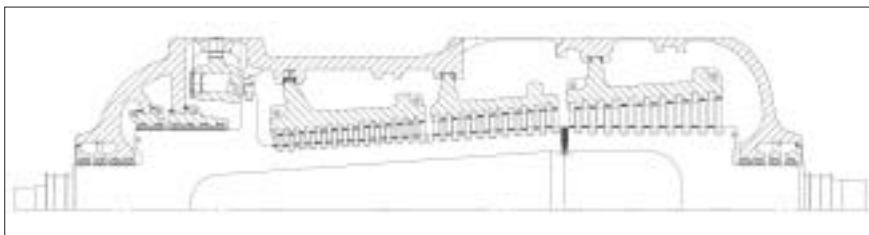
Rychlozávěrné a regulační ventily jsou ovládány hydraulickými servomotory. Jako zdroj pro ovládání servopohonů slouží blok regulačního oleje. Regulační olej má společný okruh s mazacím olejem.

Blok regulačního oleje je umístěn v prostoru vedle hlavní olejové nádrže, má dvě čerpadla, každé na 100 % výkon, filtr regulačního oleje 2 x 100 % s možností přepínání do provozu a olejový akumulátor, který slouží pro překlenutí doby pro záskok čerpadel. Mazací systém je klasické konstrukce.

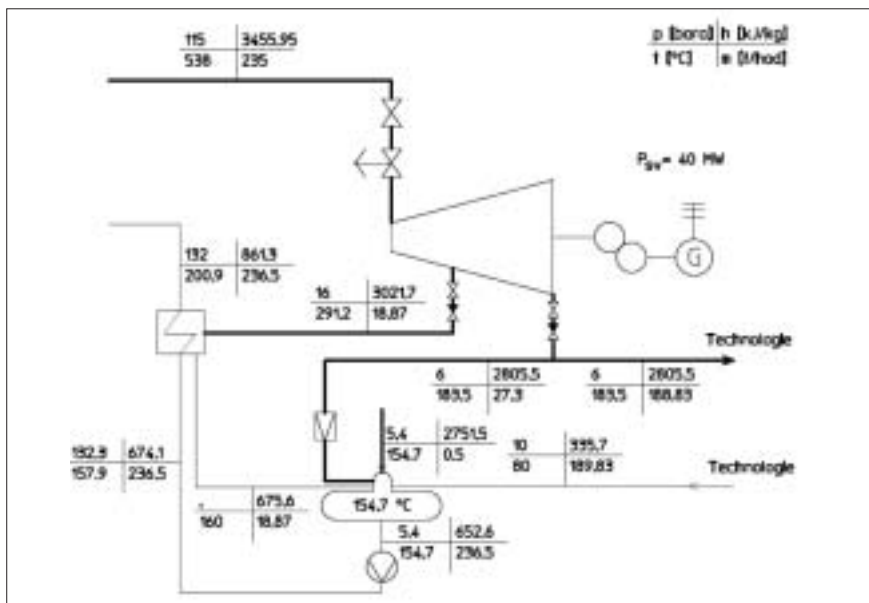
Rozsah inovačních prací pro dosažení parametrů parní turbíny rekonstruované podle etapy 1 a 2

Inovační práce se prováděly současně tak, aby byly splněny parametry obou etap a zahrnovaly následující činnosti:

- Instalace neregulovaného odběru pro napájení vysokotlakého regeneračního ohříváku napájecí vody. Neregulovaný odběr 1,6 MPa byl realizován v místě původního regulovaného odběru 1,0 MPa a požadované zvýšení tlaku v neregulovaném odběru si vyžádalo zaslepení čtvrté dýzové skupiny v prostoru difuzoru čtvrtého regulačního ventilu.
- Zvýšení tlaku v protitlaku z 0,12 MPa na 0,6 MPa si vyžádalo kontrolní pevnostní výpočet skříňě včetně příruby dělicí roviny. U etapy 1 byly



Obr. 5 - Podélný řez lopatkováním inovované parní turbíny protitlakové, typ. označení R41-11,5/0,6, etapa 2



Obr. 6 - Zjednodušené tepelné schéma parní turbíny R41 - 11,5/06

Základní technické parametry inovované parní turbíny dle etapy 2 jsou následující.

Jmenovitý tlak na rychlozávěrných ventilech turbíny	11,5	MPa
Jmenovitá teplota na rychlozávěrných ventilech turbíny	538	°C
Průtok páry do turbíny	jmenovitý	220 t/h
	maximální	235 t/h
	minimální trvalý	75 t/h
Tlak páry v nereg. odběru	jmenovitý	1,61 MPa
Teplota páry v nereg. odběru	jmenovitá	287 °C
Množství páry do nereg. odběru	jmenovitě	16 t/h
Tlak páry v protitlaku	jmenovitý	0,6 MPa
	maximální – trvalý	0,7 MPa
	minimální – trvalý	0,5 MPa
Teplota páry v protitlaku	jmenovitá	186 °C
	maximální	273 °C
	maximální bez zatížení	400 °C
Množství páry do protitlaku	jmenovitě	202,5 t/h
	maximální	216,5 t/h
	minimální	73,5 t/h
Maximální výkon turbíny		40 000 kW
Maximální výkon		41 000 kW
Otáčky turbíny	jmenovitě	3 000 1/min

- odstraněny 4 poslední přetlakové stupně.
- Zvýšené provozní parametry páry pro turbínu si vyžádaly zvýšený tlak za VT regulačním stupněm. Proto jsme provedli termodynamické výpočty lopatkování s cílem optimalizovat tlak za VT regulačním stupněm. Potom byl proveden kontrolní pevnostní výpočet části

- skříňe za regulačním stupněm včetně výpočtu přírub v dělicí rovině. Výsledkem výpočtu je změna materiálu šroubů M110 s maticemi a podložkami.
- Byla pevnostně kontrolována vlastní dýzová komora pro zvýšené parametry vstupní páry ($p_0 = 115$ bara a $t_0 = 538$ °C) pro rekonstrukci turbíny dle

etapy 2. Současně byly nahrazeny původní dýzy v dýzové komoře novými, které splňují požadavky provozu turbíny se zvýšenými parametry páry ($p_0 = 115$ bara a $t_0 = 538$ °C) pro rekonstrukci turbíny dle etapy 2. Zatížení dýzové komory pro obě etapy je na obr. 7. Výsledky výpočtu jsou na obr. 9,10.

- Úpravy částí regulačních ventilů, potrubí, spouštěcích a rychlozávěrných ventilů s ohledem na zvýšené parametry páry na vstupu pro etapu 2.

Speciálně pro etapu 2 byly provedeny následující inovační práce

Skříň turbíny:

- Změna průměru vyrovnávacího pístu nového rotoru si vyžádala nový nosič ucpávkových kroužků vyrovnávacího pístu,
- nové zapojení vyrovnávacího pístu,
- nové nosiče statorových lopatek s novými bandážovanými lopatkami,
- odstranění NT dýzové skříňe.

Rotor turbíny:

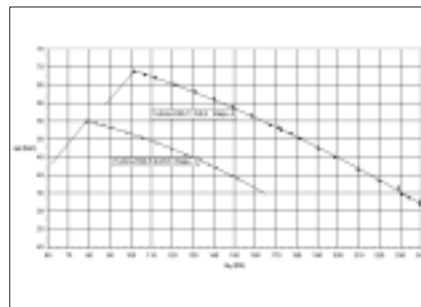
- Nový rotor turbíny s novými bandážovanými lopatkami regulačního stupně i bandážovanými přetlakovými lopatkami viz obr. 8. Kovaný rotor s dutinou je svařen ze dvou dílů. Kritické otáčky rotoru leží nad provozními otáčkami v dostatečném odstupu od nich.

Ložiskový stojan-ložisko:

- Zvětšené zadní radiální ložisko turbíny (umožňuje přenést zvýšený výkon turbíny na generátor) a odpovídající úpravy zadního ložiskového stojanu.

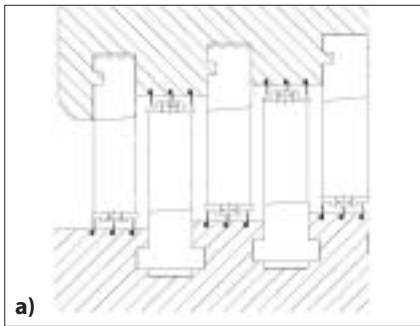
Potrubí:

- Nové potrubí ucpávkové páry vyrovnávacího pístu

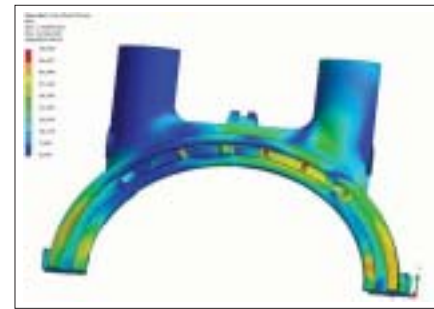
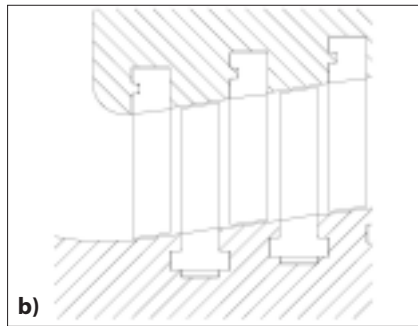
Obr. 7 - Zatížení dýzové komory vnitřní přetlakem Δp pro etapu 1 a etapu 2

Závěr

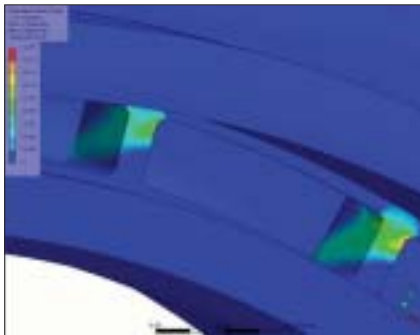
Inovační práce na turbíně PR 32,5-9,0/1,0/0,12 prokázaly možnost rekonstrukce původní turbíny ve dvou etapách podle zadání zákazníka. Přitom při etapě 2 bylo dosaženo maximálního výkonu 41 MW a tento výkon byl realizován ve stejné skříni, jako byla původní turbína i turbína podle etapy 1.



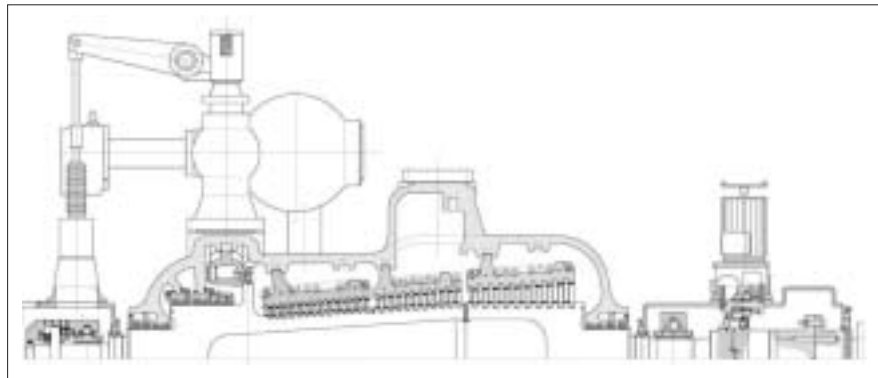
Obr. 8 - Inovace statorového a rotorového lopatkování a) bandážované lopatky, b) volné lopatky



Obr. 9 - Zatížení žeber dýzové komory při výpočtu creepu v oblasti první zatížené dýzové skupiny $\Delta p = 56 \text{ bar}_a$ a $t = 538 \text{ }^\circ\text{C}$



Obr. 10 - Kumulovaná poměrová plastická deformace $\epsilon [\text{mm}/\text{mm}] \cdot 10^{-3}$ při výpočtu creepu v radiu přepážky oddělující zatíženou dýzovou komoru $\Delta p = 56 \text{ bar}_a$ a $t = 538 \text{ }^\circ\text{C}$



Obr. 11 - Podélný řez inovovanou parní turbínou protitlakovou typového označení, R 41-11,5/0,69, etapa 2

Podélný řez turbínou R 41-11,5/0,6 je na obr. 11. Výsledky prokazují, že existují možnosti pro inovaci parních turbin pro nová použití s novými parametry. Tyto technické možnosti spočívají v nových možnostech počítačového modelování napětí a deformací složitých geometrických útvarů, jako jsou skříně, dýzové skříně, nosiče, rotory a jiné části.

LITERATURA:

- [1] Veselý, S.: „Modernizace a rekonstrukce parních turbin provedená firmou EKOL“, AEM, Praha, 2002
- [2] Veselý, S.: „Parní turbíny pro kombinovanou výrobu elektrické energie a tepla“ Teplárenské dny, H. Králové, 2004
- [3] Veselý, S.: „Parní turbíny pro výrobu

el.energie při spalování biomasy a odpadů“, Int. Conf. Brno, 2002

- [4] Veselý, S.: „Utilization of Steam Turbines for Combined Head & Power Generation“ IX. Sc. Conf., Pire 2007

Prof. Ing. Stanislav Veselý, CSc.,
EKOL, spol. s r.o., vesely@ekolbrno.cz

Innovation of steam turbines

The innovation process of steam turbines is nowadays very topical because the range of steam turbine operators is changing their production procedures and business philosophy and thereby the new need of electricity and heat has arisen, sometimes it is even a necessary cold production. Very often even the source of steam production is modernized, including change in fuel basis. This leads to the change of parameters of admissible steam. Innovation works on turbine PR 32.5-9.0/1.0/0.12 showed the possibility of reconstruction of the original turbine in two stages according to the cus-

tomer instruction. As a result, with stage 2 the maximum output of 41 MW was achieved and this output was performed in the same box as with the original turbine as well as turbine according to stage 1. Longitudinal section of turbine R 41-11.5/0.6 is shown on fig. 11. The results show the existing technical possibilities for steam turbine innovations for new usage with new parameters. These technical possibilities lie in the new possibilities of computer modelling of tension and deformations of complex geometrical shapes, such as boxes, jet boxes, carriers, rotors and other parts.

Инновации паровых турбин

Процесс инновации паровых турбин в настоящее время очень актуален, так как целый ряд предпринимателей, использующих паровые турбины, меняют производственные правила и предпринимательскую философию. Таким образом, появляется новая потребность в электрической энергии и тепле, иногда необходимо и производство холода. Очень часто модернизируется и источник производства пара, включая изменение и топливной базы. Это приводит к изменению параметров впускного пара. Инновационные работы на турбине PR 32,5 – 9,0/1,0/0,12 показали возможность реконструкции исходной турбины двумя этапами по заданию заказчика.

Причем на этапе 2 была достигнута максимальная производительность 41 MW, и эта производительность была реализована в таком же цилиндре, каким была исходная турбина и турбина на этапе 1. Продольный разрез турбины R 41 – 11,5/0,6 указан на рисунке 11. Результат показал, что существуют технические возможности инновации паровых турбин для нового использования и с новыми параметрами. Эти технические возможности заключаются в использовании компьютерного моделирования напряжения и деформации сложных геометрических построений, какими являются цилиндры, газовые цилиндры, носители, роторы и другие части.