

# Simulace automatického řízení větrání automobilového tunelu

## Simulation of road tunnel ventilation automatic control

Ing. Jan POŘÍZEK,  
Satra spol. s r.o. Praha, CZ  
Prof. Ing. Karel HEMZAL, CSc.,  
ČVUT Fakulta strojní v Praze, Ústav  
techniky prostředí

Článek se zabývá stručným popisem větrání automobilového tunelu Mrázovka v Praze a sestavením simulace provozního větrání. Bez detailního rozboru výpočtového algoritmu, uvádí důležité výsledky simulace a upozorňuje na význam sestavení optimalizačních a simulačních algoritmů pro posouzení hospodárnosti provozního systému a pro zpřesnění návrhu větrání tunelů.

Uvedeny jsou výsledky počítačové simulace aerodynamiky navrženého podélného větrání, které má zamezit úniku škodlivin portály. Výsledky jsou využitelné při sestavování algoritmů řízení větracího systému s plynule regulovatelnými ventilátory ve třech strojovnách a proudovými ventilátory s podpurným nebo brzdícím účinkem na proudění vzduchu v tunelovém tělese. Výpočet byl sestaven v programu Microsoft Excel s podporou Visual Basic.

**Klíčová slova:** větrání, tunely, proudové ventilátory, opacita, regulace

Recenzent  
Ing. Zdeněk Lerl

The article deals with a brief description of the road tunnel Mrázovka in Prague ventilation and composition of operation ventilation simulation. Without detailed analysis of the calculation algorithm it presents important simulation results and draws the attention to the importance of the composition importance of optimisation and simulation algorithms for economy evaluation of the operation system and for making the tunnel ventilation draft design more precise. The results of computer simulation of the aerodynamics of the proposed longitudinal ventilation are indicated that should prevent the escape of harmful substances through the portals. The results are utilisable for composition of control algorithms of ventilation system with continuously controllable fans in three machine rooms and jet fans with supporting or braking impact on air flow in tunnel body. The calculation was elaborated in Microsoft Excell with the support of Visual Basic.

**Key words:** ventilation, tunnels, jet fans, opacity, regulation

Silniční tunel Mrázovka (v obr. 1 je označen jako stavba 9543 Radlická – SAT) je součástí vnitřního dopravního okruhu v Praze. Jeho větrání je navrženo firmou SATRA spol. s r. o. a Ústav techniky prostředí se podílel na projektu expertní činností.

Tunel je téměř 1,5 km dlouhý, má dvě tunelová tělesa – východní (VTZ) a západní (ZT) – pro jednosměrný provoz ve dvou, místy ve třech pruzích, se dvěma bočními větvemi pro výjezd a nájezd a je ukončen severními portály v kotlíně městského centra. Vyústění je v místě citlivém na škodliviny a s obtížnými rozptylovými podmínkami.

Použitý systém podélného větrání je proto navržen tak, aby bylo možné výjezd z tunelu chránit před výnosem škodlivin vozidly. Produkty spalování jsou větracím vzduchem převáděny z východního tunelu do západního před vyústěním na severu (obr. 2) a odváděny západním tunelovým tělesem do centrální strojovny. Spolu s produkty spalování z automobilových motorů v západním tělese jsou s vysokým vyústěním a kontrolovaným rozptylem škodlivin vypouštěny do ovzduší.

Dimenzování větrání vychází z mezinárodních doporučení PIARC [1], podle kterých se všechny současně budované tunely ve světě navrhují.

Určitými národními specifiky jsou skladba vozidel – podíl nákladních aut, podíl aut se vznětovými motory a stáří vozidel. Národními podmínkami jsou také hodnoty nejvyšší přípustných koncentrací škodlivin. K místním podmínkám patří pak také limitní přípustné rychlosti jízdy aut.

## SYSTÉM VĚTRÁNÍ A JEHO SOUČÁSTI

Systémy vzduchotechniky zabezpečují větrání

- provozní,
- požární,
- údržbové,

kteří z velké části využívají stejných součástí. V příspěvku se budeme zabývat provozním větráním. Pro ně je základním požadavkem, aby vyhovělo hygienickým limitům koncentrací rozhodujících škodlivin uvnitř tunelu. Vzhledem ke značným příkonům instalovaných ventilátorů je také důležitým požadavkem provoz s minimální celkovou spotřebou elektrické energie.

