

Ing. Lukáš FERKL
Centrum aplikované kybernetiky
při ÚTIA AV ČR a konzultant při
společnosti Kybertec, s.r.o.
Ing. Oto SLÁDEK
Kybertec, s.r.o.

Simulace a řízení větrání tunelů pražského vnitřního okruhu

Simulation and Control of Prague Inter City Tunnels Ventilation

Recenzent
prof. Ing. Karel Hemzal, CSc.

Řízené větrání dálničního tunelu podle konkrétních provozních podmínek má držet koncentrace zplodin pod hygienickými limity. Navrhovaný způsob řízení toho dosahuje při minimální spotřebě elektřiny k pohonu proudových ventilátorů v tunelu s podélným větráním. Navržený algoritmus řízení je ověřen simulací vybraného úseku tunelu.

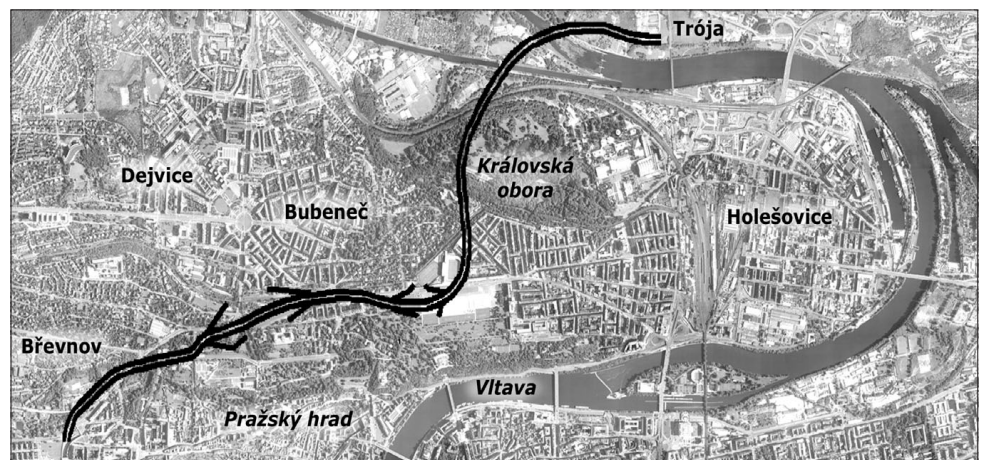
Klíčová slova: větrání, dálniční tunel, řízení, simulace, optimalizace

According to specific operation conditions, ventilation control of a highway tunnel has to keep exhaust concentration below legal limits. In the proposed control method, this is achieved with minimum electrical energy consumption for the jet fans used in a tunnel with axial ventilation. The proposed algorithm has been verified by simulation of a selected tunnel section.

Keywords: ventilation, highway tunnels, control, simulation, optimization

ÚVOD

Pro řešení dopravní situace v Praze bylo již v době první republiky rozhodnuto vybudovat dva silniční okruhy – vnitřní a vnější. Součástí stávajícího vnitřního okruhu jsou dnes dva tunely – Strahovský a Mrázovka. V současné době se pracuje na třetím, nejdelším tunelu, který má projektové jméno Blanka. V r. 2011 by měl navázat na Strahovský tunel a propojit Břevnov (mimoúrovňová křižovatka Malovanka), Dejvice (tunelová křižovatka Prašný most), Bubeneč (tunelová křižovatka Špejchar) a Tróju (mimoúrovňová křižovatka Pelc-Tyrolka). Projektovaná trasa tunelu je na obr. 1.



Obr. 1 Ortofotografická mapa části Prahy s vyznačenou trasou tunelu Blanka (Myslčbeka – Pelc-Tyrolka)

POŽADAVKY NA ŘÍDICÍ SYSTÉM

Naším úkolem bylo navrhnout pro tunel Blanka koncepci řídicího systému vzduchotechniky. Jelikož se jedná o velice komplikovaný tunel – bude mít délku 5,5 km, dva tubusy pro dva až tři jízdní pruhy a dvě tunelové křižovatky – je třeba použít moderní metody řízení větrání.

Cílem řízení vzduchotechniky tunelů je udržet koncentrace zplodin v rámci platných hygienických limitů. Jelikož se tunel Blanka nachází v intravilánu, v hustě obydlené oblasti Prahy, musí být schopen zajistit podle požadavků Odboru životního prostředí Magistrátu hl. m. Prahy navíc následující režimy provozu.

- Úplná ochrana portálů proti výnosům – při vážné smogové situaci nesmí z tunelu proudit znečištěný vzduch portály, ale pouze větracími komíny.
- Částečná ochrana portálů proti výnosům – při běžné smogové situaci může z tunelu proudit znečištěný vzduch portály pouze v omezené, předem definované míře.
- Běžný provoz – nemá zvláštní požadavky na ochranu portálů.

