Ing. Karel MATĚJÍČEK
Inženýrská činnost provozů TZB

Rotační regenerační výměníky pro zpětné získávání tepla Část 8: Praktické zkušenosti z návrhu a provozu výměníků

Rotary Regenerative Heat Exchangers for Heat Recovery Part 8: Practical Experience with the Design and Operation of Heat Exchangers

Recenzent
doc. Ing. Vladimír Zmrhal, Ph.D.

Článek prezentuje praktické zkušenosti z návrhu a provozu rotačních regeneračních výměníků používaných ve vzduchotechnických systémech ke zpětnému získávání tepla, případně vlhkosti. Autor upozorňuje na časté provozní problémy a nesprávnou funkci těchto zařízení, které mnohdy pramení z chyb, vznikajících již při tvorbě projektové dokumentace.
Klíčová slova: *rotační regenerační výměník, těsnost, proplachovací komora, regulace, údržba*

The paper presents practical experience with the design and operation of rotary regenerative heat exchangers used in air handling systems for heat and, in some cases, moisture recovery. The author highlights common operational problems and malfunctions of these devices, which often originate from errors made during the design and preparation of project documentation.
Keywords: *rotary regenerative heat exchanger, air tightness, purge sector, control, maintenance*

ÚVOD

Stále častěji jsou ve vzduchotechnických systémech pro zpětné získávání tepla (ZZT) navrhovány a provozovány rotační regenerační výměníky (RRV), které slouží k přenosu tepla, případně i vlhkosti, mezi odváděným a přiváděným venkovním vzduchem. Na první pohled se může zdát, že jejich funkce je relativně jednoduchá, ovšem opak je často pravdou.

V praxi se lze setkat s případy, kdy rotační regenerační výměníky neplní řádně svou funkci, přičemž příčina těchto problémů často vzniká již ve fázi projektového návrhu. Příspěvek je zaměřen na vliv umístění rotoru výměníku ve vzduchotechnické jednotce, vliv proplachovací komory na vzduchotěsnost v dělicí rovině rotoru, která má přímý dopad na přenášený výkon a míru znehodnocení přiváděného venkovního vzduchu vzduchem odváděným. Pozornost je věnována vlivu použitého materiálu na přenos vlhkosti a dále regulaci výkonu změnou otáček rotoru, zapojením rotačního výměníku do systému měření a regulace (MaR), včetně ochrany rotoru proti destrukci. V závěru jsou zmíněny požadavky na obsluhu a údržbu.

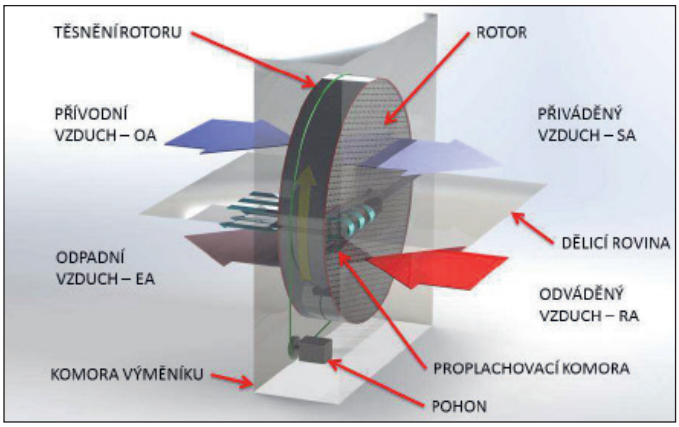
Příspěvek se zaměřuje na klíčové aspekty ovlivňující výkon a účinnost rotačních regeneračních výměníků a míru znečištění přiváděného vzduchu vzduchem odváděným. Jde zejména o následující body návrhu:
- ❑ vliv umístění rotoru vzhledem k umístění přívodního a odvodního ventilátoru,
- ❑ funkce proplachovací komory, kdy je vhodné ji navrhovat a kdy nikoliv,
- ❑ vliv použitého materiálu teplosměnné plochy rotoru na přenos vlhkosti,
- ❑ vliv otáček rotoru na přenášený výkon,
- ❑ integrace regeneračních výměníků do systémů MaR,
- ❑ údržba a čištění rotoru.