Po stanovení potřebných průtoků větracího vzduchu za předpokládaných provozních stavů byly na maximální požadované průtoky dimenzovány ventilátory strojoven a proudové ventilátory pro jednotlivé větrací úseky. Úkolem proudových ventilátorů je napomáhat průtoku vzduchu, který vyvozují projíždějící auta svým pístovým účinkem, případně tento průtok brzdí, pokud by nadměrně zatěžoval výkonost strojoven nebo by ji překračoval.

Vzhledem k proměnným podmínkám provozu, které jsou vyvolány změnami [3]:

- počtu a skladby vozidel, projíždějícími tunelem,
- rychlosti jejich jízdy,
- počtu spuštěných proudových ventilátorů,

musí být výkonost celého systému provozního větrání plynule automaticky říditelná [2].

Tomuto požadavku byly podřízeny požadavky na použité ventilátory:

- všechny ve strojovnách jsou plynule paralelně regulovatelné,
- všechny proudové ventilátory jsou reverzovatelné (z důvodu požární ochrany a energetické spotřeby svázané s ochranou prostředí uvnitř i vně tunelu), v každém regulačním úseku tunelového tělesa je jeden proudový ventilátor plynule říditelný a to při přímém i reverzním chodu.

Uvedené požadavky jsou nezbytné k možnosti plynulého přizpůsobení chodu větrací soustavy daným provozním podmínkám, které jsou za provozu zjišťovány kontinuálně měřením:

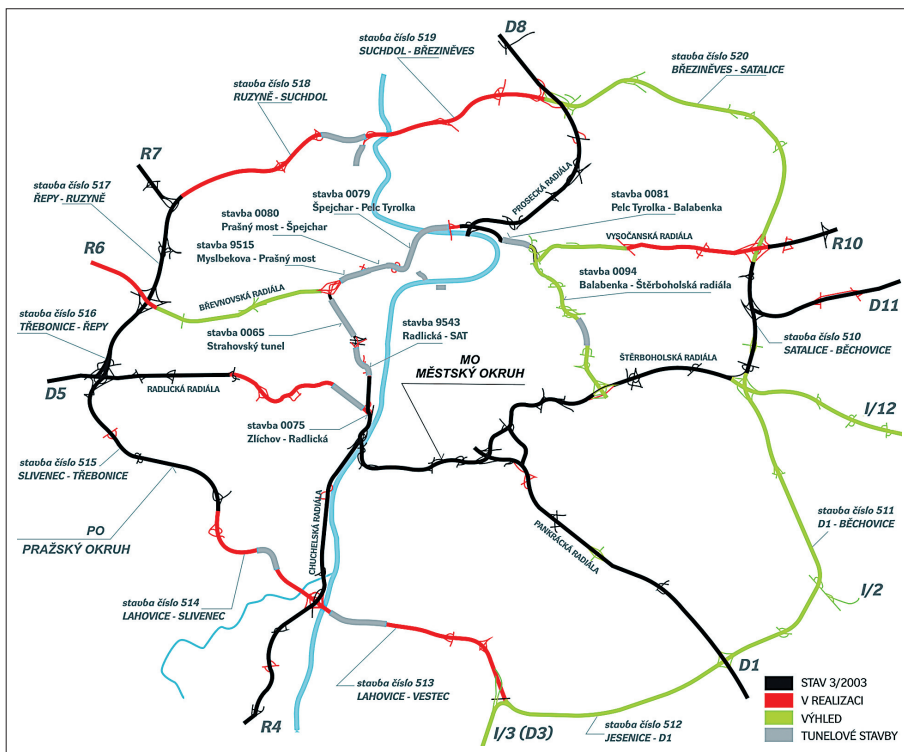
- počtu a rychlosti jízdy aut,
- rychlosti průtoku vzduchu v tunelu a ve vzduchových cestách strojoven,
- koncentrací relevantních škodlivin (CO, NO<sub>x</sub> a kouře – opacita) na koncích regulačních úseků.