Pro tunely, které se u nás i ve světě provozují se dnes převážně používají jednoduché řídicí algoritmy, které využívají přímovazební řízení, založené na zkušenostech s provozem obdobných tunelů. Nevýhodou takových řešení je velmi malá robustnost, snížená schopnost reagovat na nenadálé

situace a prakticky nemožná optimalizace energetické spotřeby ventilátorů. U tak složitého tunelu, jakým bude tunel Blanka, je pak návrh řízení větrání klasickými metodami prakticky nemožný.

Před hlavního projektanta (společnost Satra, s. r. o.) byl postaven obtížný úkol, který byl řešen ve spolupráci se společností KYBERTEC, s. r. o. a Katedrou řídicí techniky FEL ČVUT. Jako nejdůležitější byly identifikovány následující požadavky:

- robustnost,
- energetická optimalizace,
- rychlá reakce na nepředvídané události,
- snížení zátěže vzduchotechnického zařízení (zvýšení jeho životnosti),
- snadná rekonfigurace,
- provoz ve třech stupních ochrany (úplná, částečná a bez ochrany).

Pro splnění daných požadavků jsme se rozhodli nejdříve vytvořit simulační model a na základě analýzy chování modelu poté navrhnout řídicí systém.

SIMULACE

Pro simulaci vzduchotechniky se nabízejí dva možné přístupy. Lze použít CFD software k řešení Navierových – Stokesových rovnic (viz například [1]). CFD simulace je vhodná spíše pro analýzy aerodynamických

detailů tunelu a obecnou koncepcí, simulaci celého tunelu (se zahrnutím vlivů řízení VZT) brání její extrémní výpočetní složitost.

Druhou možností je použít vyjádření tlakových podmínek proudění Bernoulliho rovnicí:

$$\Delta P_{\text{tot}} = \Delta P_{\text{loc}} + \Delta P_{\text{fric}} \pm \Delta P_{\text{pist}} \pm \Delta P_{\text{fans}} \pm \Delta P_{\text{atm}} \quad (1)$$

kde
 P_{tot} celková tlaková ztráta,
 P_{loc} ztráty vznikající ve změnách geometrie tunelu,
 P_{fric} ztráty třením,
 P_{pist} pístový efekt vozidel,
 P_{fans} účinek proudových ventilátorů,
 P_{atm} atmosférické podmínky vně tunelu.

Rozhodli jsme se použít právě Bernoulliho rovnice, i když popisují pouze ustálený stav proudění vzduchu. Můžeme si to dovolit, protože dynamika vzduchové masy v tunelu je velmi rychlá (vzduch se považuje za nestlačitelnou tekutinu), navíc v tunelu se situace proudění mění při běžném provozu jen velmi zvolna, proto můžeme počítat jen s ustálenými stavy proudění. Je ovšem třeba zdůraznit, že úkolem bylo modelovat pouze běžný provoz, nikoliv krizové situace. Přesto je možné tímto způsobem modelovat například situaci při dopravních nehodách, kongescích a dalších „nenáročných“ nestandardních situacích, ovšem ne požár apod. Poznamenejme, že Bernoulliho rovnice se při simulaci tunelů běžně používá, viz např. [2], [3].

Model vzduchotechniky jsme podpořili vytvořeným modelem dopravní situace. Ten je nutný pro určení pístového efektu vozidel a pro generování zplodin. Použili jsme mikroskopický sledovací model (microscopic car-following model, jak je uveden v [4][5]) se zanedbáním zrychlení vozidel

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \min(v_{\text{max}}, 0,5(x_{i-1}^t - x_i^t) - d_{\text{car}}) \quad (2)$$

kde
 x_i^t pozice i -tého vozidla v čase t ,
 v_{max} rychlostní omezení,
 d_{car} průměrná délka vozidla.

Jako model emisí jsme zvolili rovnici zachování hmotnosti pro složky s konstantní hustotou a konstantním koeficientem difúze

$$\frac{\partial p(x,t)}{\partial t} + v_{\text{air}} \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} = D \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} + R \quad (3)$$

kde
 $p(x,t)$ koncentrace zplodin,
 v_{air} rychlost proudění vzduchu,
 D koeficient difúze,
 R zplodiny vyprodukované vozidly.

Model jsme ověřili a naladili na datech z tunelu Mrázovka. Pro účely tunelu Blanka jsme vytvořili simulační software (obr. 2), který disponuje uživatelsky příjemným rozhraním a umožňuje pohodlně simulovat různé dopravní scénáře uvnitř budoucího tunelu.