Text si klade za cíl poukázat na složitost správného návrhu a umístění RRV, ačkoliv se jejich princip může zdát na první pohled velmi jednoduchý.

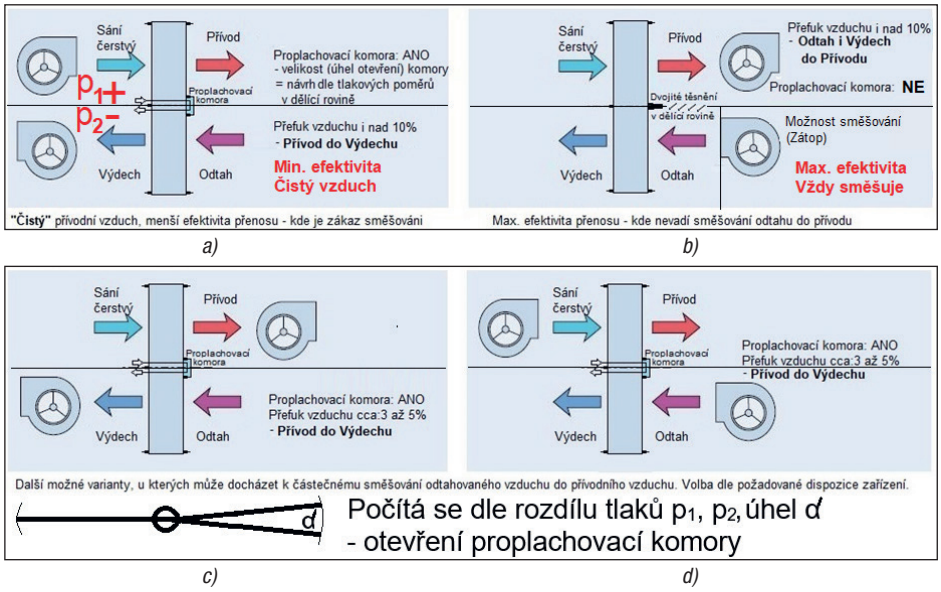
ROTAČNÍ REGENERAČNÍ VÝMĚNÍK VE VZDUCHOTECHNICKÉ JEDNOTCE

Pro další popis systému rotačních výměníků je zvolena pozice rotoru, kdy venkovní přiváděný vzduch je nasáván v horní části vzduchotechnické (VZT) jednotky a odváděný vzduch je veden ve spodní části jednotky.

Teplotní rotor je ve většině případů tvořen návinem hliníkové fólie a slouží primárně k přenosu tepelné energie (za určitých podmínek dochází i k částečnému přenosu vlhkosti). V zimním období zvyšuje teplotu a vlhkost přiváděného vzduchu přenosem z odváděného vzduchu, v letním období snižuje teplotu a vlhkost přiváděného vzduchu. Pro současný přenos tepla a vlhkosti je využíván hygroskopický rotor. Ve většině případů se používá hliníková fólie opatřená hygroskopickou vrstvou (např. zeolit), která umožňuje přenos vlhkosti, a to s vlhkostním faktorem až 90 % [3]. Vrstva zeolitu může být nanesena pouze na určitou část povrchu hliníkové fólie, a to z jedné nebo z obou stran, případně na celém povrchu obou hliníkových fólií, a to z obou stran. Instalace rotačního výměníku se provádí zpravidla v protiproudém zapojení.



Obr. 1 Schéma rotačního výměníku ve VZT jednotce
Fig. 1 Schematic diagram of a rotary heat exchanger in an air handling unit



Obr. 2 Možnosti umístění ventilátorů v sestavách VZT jednotek s rotačním výměníkem

Fig. 2 Fan arrangement options in air handling units equipped with a rotary heat exchanger

Vliv umístění rotoru výměníku vzhledem k umístění přívodního a odvodního ventilátoru

Poloha rotoru ve VZT jednotce má zásadní vliv na efektivitu přenosu energie a na druhé straně na míru znehodnocení přiváděného vzduchu vzduchem odváděným.

Pozice ventilátorů vůči rotoru výměníku ve VZT jednotce se volí podle toho, co je při návrhu jednotky prioritní. Zda je nutné přenést co největší výkon, nebo je podstatná „čistota“ přiváděného vzduchu bez směšování s oběhovým vzduchem.