## SIMULAČNÍ PROGRAM

Pro rozhodování o možných scénářích organizace řízení větrání tunelu Mrázovka byl vypracován simulační program jehož výsledky mohou být využity ke stanovení hodnot parametrů regulovaných veličin a velikostí jejich změn pro řízení proudových ventilátorů (JF) i ventilátorů ve strojovnách.

Při známé rychlosti průtoku vzduchu v tunelovém tělese je možné stanovit:

- průtoky vzduchu portály a místy, kde budou umístěna čidla regulátorů;



Obr. 1 Hlavní dopravní síť v Praze

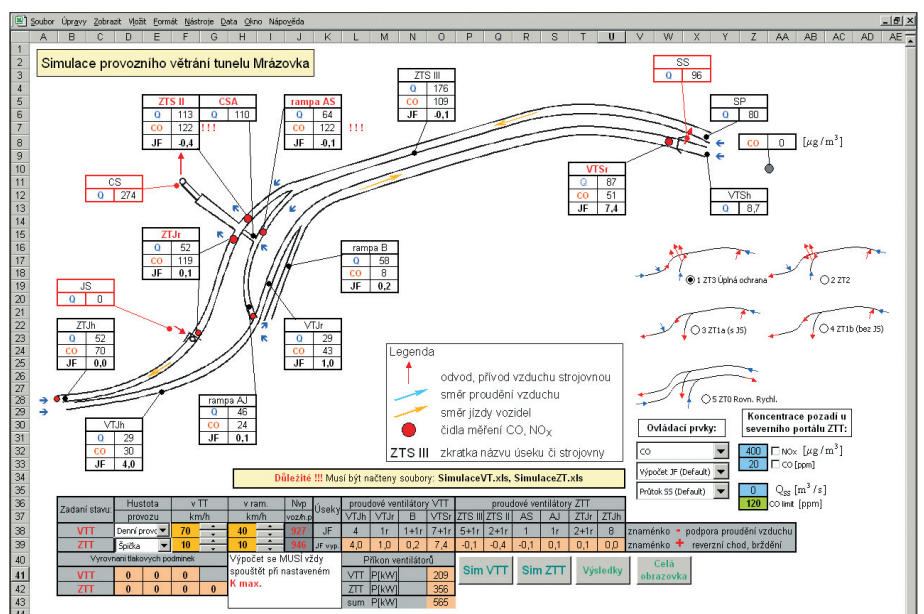
- koncentrace škodlivin (CO) v portálech (přepočtem modelem z rychlosti vzduchu a z počtu a rychlosti jízdy aut);
- kdy nestačí pístitový účinek aut k větrání (brzdící JF vypnutý), příp.
- od jakých podmínek není nutné průtok vzduchu brzdit, při povolení výstupu škodlivin portály do okolí (za podstatně nižších koncentrací než jsou přípustné hodnoty, použité k dimenzování větrání – např. v noci za tlumeného provozu).

Pro zvolené provozní stavy byly vypracovány simulační programy ke stanovení průtoků vzduchu a koncentrací rozhodující škodliviny v jednotlivých větracích (regulačních) úsecích. Do řešení byly také vloženy výpočty spotřeby energie provozovaných ventilátorů (JF a ve strojovnách). Simulace je napsána v programu Microsoft Excel s podporou Visual Basic. Předpokládá se stacionární kvazilineární proudění viskózní nestlačitelné tekutiny. Aerodynamický výpočet je založen na tlakové rovnováze a kontinuitě průtoku vzduchu soustavou seriově – paralelně napojovaných úseků tunelových těles – obr. 3.

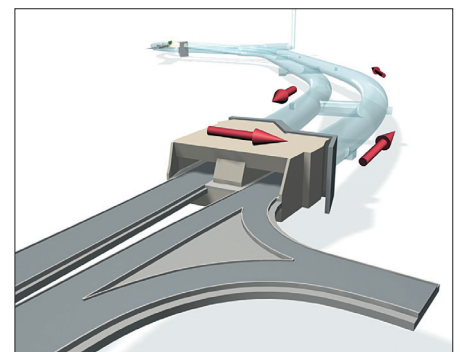
**Průtoky vzduchu** jsou vypočteny pro ustálený stav vkládaných hodnot vstupních veličin:

- **hustota provozu**  $N_v$  (voz/h.pruh), daná počtem vozidel jedoucích za hodinu v jednom pruhu;
- **rychlost jízdy aut**  $v$  (km/h), volitelná v hlavním TT (VT a ZT) a ve větvích A a B;
- **průtoky**  $Q$  ( $V$ ) ( $m^3/s$ ): odváděný CS, převáděný SS z VT do ZT, přiváděný JS – plynuje měnitelně od 0 do 100 % výkonosti strojoven;
- **zapnuté proudové ventilátory** JF na podporu nebo k brždění proudění vzduchu v TT, u plynuje regulovatelných v rozsahu jejich výkonosti od 0 do 100 %.

**Koncentrace rozhodující škodliviny** byly pro potřeby simulace převedeny na hodnotu CO. Prakticky byly převedeny jen koncentrace  $NO_x$ , protože opacita se podle výsledků výpočtů (při daném zahrnutí podílu aut ve znetvořím motory a také hlavně při daném sklonu vozovky) nikdy neuplatní. Přepočty se opíraly o výpočty z návrhu větrání. Přepočty se uplatní při vyšší rychlosti jízdy v než 30 km/h, kdy převládne potřeba odvodu  $NO_x$  nad CO. Podle uvedeného přepočtu bude řízen skutečný provoz automaticky, výběrem rozhodující škodliviny, (kterou bude vždy ta, která vyžaduje větší dávky větracího vzduchu) na



Obr. 3 Základní ovládací panel simulačního programu s interaktivně vkládanými hodnotami a s výslednými průtoky, koncentracemi a počtem zapnutých proudových ventilátorů



Obr. 2 Převodní strojovna severního portálu VTT

základě měření čidly koncentrací s nastavenými limity např. 120 ppm pro CO a 18  $mg/m^3$  pro  $NO_x$  a výběrem maxima z nich. Hodnoty těchto limitů budou nastavitelné oprávněným dispečerem.

**Příkony ventilátorů** byly stanoveny za předpokladů, že účinnost JF je zahrnuta v příkonech pro velikosti:

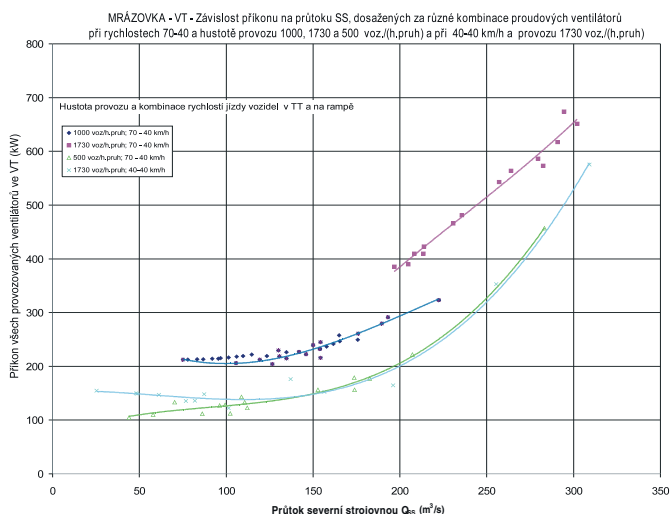
- 630 mm 17 kW;
- 1120 mm 16,7 kW;
- 1400 mm 14 kW;

ventilátory ve strojovnách pracují v provozních stavech podle tab. 1.

### OPTIMALIZACE SPOTŘEBY ELEKTRINY

V grafu s výsledky simulací v obr. 4 je vyhodnocena závislost příkonu všech provozovaných ventilátorů na průtoku vzduchu SS při zvolených rychlostech vozidel a hustot provozu ve VT. Jsou to výsledky simulace úplné ochrany VT.

Průběh závislosti ukazuje, že nejmenší příkony jsou při minimálním průtoku vzduchu, převáděném severní strojovnou do západního tunelu, dosaženém vhodnou kombi-



Obr. 4 Závislost příkonu všech ventilátorů, provozovaných ve VT při větrání bez dosažení meze, dané odvodem škodlivin s max. přípustnou koncentrací (větrání „nadbytečné“) – při úplné ochraně severního portálu. Výsledky platí pro čtyři zobrazené provozní podmínky

Tab. 1 Výkonové parametry použitých ventilátorů

Strojovna	Max. průtok m <sup>3</sup> /s	Tlak Pa	Účinnost %	Příkon kW	Charakteristika sítě Pa/(m <sup>3</sup> /s) <sup>2</sup>
Severní SS	300	1200	0,77	468	0,0133
Jižní JS	150	450	0,8	84	0,02
Centrální CS	400	1000	0,8	450	6,25*10 <sup>-3</sup>
clona	50	1000	0,8	62,5	0,4

nací brzdného působení JF. Tato tendence platí pro jakoukoliv kombinaci provozních podmínek – při zapnutých JF – také v ZT.

Stanovení podobné závislosti pro ZT je poměrně složité, neboť dodržení podmínek větracího systému (např. kapacita CS, instalovaný počet JF v jednotlivých úsecích, výkon škodlivin z portálů atd.) při výpočtu je vždy vázán na daný provozní a dopravní stav ve VT. Severní strojovna převádí veškerý znehodnocený vzduch z VT do ZT a tedy již na začátku úseku ZTS III dochází k nadměrnému znečištění vnitřního prostředí. Je proto nutné nasávat severním portálem ZT takové průtoky čerstvého vzduchu, které naředí škodliviny natolik, že čidla nevykážou havarijní stav a také bude dodržena podmínka hospodárného provozu. Uvědomme si velikosti průtoku převáděného SS do ZT, který může dosáhnout až 300 m<sup>3</sup>/s a k tomuto si přičtíme průtok severním portálem, který musí zůstat v podtlaku. Kapacita odvodní (CS) strojovny 400 m<sup>3</sup>/s musí zajistit odvod jak ze severního, tak i z jižního úseku ZT při plné ochraně. Z mnoha výsledků vyplývá, že nastavení proudových ventilátorů v ZT je velice citlivé (obr. 5).

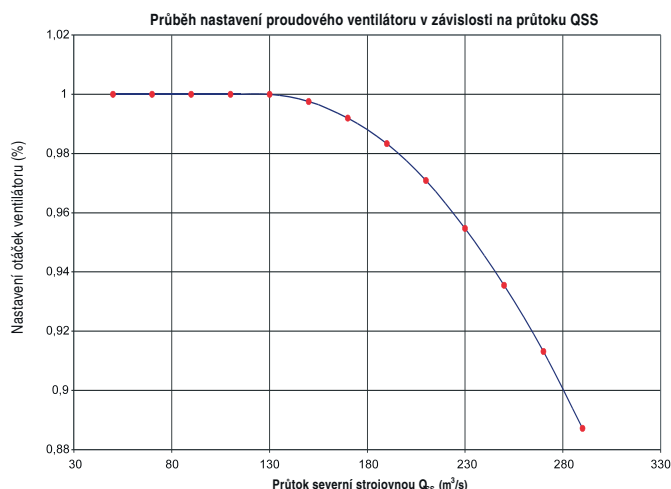
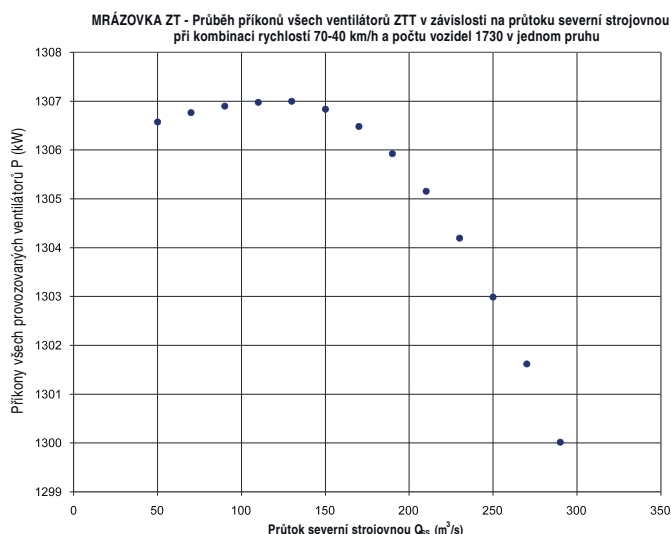
Ze získaných závislostí vyplývá důležitost aerodynamicky vhodné úpravy vzduchových cest ve strojovnách (zablení vnitřních hran betonových kanálů a optimální umístění usměrňovacích lopatek), neboť hlavními spotřebiči jsou ventilátory ve strojovnách a úpravami lze snížit jejich dopravní tlaky. JF, které brzdí průtok, neodebírají takový příkon, který by spotřebu elektrické energie výrazně zvyšoval.

***Ekonomická je proto zásada: pokud musí být zapnutý brzdicí JF, pak ubrzdít průtoky na mez, blízkou průtokům pro max. přípustné koncentrace!***

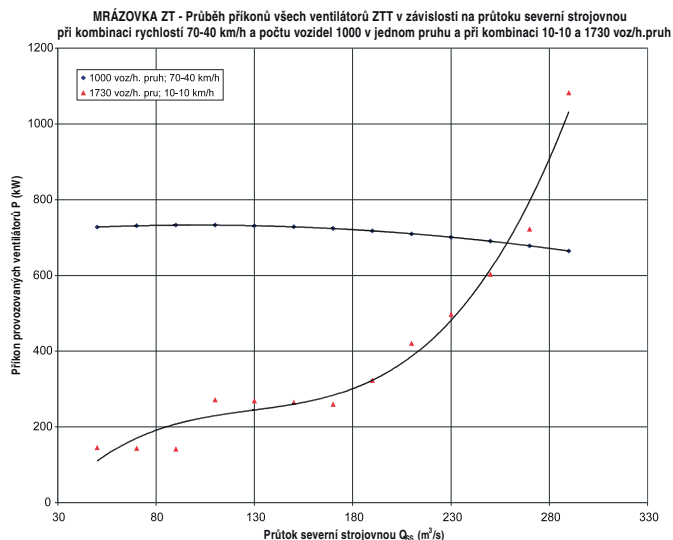
### ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ SIMULACÍ

Výsledky simulací potvrzují vzájemné ovlivňování (vazbu) regulačních úseců, kdy regulační zásah nebo změna podmínek v kterémkoliv úseku vyvolávají regulační pochod ve všech vázaných úsecích.

Regulační algoritmy musí proto s vazbami počítat a např. zamezit obrácenému proudění v úsecích, zakončených portály, než je požadováno, vhodným výběrem provozovaných JF. Účelné bude také ex-



Obr. 5 Závislost příkonu všech ventilátorů, provozovaných v ZT při větrání při dosažení meze NO<sub>x</sub> = 18 μg/m<sup>3</sup> v úseku ZTJr a maximálním využití kapacity centrální strojovny – při úplné ochraně portálů tunelu. Výsledky platí pro špičkový provoz v ZT (nahore). Citlivé nastavení jednoho proudového ventilátoru v úseku AS (dole)



Obr. 6 Závislost příkonu všech ventilátorů, provozovaných v ZT při větrání při dosažení meze NO<sub>x</sub> = 18 μg/m<sup>3</sup> v úseku ZTJr – při úplné ochraně portálů tunelu. Výsledky platí pro stav kongesce v ZT (10/10 km/h) a denní provoz v ZT 1730 voz./h.pruh

tremální vyhledávání kombinace JF pro dosažení minima spotřeby energie.

To jsou úkoly pro další práci na rozšíření simulačního programu. Zejména půjde o vystižení dynamiky přechodu do ustáleného stavu po každém regulačním zásahu nebo po každé změně provozních podmínek. Znalost citlivosti reakce systému je důležitá pro stabilitu regulačních pochodů.

Simulace potvrdila, že navržený způsob větrání je schopen zajistit odvod znečištěného vzduchu z tunelového tělesa. Prokázala správnost návrhu větrání. Poskytuje podklady pro stanovení strategie řízení chodu provozního větrání.

## ZÁVĚR

Sestavení simulace proudění vzduchu v tunelu je v dnešní době nezbytnou součástí projektu vzduchotechniky, zabývajícího se návrhem větrání tunelů. Výsledky jsou důležité hlavně pro:

- stanovení rychlosti proudícího vzduchu v tunelu za působení pistového účinku projíždějících vozidel;
- ověření navrženého počtu proudových ventilátorů pro požární a provozní větrání;
- stanovení skutečného toku škodlivin a jejich koncentrací z portálů tunelu a kominů strojoven; jako podklad pro vypracování rozptylových studií;
- přípravu strategie řízení provozního větrání.

Je nutné připomenout, že sestavení takového modelu simulace zprávně navrženou koncepcí provozního větrání tunelu a mnohdy zajistí nepředimenzování systému a tedy ušetří investiční a provozní náklady. Upozorňujeme také na to, že výsledky nemusejí vždy vykazovat pravdivé řešení a to i přes to, že matematické řešení je správné.

Algoritmus řízení provozního větrání bude založen na vstupních datech, která poskytnou čidla relevantních veličin, navržená k umístění na rozhodujících místech – v koncích regulačních úseků. Jde o snímání hustoty provozu, rychlosti vozidel, rychlosti vzduchu, koncentrace sledovaných škodlivin a případně tlaků.

Samostatným problémem – v tomto příspěvku detailně neřešeným – je regulace odvodu proměnných průtoků vzduchu třemi paralelně napojenými větvemi do centrální strojovny.

### Použitý zdroj:

- [1] PIARC (Permanent International Association of Road Congress), *Proc. of XX<sup>th</sup> World Road Congress*, Montreal (1995)
- [2] HEMZAL, K., *Větrání tunelu Mrázovka – Návrh strategie řízení provozního větrání*. Zpráva pro s.r.o. Satra, (2002)
- [3] DALLY, B.B., *Woods Practical Guide to Fan Engineering*. Colchester G.B. (1992). ■

### \* Opatrnost při snižování intenzity větrání

Představa o možnosti úspory provozních nákladů snížením průtoku přiváděného vzduchu u větracího či klimatického zařízení vypadá na první pohled jako lákavá. Snižování objemového průtoku přináší však možnost nerovnoměrného zásobování systému rozvodu vzduchu, tj. rozdílné snížení rychlosti vzduchu v něm. To pak platí i o přiváděcích výústkách, což má za následek snížení indukce a tím i dosahu přiváděného vzdušného proudu do místnosti. Zmenšeným výkonem přenosu tepla se zvětší a znerovnoměrní teplotní rozdíl mezi přiváděným vzduchem a vzduchem v místnosti. Při provozu jako chlazení, dojde k nekontrolovatelnému poklesu přívodu vzduchu, což má za následek masivní zhoršení pocitu pohody. Před případným snížením objemového průtoku vzduchu by proto měly být zkontrolovány výkonnostní limity výústek.

CCI 13/2002

(Ku)

### \* Energetické paspory budov

V současné době se v SRN pracuje na náplni energetického pasportu, který by zprůhlednil uživateli energetickou kvalitu jak novostavby, tak i stávající budovy. Zpracovatel pasportu připravuje nařízení, jehož podstatou má být úroveň požadavků na primární energii. To ovšem nestačí. Je třeba si uvědomit, že faktory primární energie mají spíše politickou než fyzikální výpověď. Jsou proto předkládány opodstatněné návrhy obsahující též zhodnocení pláště budovy a techniky jejich technických zařízení.

#### Vyhodnocování pláště budovy

V současné době diskutovaný prostup tepla vztažený k teplotě představuje charakteristickou hodnotu a může sloužit jako měřítko ke zhodnocování pláště budovy. Zpracovatelem nařízení daná mezní hodnota musí být v průkazném řízení srovnávána se skutečnou hodnotou. I kdyby v budoucnu zpracovatel mezní hodnotu zostřil, zůstane postup vyhodnocování pláště budovy zachován.

#### Vyhodnocování technických zařízení

Dosud se při diskusi o uspořádání energetického pasportu ještě nezapočalo s vyhodnocováním technických zařízení. Výpověď o číslu (součiniteli) náročnosti zařízení sama neumožňuje ještě jeho vyhodnocení, protože toto číslo je závislé od potřeby tepelné energie a velikosti budovy. Určíme-li pro každou budovu dodatečně k číslu náročnosti projektovaného/provedeného zařízení číslo náročnosti pro „standardizované“ zařízení, které odpovídá současnému stavu techniky, dostaneme relativní číslo náročnosti  $e_{rel} = e_{dané} / e_{stand}$  (při  $e_{rel} < 1$  je zařízení lepší, při  $e_{rel} > 1$  je energeticky náročnější). Stanovení „standardizované“ techniky zařízení (např. sdílení tepla otopnými tělesy 70/55 °C s termostatickými ventily 2 K, vnitřní rozvod, rozdělovač v nevytápěné místnosti, regulované oběhové čerpadlo, nízkoteplotní kotel, centrální ohřev pitné vody) může zpracovatel nařízení měnit, přičemž i zde vztažná veličina a tím i postup zůstanou flexibilní.

CCI 13/2002

(Ku)

### \* Spirálově lemované trubky větších průměrů

Možnost výroby spirálově svinovaných a lemovaných trub větších průměrů pro vzduchotechniku nabídly stroje Tubeformer švýcarské firmy Spiro International S. A. na veletrhu EuroBlech 2002 v Hannoveru.

Stroj Tubeformer 1602, uvedený na jaře 2002, vyrábí lehké kruhové roury od průměru 80 mm do 1600 mm z pásů z jedno- a oboustranně pozinkovaného ocelového plechu tloušťky 0,4 až 1,3 mm, nerezavějící oceli 0,4 až 0,8 mm a hliníku 0,6 až 1,3 mm. Do tloušťky 1 mm používá pásů standardní šíře 137 mm, nad 1 mm pásů šíře 140 mm. Podle druhu materiálu pracuje s rychlostí až 60 bm/min. Nový výkonnější stroj Tubeformer 2020 vyrábí max. rychlostí až 70 bm/min kruhové roury od průměru 80 mm do průměru 2500 mm z pásů ze silnějších materiálů; u pozinkovaného plechu tloušťky 0,4 až 2 mm, u nerezavějící oceli od 0,4 do 1,3 mm a u hliníku od 0,4 do 2 mm. Novinkou je přímý přenos CAD dat z počítače do ovládacího stroje. Technologie umožňuje i vyztužení trub 1 až 2 spirálovými prisky mezi lemovanými spoji.

Oba stroje vyrábí i ohyby různých úhlů a poloměrů zakřivení, příruby (METU) a přesné kolmé řezy bez oštěpů, při požadavcích na rozměry a těsnost spojů podle norem AF-NOR, BS, DIN, EUROVENT a SMACNA.

Spiro International S. A., Boesingen, 2002

(AB)

### \* Odstraňování rtuti ze spalin procesem MercOx

Velkým problémem při snižování toxicity spalin z uhlíkových elektráren, spaloven odpadu spalujících kaly z čištění odpadních vod, nebezpečné odpady a z termické sanace půd je obsah rtuti ve formě par elementární rtuti a plyných sloučenin.

Problém řeší proces MercOx (Mercury Oxidation), vyvinutý v německém centru Forschungszentrum Karlsruhe (FZK), vstříknutím peroxidu vodíku do spalin k oxidaci rtuti na rtuťnaté sloučeniny rozpustné ve vodě a jejich následujícím vypráním. Nikoli levný ale účinný proces splňuje podmínky předpisu 17. BImSchV o denní střední hodnotě obsahu rtuti max. 0,05 mg. m<sup>-3</sup>. Zahuštěné koncentráty z praní lze po vysražení použít k materiálové recyklaci rtuti.

Spolupracující švédská firma Götaverken AB, Miljö, nabyvatel licence na proces, proces MercOx nasadila do zařízení pro spalování nebezpečného odpadu SAKAB zpracovávající 100 000 m<sup>3</sup>. h<sup>-1</sup> spalin, uvedeného do provozu v roce 2000. Proces se osvědčil i v průmyslových podmínkách.

Technologii FZK doplnil i kontinuální analyzátor rtuti ve spalinách s obsahem oxidu siřičitého HgCEM, jehož zkoušky proběhly úspěšně ve spalovně komunálního odpadu v Ludwigshafenu a v jedné cementárně. Analyzátor, schopný měřit i anticipované nižší hodnoty obsahu rtuti, získal osvědčení TÜV a od roku 2001 se sériově vyrábí.

Forschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe 2002

(AB)