ALGORITMUS ŘÍZENÍ

Pro řízení vzduchotechniky máme k dispozici měřenou rychlost proudění vzduchu, koncentrace sledovaných škodlivin (CO , NO_x a prachu), počet vozidel a jejich rychlosti. Požadovaným výstupem řídicího systému je příkon ventilátorů. Při odvozování algoritmu optimálního řízení vyjdeme ze statického modelu zplodin, který je popsán vztahem

$$p = \frac{k \cdot n \cdot s}{S_{\text{area}} \cdot v_{\text{air}}} \quad (4)$$

kde
 p koncentrace zplodin
 n počet vozidel v tunelu
 s umístění senzoru
 S_{area} efektivní průřez tunelu
 v_{air} rychlost proudění vzduchu
 k konstanta produkce zplodin

Pro řízení je důležité dostat do rovnice (4) požadovaný příkon ventilátorů. Pro rychlost proudění v tunelu platí

$$v_{\text{air}} = a f + v_{\text{air}}^* \quad (5)$$

kde
 a konstanta úměrnosti
 f příkon ventilátorů
 v_{air} celková rychlost proudění vzduchu
 v_{air}^* rychlost proudění vzduchu způsobená jinými vlivy než ventilátory

Dosažením rovnice (5) do rovnice (4) dostáváme optimální příkon ventilátorů pro udržení daného emisního limitu

$$f_o = \frac{1}{a} \left(\frac{k \cdot n \cdot s}{S_{\text{area}} \cdot \bar{p}} - v_{\text{air}}^* \right) \quad (6)$$

kde
 f_o optimální příkon ventilátorů
 a ostatní proměnné jako dříve.

Rovnice (6) ovšem platí pouze pro jeden vzduchotechnický úsek. Abychom dosáhli optimální synchronizace vzduchotechniky celého tunelu, je třeba vytvořit pro každý vzduchotechnický úsek jednu takovou rovnici. Navíc je výhodné převést problém z proměnných v_{air} (rychlost proudění vzduchu) do proměnných Q (průtok vzduchu). Chceme-li minimalizovat celkový příkon všech ventilátorů uvnitř tunelu, můžeme řízení realizovat jako následující lineární program:

$$\min \sum_i |f_i| \quad \text{za omezení } f_i \in [0,100], \sum \hat{a}_i f_i \in [Q^l, Q^r] \quad (7)$$

Lineární program má několik obrovských výhod plynoucích z jeho konvexity:

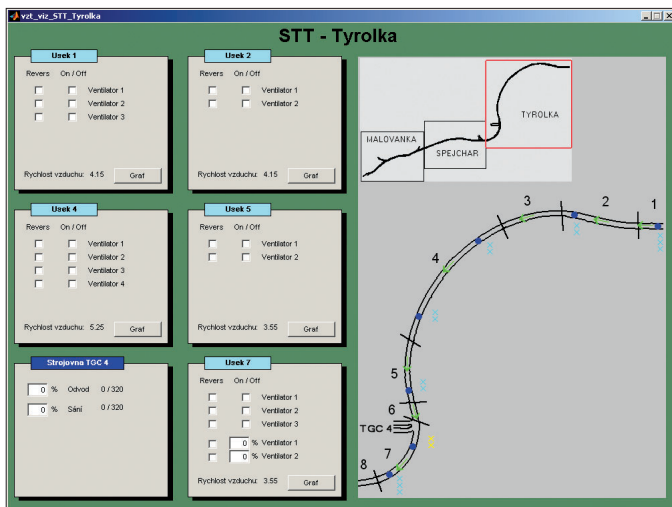
- Pokud má řešení, je toto řešení právě jedno.
- Pokud řešení existuje, je snadné je nalézt.
- Řešení je vždy optimální.
- Výsledek se spočítá velmi rychle.

Navíc je snadné libovolně rozšiřovat množinu omezení, například můžeme zavést požadavek na úplnou ochranu, a to jednoduše tak, že pro portálové vzduchotechnické úseky zadáme omezení ve tvaru $Q_i < 0$ (průtok v těchto sekcích musí být záporný – dovnitř tunelu). Pro více podrobností odkazujeme na náš článek [6].

Řízení jsme si ověřili na našem simulačním modelu, výsledek je na obr. 3. Jak je vidět na obr. 3d, hodnoty CO se pohybují přesně okolo zadaného limitu (3,5 ppm). Obr. 3b ukazuje, že příkon ventilátorů je skutečně optimalizován a reaguje na okamžitou situaci v tunelu.

ZÁVĚR

Podíváme-li se zpět na původní požadavky na algoritmizaci, které jsme uvedli na začátku tohoto článku, můžeme konstatovat, že byly s úspěchem splněny. Tím, že se optimalizuje energetická spotřeba, zvyšuje se také životnost zařízení. Reakce na nepředvídané události a robustní



Obr. 2 Ukázka grafického rozhraní simulačního programu pro modelování vzduchotechniky tunelu Blanka

chování řídicího systému jsou zaručeny jeho zpětnovazební charakterem a simulačně ověřeny. A konečně díky tomu, že řízení dosahujeme metodou lineárního programování, můžeme řízení snadno přizpůsobovat aktuálním provozním požadavkům i pozvolna se vyvíjejícím právním předpisům.

Poděkování

Tento projekt vzniká za podpory grantu MŠMT č. 1M0567, společnosti Satra, s.r.o. a společnosti KYBERTEC, s.r.o.

Lukáš Ferkl – v roce 2004 absolvoval FEL ČVUT na Katedře řídicí techniky, kde v současné době působí jako doktorand ve výzkumné skupině teorie řízení. Pracuje také v Centru aplikované kybernetiky při ÚTIA AV ČR a jako konzultant při společnosti KYBERTEC, s.r.o.

Oto Sládek – v roce 1996 absolvoval FSI ČVUT na Katedře automatického řízení a inženýrské informatiky. Je zakladatelem a ředitelem firmy KYBERTEC, s.r.o.

* Řepkový olej – pro Belgii nový objev

Ke konci roku musí být podle belgické legislativy 2 % spotřebované energie organického původu. Alternativou benzínu je bioetanol. V Belgii však jezdí až 70 % aut s dieslovými motory. Pro naftu je alternativou bionafta nebo čistý rostlinný olej.

Bionafta je vyráběna z řepkového oleje esterizací metanolem. Řepka se musí do výrobního závodu dopravovat. Jak doprava, tak chemická výroba sama spotřebovává množství energie.

Tím se benefit z ekologického paliva stírá. Velkou předností bionafty je, že může být míchána s naftou přírodního původu (z ropy) bez poškození motorů.

Čistý rostlinný olej, vyráběný studeným lisováním olejnatých rostlin (slunečnice, řepka) je palivo organického původu, které nevyžaduje žádné další chemické ošetření.

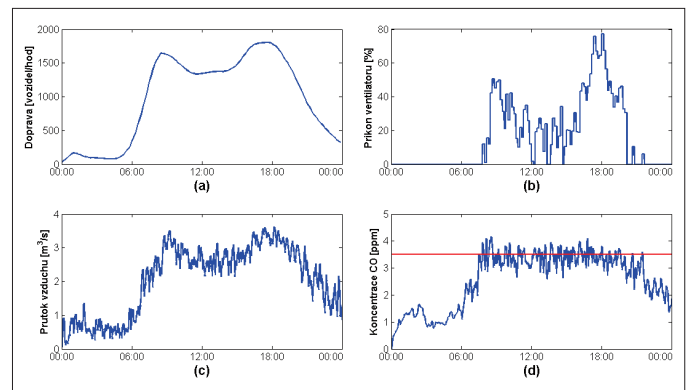
Zdá se, že budoucnost v palivech pro dieslové motory, zvláště v Belgii, patří řepkovému oleji.

Zdroj: POLLUTEC, Milieu Direct, www.kluwer.be

(Laj)

* Peletovací zařízení až 1 MW

Na trhu se nyní prosazují vytápěcí zařízení peletami o výkonu 100 kW až 1 MW. Tato zařízení se doporučují pro školky, školy, nebo i hotely. Ve švábském Gmündu vytápějí dva peletové kotle 300 a 400 kW dálkově 85 rodinných domků a dva obytné domy. V Schlehdorfu v Horním Bavorsku jsou zásobovány teplem z dvojitého kotlo-



Obr. 3 Simulace optimálního řízení větrání v tunelu v průběhu jednoho dne

(a) Průběh dopravní situace během simulace. (b) Přikon ventilátorů ve sledovaném vzduchotechnickém úseku. (c) Celkový průtok vzduchu. (d) Koncentrace CO na sledovaném senzoru, regulovaná na maximální hodnotu 3,5 ppm.

Jako doktorand Ústavu přístrojové a řídicí techniky se zabývá induktivní identifikací hereditárních systémů.

Použité zdroje:

- [1] Douglas, J. F., Gasiorek, J. M., Swaffield, J. A.: *Fluid Mechanics*, Prentice Hall, 4th edition, 2001.
- [2] Bellasio, R.: Modelling traffic air pollution in road tunnels, *Atmospheric Environment*, Vol. 31, pp. 1539-1551. 2001.
- [3] Boman, C. A., