



CONTROL VALVES FOR TURBINES WITH SUPERCRITICAL PARAMETERS OF STEAM

L. Bednář*, L. Tajč[#]

Summary: *Experimentally investigated pressure pulsation downstream of the control valve cone is presented here. The valve with the mufflers and the flat bottom is compared with the valve of original design. The new type of control valve for the supercritical state of steam is developed. The experience from the operation of valves with the muffler is implicated.*

1. Úvod

Od ventilů se očekává spolehlivá funkce při všech provozních režimech, minimální tlaková ztráta při jmenovitých stavech a minimální tlakové rozrušky, které by mohly vést k destrukci lopatek i potrubního systému. U ventilů pro nadkritické parametry páry je třeba uvažovat i přijatelné požadavky na dimenzování servopohonu a mít vyřešenou otázku materiálů pro vysoké teploty i ochranu pohyblivých částí proti mechanickému poškození. Vyšší vstupní tlaky znamenají i vyšší budící síly. Provedení ventilu do značné míry závisí od způsobu regulace turbíny. Tím je dán i počet ventilů a jejich koncepce. Předložená zpráva se snaží shrnout poznatky z návrhu odlehčených ventilů se zvýšenou provozní spolehlivostí. Vychází se z poznatků o dynamickém namáhání kuželky a tlakových pulsacích. Využívají se zkušenosti ze zprovoznění ventilů s tvarovanou kuželkou v elektrárně Temelín. Jelikož se ve stavbě ventilů uplatňují dvě základní koncepce – ventil s rovným dnem a s tvarovanou kuželkou, je hlavní pozornost zaměřena na rozbor předností a nedostatků obou variant.

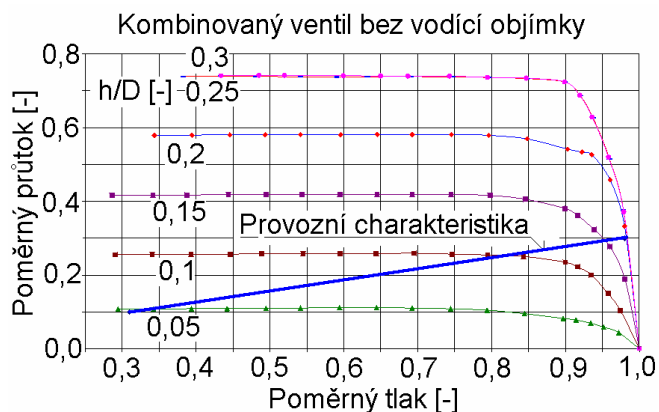
2. Charakter proudění v regulačních orgánech

Proudění páry ventilem je typickým příkladem proudění média dýzou. Hmotnostní tok je dán vstupními parametry, tlakovým poměrem a průtočnou plochou. Ukázka průtokové charakteristiky v bezrozměrných parametrech je uvedena na obr. 1. Hmotnostní tok je vztažen ke kritickému průtoku \dot{m}_{kr} , který závisí jen na vstupním tlaku a teplotě a na ploše hrdla v difuzoru. Proudové poměry na ventilu jsou dány provozem turbíny. Proto je žádoucí, aby pro stavy, které odpovídají provozní charakteristice, byl ventil absolutně spolehlivý a nebyl zdrojem nadměrných tlakových pulsací či vibrací celého regulačního orgánu. Pro tlaky menší,

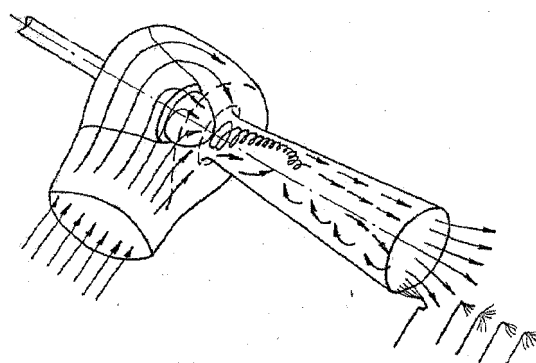
* Ing. Lukáš Bednář: ŠKODA POWER a. s., Tylova 1/57, 316 00 Plzeň; tel.: 378 185 155; fax: 378 185 382; e-mail: lukas.bednar@skoda.cz

[#] Ing. Ladislav Tajč, CSc.: ŠKODA POWER a. s., Tylova 1/57, 316 00 Plzeň; tel.: 378 185 967; fax: 378 185 382; e-mail: ladislav.tajc@skoda.cz

než jaké odpovídají kritickému tlakovému poměru, dochází ke vzniku rázových vln a skokovým změnám tlaku. Při použití tvarované kuželky se vlastně jedná při malých zdvizech o rozšířenou anulární dýzu. Skokové změny tlaku mohou být u této koncepce mnohem výraznější, jelikož se může dosáhnout většího urychlení páry než u kuželky s rovným dnem. Rovné dno stabilizuje místo odtržení proudu a tudíž i rovnoměrnější rozložení tlaku na povrchu kuželky. Rázové vlny od nadzvukového proudění se sice vyskytují u obou případů, ale u tvarované kuželky mohou mít mnohem větší intenzitu. Předností tvarované kuželky však je menší tlaková ztráta při jmenovitém provozu. Tlaková ztráta se však nechá vykompenzovat u ventilu s rovným dnem kuželky úpravou rozměrů ventilu.

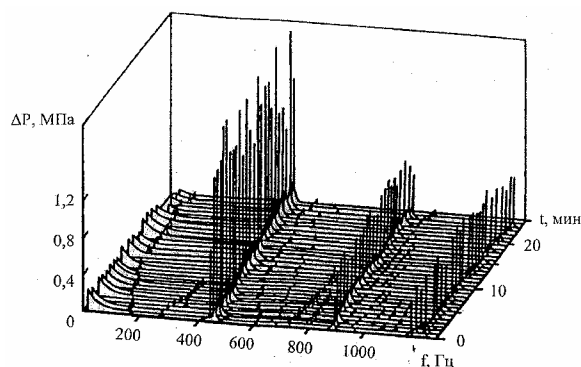


Obr. 1: Průtoková charakteristika ventilu

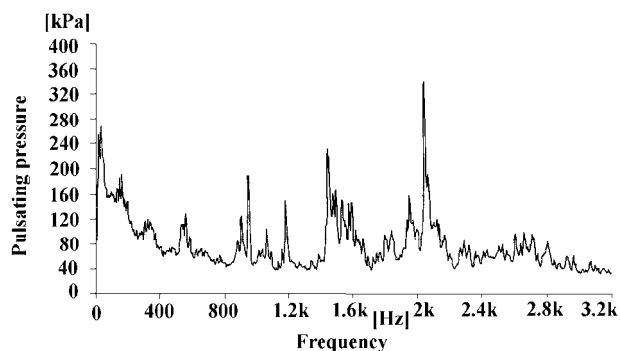


Obr. 2: 3D proudění ve ventilu

Ve ventilu se projevuje složitější 3D charakter proudění. Je to naznačeno na obr. 2. Proudění v kolenu vede ke vzniku dvou vírových struktur, které postupují dále parovodem k lopatkové části turbíny. Při malém zdvihu kuželky se může objevit i odtržení proudu od stěny spolu se zpětným prouděním. Difuzor přestává mít funkci difuzor. Ke zpomalení proudu páry dochází jen v menším rozsahu. Proudění je nestacionární, nestabilní a ovlivněné rázovými vlnami. Tlakové pulsace působí především na stěny difuzoru a potrubí za ventilem. Síto kolem kuželky sice může zrovnoměnit proud v difuzoru, ale jen za cenu jisté tlakové ztráty. Příznivý efekt mají vstupní usměrňovací kanálky, které dají páře určitou vstupní rotaci. Místo dvou vírů vznikne jen jeden, který udržuje proud u stěny difuzoru.



Obr. 3: Tlakové pulsace ventilu s rovným dnem



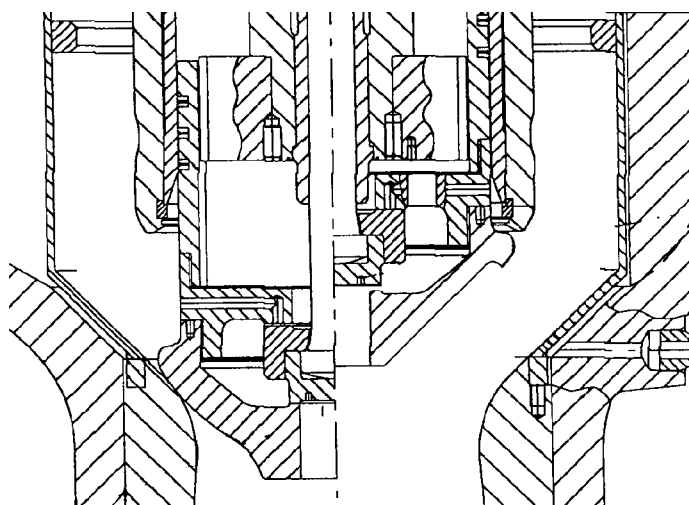
Obr. 4: Tlakové pulsace ventilu s tvarovanou kuželkou při chodu naprázdno

U všech typů ventilů je třeba počítat s transsonickým prouděním. To vede ke vzniku vysokofrekvenčních tlakových pulsací. Měření provedená v Rusku - Костюк, Куменко,

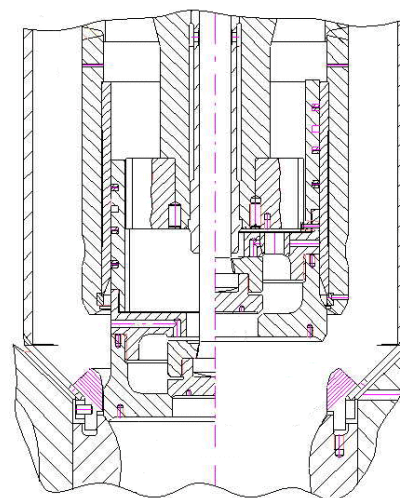
Некрасов, Медведев (2000), na ventilu s plochým dnem kuželky i měření na ventilu s tvarovanou kuželkou v Temelíně - Chmelíček (2001), dokazují, že při malých výkonech turbíny vznikají velmi nebezpečné vysokofrekvenční vibrace. Ukázky z měření na obou typech ventilů se nacházejí na obr. 3 a 4. Čím větší bude vstupní tlak a provoz turbíny v nepříznivých tlakových poměrech, tím větší nebezpečí poškození regulačních orgánů vzniká. Jelikož u moderních turbín se vyžaduje i ostrovní provoz a dlouhodobý provoz na vlastní spotřebu, je třeba uplatnit taková technická řešení, která nebezpečí z vysokofrekvenčních vibrací potlačí.

Úpravy ventilů – zvyšování provozní spolehlivosti

Jisté zkušenosti s tlumením tlakových pulsací se získaly při odstraňování nežádoucích vibrací na ventilu LMZ na turbíně 1000 MW v Temelíně. Jeho provedení je znázorněno na obr. 5. Je zde vyznačena i přechodová úprava s částečným podpíchnutím kuželky, která však nevedla ke změnám nestability proudového pole. Zlepšení se dosáhlo až po aplikaci tlumiče spolu s rovným dnem kuželky. Nový ventil je znázorněn na obr. 6. Tlumič tvoří perforovaný prsten, který obepíná kuželku v blízkosti sedla. Při malých zdvích kuželky, kdy je největší tlakový spád, se pára vede soustavou drobných otvorů (nerozšířených dýz). Rychlostní pole je v celém obvodu rovnoměrné. Vlivem tření v trubicích i na výstupu z tlumiče, skokovou změnu průřezu za tlumičem a interakci jednotlivých proudů, dochází ke zrovnoměnění



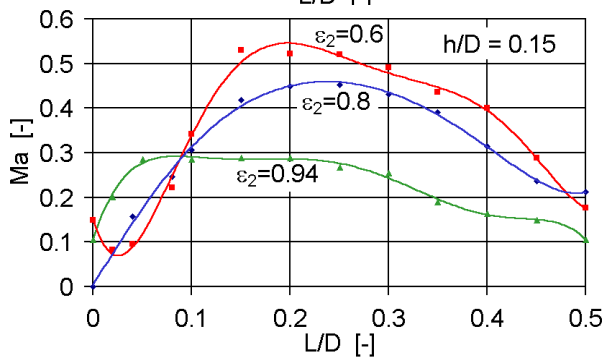
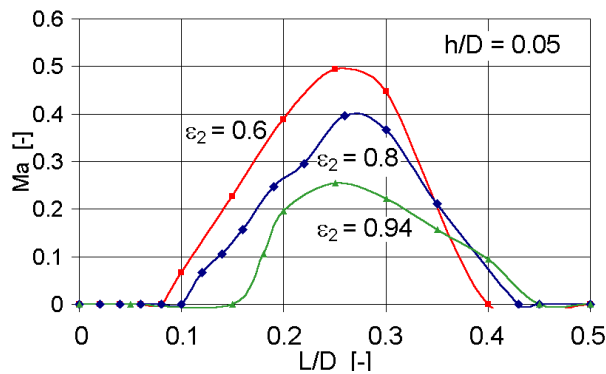
Obr. 5: Původní ventil LMZ a částečná úprava kuželky



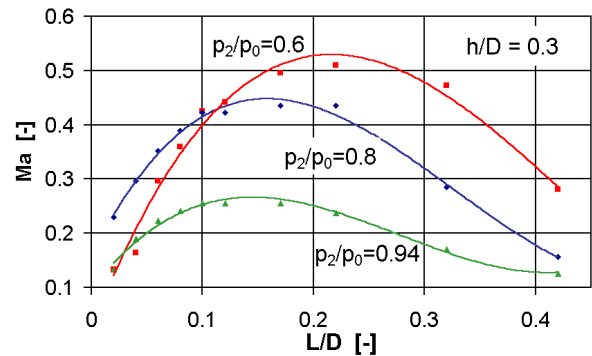
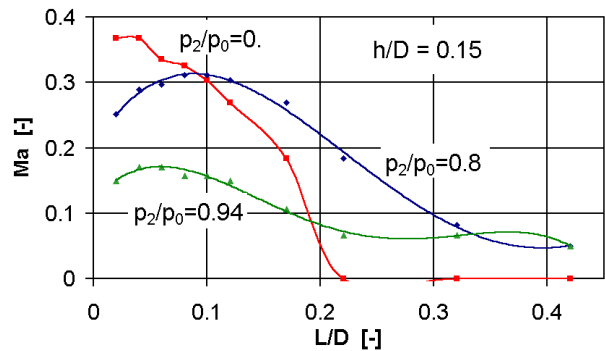
Obr. 6: Nový ventil s tlumičem

rychlosti a k útlumu tlakových rozruchů. Tlumič způsobuje zmenšení hmotnostního toku, které se však nechá kompenzovat pomocí zvětšeného zdvihu. Aplikace tlumiče vede ke změně rychlostního pole v difuzoru pod kuželkou. Je to dobře patrné z traverzování pneumatickou sondou v hrdle difuzoru, které se uskutečnilo na modelu ventilu v laboratoři ŠKODA POWER - Tajč, Bednář, Synáč (2002). Srovnání rychlostních polí původního ventilu a ventilu s dusičem udávají obr. 7 a 8. Srovnávají se případy s odpovídajícím si hmotnostním tokem. U ventilu s tlumičem je proto uplatněn větší zdvih kuželky než je tomu u ventilu bez tlumiče. Tlumič v kombinaci s rovným dnem zaručuje při všech provozních režimech proudění u stěny difuzoru a tím i působení stěny na proud páry. U tvarované kuželky dochází k odtržení proudu od stěny a ke vzniku tlakových rozruchů. Potvrzují to i výpočty modelující

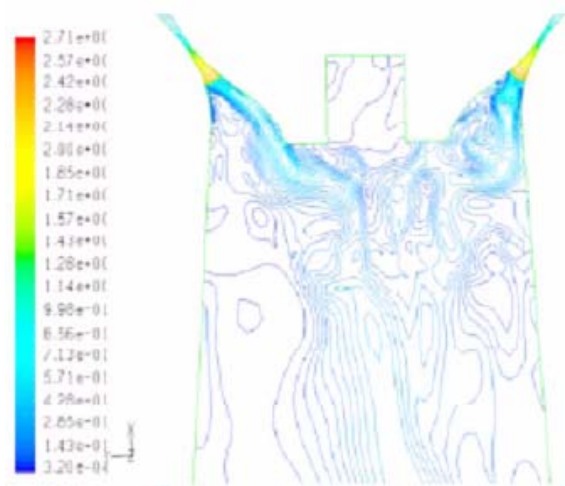
oba konstrukční případy - Tajč, Bednář, Synáč (2002). Ukázky výpočtů se nacházejí na obr. 9 a 10.



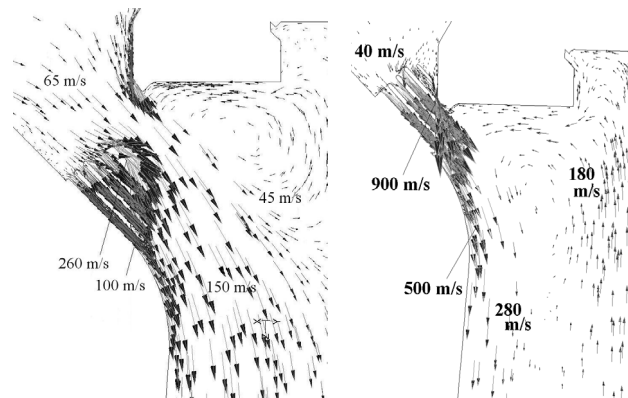
Obr. 7: Rozložení Machových čísel v hrdle difuzoru – původní kuželka



Obr. 8: Rozložení Machových čísel v hrdle difuzoru – ventil s dusičem



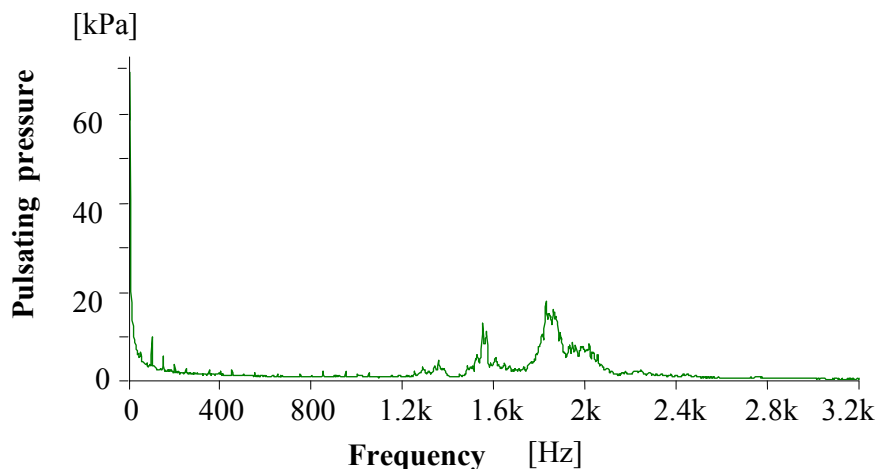
Obr. 9: Rozložení Machových čísel ventilu LMZ



Obr. 10: Vektory rychlosti ventilu s tlumením

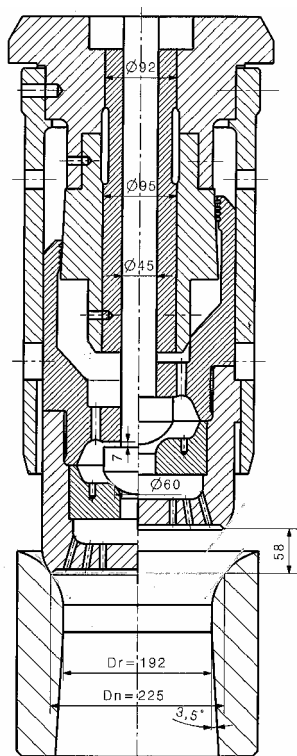
Pomocí tlumiče se podařilo snížit tlakové pulsace v proudě páry pod kuželkou a tím i vibrace potrubí i se servopohonem a ventilem. Měření provedená na elektrárně při chodu naprázdno prokázala snížení tlakových pulsací z hodnoty 360 kPa na 20 kPa. Maximální hodnoty, jak ukazuje frekvenční spektrum na obr. 11, zůstávají v oblasti vysokých frekvencí, ale jejich intenzita již nepředstavuje nebezpečí při provozu turbíny. Spolehlivost provozu

turbíny při všech režimech je v tomto případě důležitější než dosažení maximální účinnosti jen při jmenovitých parametrech.

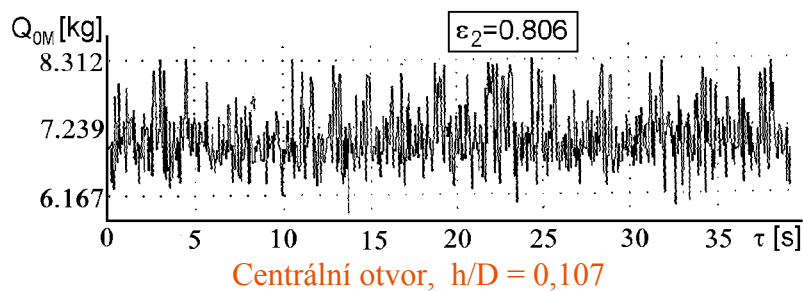


Obr. 11: Tlakové pulsace ventilu s tlumičem

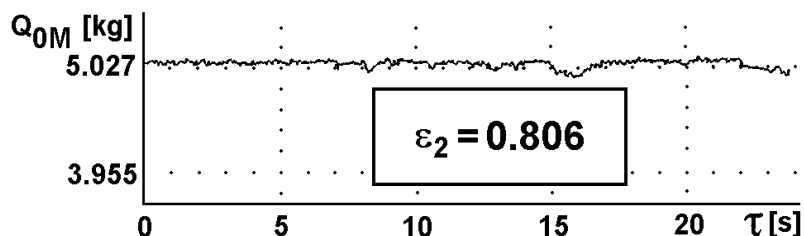
Nabízí se možnost využít při vývoji nového regulačního ventilu pro nadkritické parametry páry řadu poznatků z aplikace tlumiče. Funkci tlumiče může převzít perforovaná kuželka. Rovněž malá kuželka odlehčeného ventilu způsobuje stejné problémy jako velká kuželka. Výtok páry jedním centrálním otvorem se nechá nahradit výtokem přes soustavu velkého počtu dýz malého průměru. Proudové poměry v difuzoru určitě zlepší i zmenšení úhlu rozšíření difuzoru. Výsledkem vývoje je návrh ventilu s perforovanou kuželkou, který je znázorněn na obr. 12.



Obr. 12: Ventil s perforovanou kuželkou



Centrální otvor, $h/D = 0,107$



Stěna s perforací, $h/D = 0,107$

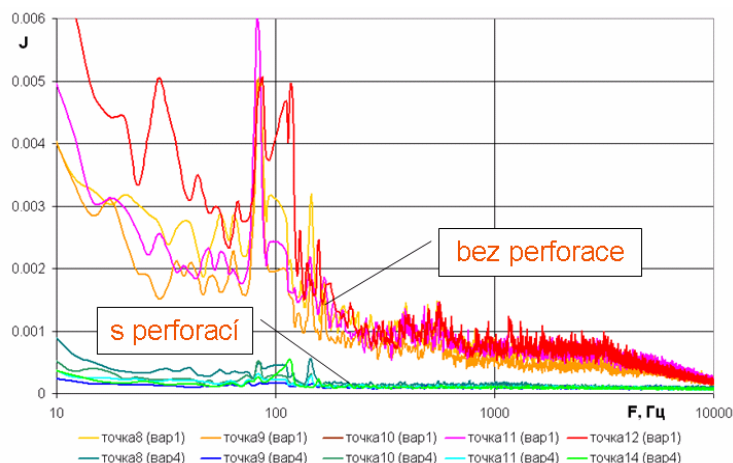
Obr. 13: Oscilogram silového zatížení vřetene

Jen přes odlehčovací ventil by měla proudit pára až do 20 % výkonu turbíny. Pak se začne zvedat velká kuželka. Rovné dno společně s výtokem páry z trysek ve dně kuželky zaručí přilnutí proudu páry ke stěně difuzoru i interakci proudu páry z trysek a hlavního proudu. Dosáhne se lepšího zaplnění celého prostoru v difuzoru pod kuželkou i tlumení tlakových pulsací v tomto prostoru. Oddělení vřetena od kuželky umožňuje přenášet na vřeteno jen tahové namáhání. Případné ohybové síly se zachytí masivní objímkou, která slouží k vedení kuželky. Po překročení 50 % výkonu turbíny se odlehčený ventil převede na režim neodlehčeného ventilu. Tím se upraví tlakové poměry na částech ventilu a zaručí se přetlak k případnému uzavření ventilu. Při jmenovitých provozních stavech slouží otvory v kuželce a vnitřní komora k vyrovnávání tlaku i k případnému tlumení tlakových rozruchů. Pod kuželkou by mělo být při všech režimech jen podzvukové proudění.

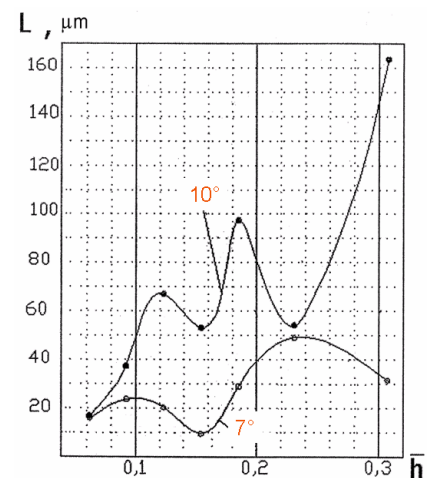
Jak ukázaly experimenty provedené v MEI - Зарянкин А. Е. (2004), odstranění centrálního otvoru ve ventilu mělo příznivý účinek na silové namáhání vřetena. Oscilogram silového namáhání vřetena je uveden na obr. 13. Perforovaná kuželka přispívá ke zdatnému utlumení flukтуаčních složek tahové síly. Příklad udává srovnání pro stejný tlakový poměr $\varepsilon = p_2 / p_0$ a poměrný zdvih $\bar{h} = h / D$. Obdobné výsledky se získaly i pro jiné provozní stavy.

Tlakové pulsace pod kuželkou se zjišťovaly optickou metodou v CKTI St' Petersburg - Фельдберг (2005). I v tomto případě se potvrdil příznivý vliv perforace kuželky. Srovnání tlakových pulsací u obou provedení ventilu se nachází na obr. 14. Měření se provádělo při stejných provozních stavech v různých místech pod kuželkou. Aerodynamické buzení má širokou škálu frekvencí. Špičky v okolí frekvence 100 Hz odpovídají vlastním frekvencím systému.

Další zvýšení spolehlivosti regulačních ventilů přináší zmenšení vrcholového úhlu výstupního difuzoru. Po zmenšení rozšíření difuzoru z 10 na 7 stupňů se podařilo snížit vibrace tělesa v celém rozsahu zdvihu kuželky. Maximální hodnoty výchylek obou případů jsou vedeny na obr. 15. Ukazuje se podle měření MEI - Зарянкин, Симонов (2005), Готовцев, Зарянкин, Парамонов (2005), že podobný efekt platí jak pro tvarovanou kuželku, tak i pro kuželku s rovným dnem.



Obr. 14: Spektrum tlakových pulsací s perforací a bez perforace kuželky



Obr. 15: Vliv otevření difuzoru na vibrace tělesa ventilu

Rovněž nízkofrekvenční vibrace mohou ventil poškodit. Jedná se zejména o případy, kdy vlastní frekvence nebo jejich vyšší harmonické složky souhlasí s frekvencí 50 Hz nebo 100 Hz. Jde o mechanické buzení a o provoz v rezonanci. Vůbec nezáleží, zda se jedná o ventil s rovným dnem kuželky nebo o ventil s tvarovanou kuželkou. Aerodynamické síly nejsou hlavním zdrojem nízkofrekvenčních vibrací.

3. Závěry

- Regulační ventily jsou zdrojem tlakových pulsací. Při transsonickém proudění mohou pulsace poškodit ventil i lopatky parních turbín.
- Pomocí tlumiče se nechají výrazně potlačit tlakové rozruchy na ventilu. Tlumič je však zdrojem přídavné tlakové ztráty, která se uplatňuje i při podzvukovém proudění ve ventilu.
- Ventily s perforovanou kuželkou mohou pracovat jako ventily s tlumičem při transsonickém proudění a jako ventily bez tlumiče při podzvukovém proudění.
- U odlehčených ventilů je vhodné nahradit jeden střední otvor sadou většího počtu malých otvorů a rozevření difuzoru nemít větší než 7 stupňů.

4. Poděkování

Autoři příspěvku děkují MPO České republiky za finanční podporu grantu FT-TA2/037.

5. Použitá literatura

- Фельдберг Л. А. (2005) *Исследование аэродинамических характеристик разгруженного регулирующего клапана на оптическом стенде*, отчет ЦКТИ
- Готовцев А. М., Зарянкин А. Е., Арианов С. В., Парамонов А. Н. (2005) *Сравнительная оценка вибрационного состояния регулирующих клапанов установленных на турбинах К-200-12,8 ЛМЗ*, Теплоэнергетика, №12, с. 59 – 66
- Chmelíček M. (2001) *Мěření vibrací na ventilech a převáděcích parovodech RZV 1000 MW*, *Technická zpráva ŠKODA VÝZKUM*, VYZ 56/4/2001
- Костюк А. Г., Куменко А. И., Некрасов А. П., Медведев С. В. (2000) *Экспериментальный анализ пульсаций давления в пароподводящих турбоагрегатах*, Теплоэнергетика 2000, №6, с. 50 - 57
- Tajč L., Bednář L., Synáč J. (2002) *Regulační ventily pro turbínu 1000 MW*, *Výzkumná zpráva ŠKODA ENERGO*, VZTP 0923
- Зарянкин А. Е. (2004) *Разработка и исследование неразгруженного и разгруженного регулирующего клапанов для турбин сверхкритических параметров пара*, Отчет МЭИ
- Зарянкин А. Е., Симонов В. М. (2005) *Регулирующие и стопорнорегулирующие клапаны паровых турбин*, Москва, Издательство МЭИ