Krajní varianty jsou následující:

- Max. využití odpadního tepla, s trvalou minimální cirkulací odváděného vzduchu netěsnostmi (cca 10 %, někdy i více) do přiváděného venkovního vzduchu: Přívodní ventilátor je umístěn za rotorem, odvodní ventilátor před rotorem ve směru proudění vzduchu (obr. 2b). V této sestavě je možné využít i oběhový vzduch (směšovací komoru mezi odvodní a přívodní sekcí jednotky) a maximalizovat tak účinnost výměníku. Přes rotor pak proudí menší než výpočtové množství venkovního vzduchu a účinnost výměníku se tak zvyšuje.
- Požadavek na čistotu přiváděného vzduchu – min. efektivita celé sestavy: Přívodní ventilátor umístěný před rotorem vytváří v dělicí rovině přetlak, odvodní ventilátor za rotorem ve směru proudění vzduchu vytváří v dělicí rovině podtlak (obr. 2a). U této sestavy dochází vlivem netěsností k převodu čerstvého venkovního vzduchu, částečně již upraveného, do vzduchu odvodního. Zaručí se tak čistota přiváděného vzduchu na úkor mírného snížení účinnosti přenosu tepla.

V odůvodněných případech je možné použít i méně časté varianty konfigurace jako kompromis těchto dvou krajních variant – viz obr. 2c a 2d.

V každém projektu by mělo být ve specifikaci VZT jednotky s rotačním výměníkem uvedeno, zda má být v místě dělicí roviny nainstalována proplachovací komora nebo těsnicí lišta, a to na základě tlakových poměrů v jednotce. Pokud je zde umístěna proplachovací komora, je potřeba na základě rozdílu tlaků provést výpočet úhlu otevření komory dle podkladů výrobce tak, aby došlo k ideálnímu propláchnutí kanálků rotoru bez nadměrných ztrát.

Funkce proplachovací komory (kde má být a kde být nesmí)

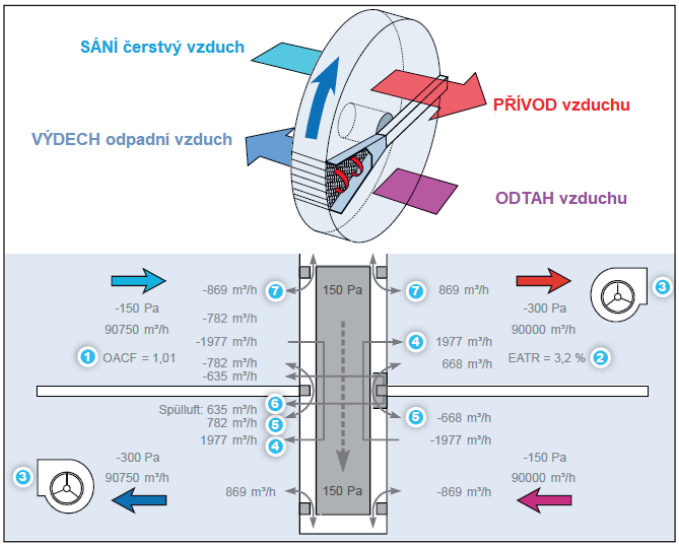
V závislosti na poloze přívodního a odvodního ventilátoru vůči rotačnímu výměníku a na tlakových poměrech v dělicí rovině rotoru je nutné v této rovině navrhnout buď **proplachovací komoru**, nebo **dvojité radiální těsnění**, aby se zabránilo nežádoucímu převodu vzduchu mezi odváděným a přiváděným vzduchem. Nesprávná volba může vést nejen ke snížení přenášeného výkonu, ale i ke znehodnocení přiváděného vzduchu vzduchem odváděným.

Požadavek na instalaci proplachovací komory

Při přetlaku mezi komorou přiváděného vzduchu (+) vzhledem ke komoře odvodní (-) (obvykle Dp > 100 až 150 Pa) se instaluje **proplachovací komora**, s různým úhlem otevření komory dle velikosti přetlaku. To je nutno stanovit a navrhovat v zadání dle podkladů výrobce rotačních výměníků.

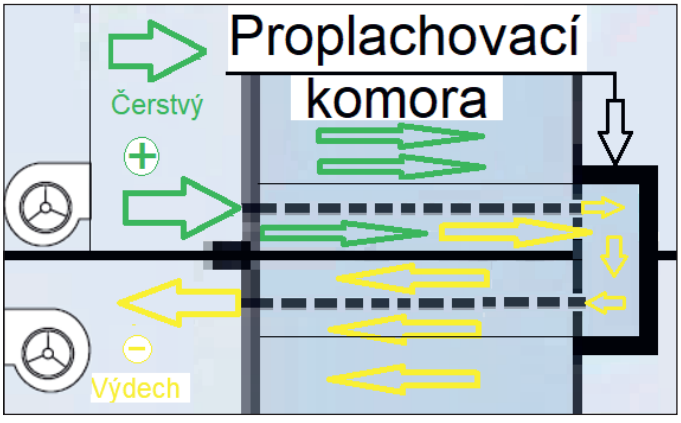
Požadavek na instalaci dvojitého radiálního těsnění

Při přetlaku mezi odvodní komorou (+) vzhledem k přívodní komoře (–) se musí v dělicí rovině **instalovat dvojité radiální těsnění** pro zajištění maximální těsnosti v rovině rotoru.



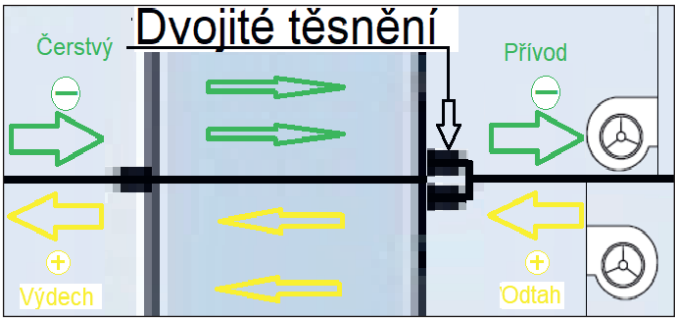
Obr. 3 Příklad netěsností u rotačního výměníku s přívodním i odvodním ventilátorem umístěným za rotorem

Fig. 3 Example of leakage in a rotary heat exchanger with both the supply and extract fans located downstream of the rotor



Obr. 4 Proplachovací komora v dělicí rovině při přetlaku v přívodní komoře

Fig. 4 Purge sector in the partition plane with positive pressure in the supply-air chamber



Obr. 5 Dvojité radiální těsnění v dělicí rovině při přetlaku v odvodní komoře vůči přívodu

Fig. 5 Double radial seal in the partition plane with positive pressure in the extract-air chamber relative to the supply-air chamber

Důsledky chybné instalace proplachovací komory

Pokud je v rovině rotoru v odvodní komoře přetlak větší než v komoře přívodní, zapříčiní případná instalace proplachovací komory namísto radiálního těsnění, že se znehodnocený odváděný vzduch přisává přes proplachovací komoru do přiváděného venkovního vzduchu.

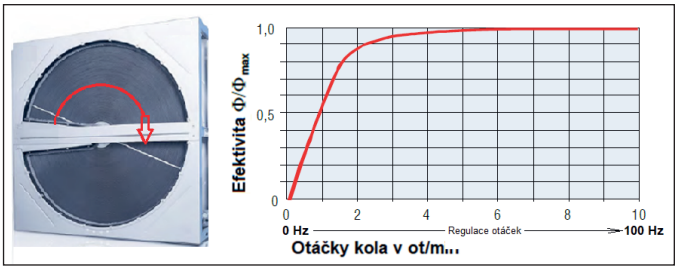
Vliv použitého materiálu teplosměnné plochy rotoru na přenos vlhkosti

Rotační regenerační výměník nepřenáší pouze teplo, ale v některých případech také vlhkost ve formě vodní páry. Díky hygroskopickým vlastnostem povrchu rotoru je umožněn přenos vlhkosti mezi odváděným a přiváděným vzduchem. Jde tedy o současný přenos citelného a latentního tepla (někdy se tyto výměníky nazývají jako entalpické). I v případě, že rotor není cíleně vyroben z hygroskopického materiálu, dochází za určitých podmínek k přenosu vlhkosti. Pokud je však požadována konkrétní úroveň přenosu vlhkosti (vlhkostní faktor), musí být tento požadavek výslovně uveden v zadání pro výrobu jednotky, v požadavkové části. Obvykle se specifikuje, na kolik ploch hliníkové fólie bude nanesena hygroskopická sorpční vrstva (nejčastěji na bázi zeolitu), která umožňuje adsorpci a následnou desorpci vodní páry během otáčení rotoru. Výrobci rotačních výměníku nabízejí různé možnosti nanášení adsorpční vrstvy na různé plochy rovného nebo rádlovaného plechu z jedné nebo z obou stran.

Vliv otáček rotoru výměníku na přenesený výkon

Nejčastější způsob regulace výkonu rotačního výměníku je regulací otáček rotoru. Tato závislost je značně nelineární [4], viz obr. 6.

Doporučované max. otáčky rotoru jsou cca 10 ot/min. Zvyšování otáček rotoru nad cca 10 ot/min nemá z technického hlediska opodstatnění (na trhu jsou běžně dostupné výměníky, které umožňují otáčení rotoru v rozsahu 0 až 18 ot/min – pozn. recenzenta). Jak je patrné z grafické závislosti tohoto doporučení zobrazené na obr. 6, pro přenos energie jsou rozhodující otáčky rotačního rotoru přibližně do 50 % rozsahu regulace. Nejčastějším problémem v praxi je, že regulace otáček rotoru končí na minimálních hodnotách 1 až 1,5 ot/min. To má v extrémních



Obr. 6 Závislost účinnosti přenosu tepla na otáčkách rotoru

Fig. 6 Heat transfer effectiveness as a function of rotor speed

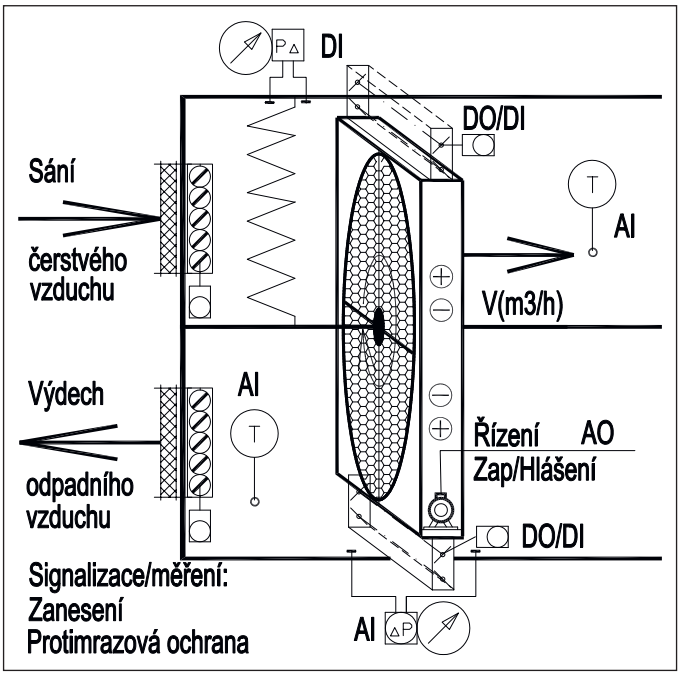
podmínkách za následek, že při zastavení rotoru při těchto otáčkách dojde k bezdůvodnému otevření ventilu ohřívače a aktivaci protimrazové ochrany. Chybějící výkon rotačního výměníku v nízkých otáčkách musí být nahrazen výkonem ohřívače. Otáčky rotoru je proto vhodné regulovat v rozsahu přibližně 0,25 až 10 ot/min. Renomovaní výrobci tento požadavek často řeší nastavením maximálních otáček rotoru při výchozí frekvenci elektromotoru přibližně 100 Hz, případně použitím elektromotorů umožňujících plynulou regulaci otáček až k téměř nulovým hodnotám. Tím se rozšíří a zjemní regulační schopnost výměníku v celém rozsahu otáčení rotoru.

Integrace rotačních výměníků do systémů MaR, včetně ochranných mechanismů zabraňujících destrukci rotoru

Zapojení rotačních výměníků do systému měření a regulace musí zajistit regulaci jeho výkonu, signalizaci a hlášení stavu provozu, protimrazovou ochranu a ochranu proti axiálnímu přetížení rotoru náporem proudícího vzduchu.

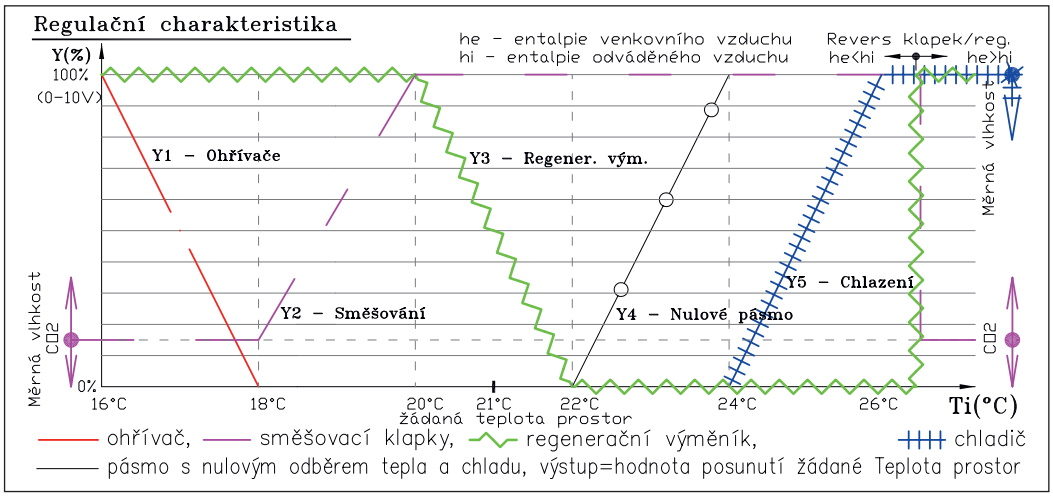
Regulace výkonu rotačního regeneračního výměníku v sestavě VZT jednotky (obr. 7) vychází z předpokladu, že je vždy žádoucí zajistit maximální podíl čerstvého vzduchu při minimálním požadavku na dodávku energie. Spotřeba elektromotoru zajišťujícího otáčky rotoru je přitom ve srovnání s přeneseným výkonem zanedbatelná. V zimním období je proto výměník uváděn do provozu jako první a vypínán jako poslední při požadavku na dodávku energie. V letním období je výměník uveden do provozu na 100 % výkonu vždy, pokud má odváděný vzduch nižší entalpii (případně teplotu) než nasávaný venkovní vzduch. Uvedený princip je patrný z regulační charakteristiky VZT jednotky (obr. 8) vybavené ohřívačem, chladičem, rotačním regeneračním výměníkem a směšovací komorou, pracující s nulovým pásmem dodávky energie. Výstupem této regulační sekvence jsou požadované výstupní signály pro jednotlivé segmenty VZT jednotky, v závislosti na teplotě vnitřního vzduchu v klimatizovaném prostoru.

Ochrana rotoru výměníku proti destrukci spočívá v kontrole tlakové ztráty rotoru (ideálně analogový signál AI měří rozdíl tlaků) v komoře odváděného vzduchu. Tato tlaková ztráta nesmí překročit hodnoty udávané výrobcem, přičemž každý výrobce stanovuje maximální přípustné tlakové poměry



Obr. 7 Připojení rotačního výměníku do systému měření a regulace

Fig. 7 Integration of the rotary heat exchanger into the measurement and control system

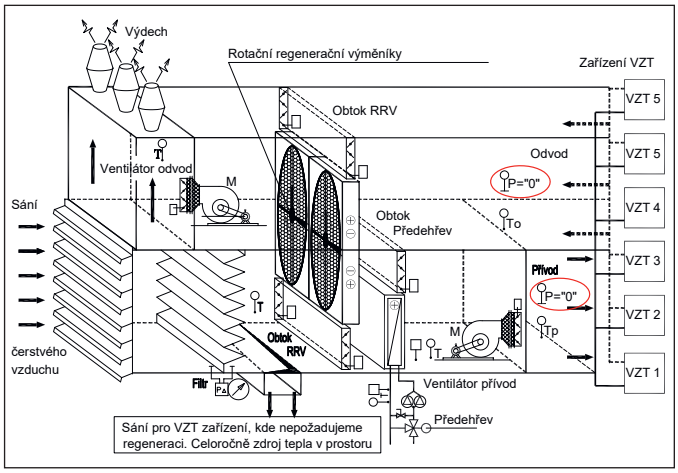


Obr. 8 Regulační charakteristika VZT jednotky s rotačním regeneračním výměníkem

Fig. 8 Control characteristic of an air handling unit equipped with a rotary regenerative heat exchanger

Rotační regenerační výměníky lze instalovat buď do jednotlivých vzduchotechnických sestav VZT jednotek, nebo do centrálních systémů úpravy vzduchu. Ve většině případů je z energetického hlediska výhodnější instalace rotačních regeneračních výměníků v rámci centrální úpravy vzduchu, kde lze efektivně využít rozdílné vzduchové a tepelné bilance jednotlivých provozů. U zařízení, u nichž není nutné předehřívání venkovního vzduchu (např pro prostory s celoročními zdroji tepla – serverovny), je vhodné čerstvý vzduch nasávat před rotorem, zatímco teplý odváděný vzduch je do rotoru přiváděn. Ostatní vzduchotechnická zařízení mohou využívat energii od zařízení s vyššími tepelnými zisky prostřednictvím centrálního rotačního výměníku. Dále je uveden příklad instalace rotačního regeneračního výměníku v systému centrálního předehřevu České televize (obr. 9).

na rotoru. Mezi hlavní příčiny zvýšení tlakové ztráty rotoru při dodržení požadovaného průtoku vzduchu patří zanesení komůrek nečistotami a namrzání vodní páry v kanálcích rotoru. Namrzání vodní páry má dva zásadní dopady. Jednak se zvyšuje tlaková ztráta, jednak může vlivem objemových změn ledu docházet k mechanické destrukci dutinek rotoru. Nastavení snímače tlakového rozdílu se doporučuje na hodnotu přibližně o 100 Pa vyšší, než je deklarovaná provozní tlaková ztráta rotoru, avšak nikdy nesmí překročit maximální povolenou hodnotu tlakové ztráty rotoru udávanou výrobcem. Při vyhlášení signalizace překročení tlakové ztráty rotoru je nutné bezodkladně určit příčinu tohoto stavu, tj. zda jde o zanesení rotoru nečistotami, nebo o namrzání vlhkosti. V případě zanesení rotoru je nutné zařízení okamžitě odstavit z provozu a rotor mechanicky vyčistit (viz dále). Pokud je nasáván venkovní vzduch o nízké podnulové teplotě, je pravděpodobnou příčinou signalizace namrzání vodní páry v kanálcích rotoru. Na tuto situaci musí systém MaR okamžitě reagovat snížením průtoku chladného venkovního vzduchu při maximálních otáčkách rotoru (v tomto stavu je požadován maximální výkon výměníku a minimální průtok nasávaného venkovního vzduchu). To lze realizovat buď snížením otáček přívodního ventilátoru, nebo otevřením obtoku rotačního výměníku na straně přiváděného vzduchu. Zejména u větších zařízení se doporučuje a je energeticky vhodné obtok rotoru instalovat. Snížením průtoku chladného přiváděného vzduchu, při současném zachování průtoku odváděného vzduchu, dojde k odtání namrzlé vodní páry a obnovení standardních provozních podmínek výměníku.



Obr. 9 Příklad instalace rotačních výměníků v systému centrálního předehřevu v České televizi

Fig. 9 Example of a rotary heat exchanger installation in the central preheating system at Czech Television

Údržba, čištění rotoru

Z pohledu údržby je nutné minimálně dvakrát ročně (před zimním a letním období) provádět:

- ❑ kontrolu klidného chodu rotoru a ložisek (bez vibrací a házení),
- ❑ kontrolu a seřízení vůlí mezi rotorem a těsnicími lištami po obvodu i v dělicí rovině,
- ❑ pravidelné čištění rotoru dle provozních podmínek výrobce.

Kontrola a seřízení vůlí mezi rotorem a těsnicími lištami po obvodu i v dělicí rovině

Každý výrobce rotačních regeneračních výměníků stanovuje požadované vzdálenosti mezi rotorem a těsnicími lištami (cca 2 až 5 mm), které se během provozu zvětšují. Tyto vzdálenosti je nutné pravidelně kontrolovat a v případě jejich nedodržení provést seřízení. Pokud jsou těsnicí lišty natolik opotřebované, že již neumožňují nastavení na předepsanou hodnotu, je nutné je vyměnit za nové. Příklady nadlimitních netěsností rotačních výměníků z auditních prohlídek jsou zobrazeny na obr. 10.

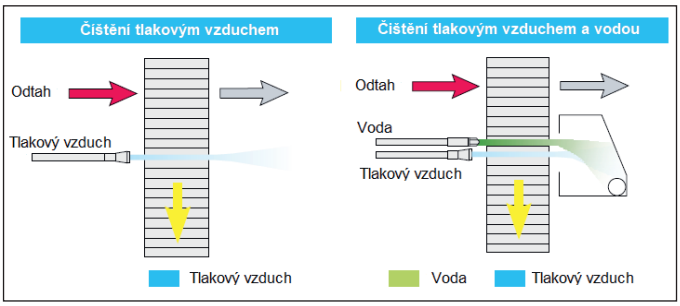
Pravidelné čištění rotoru výměníku dle provozních podmínek výrobce

U rotačních regeneračních výměníků dochází k částečnému samočištění kanálků tím, že se při každé otáčce rotoru mění směr proudění vzduchu. Přesto však postupně dochází k jejich zanášení, což vede ke snížení účinnosti přenosu energie a ke zvýšení tlakové ztráty rotoru. Důsledkem zvýšené tlakové ztráty je nadměrné axiální zatěžování rotačního rotoru. Kanálky rotoru lze čistit tlakovým vzduchem, vodou, případně kombinací



Obr. 10 Příklady nadlimitních netěsností mezi rotorem a těsnicí lištou

Fig. 10 Examples of excessive leakage between the rotor and sealing strip



Obr. 11 Čištění rotoru vzduchem a vzduchem i vodou

Fig. 11 Cleaning of the rotor using air and a combination of air and water

obou metod, vždy v souladu s pokyny výrobce, viz obr. 11. Při čištění tlakovou vodou musí být tlak takový, aby nepoškodil teplosměnnou plochu výměníku, kterou tvoří tenká hliníkové fólie.

Poznámka: U výměníku se současným přenosem tepla a vlhkosti je nutné zohlednit, aby vodní čištění nepoškodilo hygroskopickou vrstvu, proto je třeba postup konzultovat s výrobcem.

ZÁVĚR

Návrhu i provozu rotačních regeneračních výměníků je důležité věnovat náležitou pozornost. Pouze za optimálních podmínek jejich instalace lze dosáhnout požadované efektivity provozu a zároveň minimalizovat negativní dopady, které mohou při provozu vznikat.

Kontakt na autora: karel@ingmatejicek.cz, https://www.ingmatejicek.cz/

Použité zdroje:

[1] KASTT spol. s r. o. Technické podmínky pro rotační výměníky ZZT, https://www.kastt.cz/app/uploads/sites/54/2023/01/TECHNICKE_PODMINKY_RV-CZ_2022-07.pdf.
[2] KLINGENBURG. QuickGuide en: http://www.klingenburg.de/fileadmin/user_upload/germany/Downloads/ROTOR/klingenburg_QuickGuide_en.pdf.
[3] ZMRHAL, V., POSTUPA, M. Využití rotačních regeneračních výměníků pro zpětné získávání vlhkosti. In: Konference Klimatizace a větrání 2025.
[4] ZMRHAL, V., KUBENTHIRAN, J. Rotační regenerační výměníky pro zpětné získávání tepla. Část 7: Teplotní faktor při nízkých otáčkách rotoru. *Vytápění, větrání, instalace,* roč. 34 (2025), č. 4, s. 164–174. ISSN 1210-1389.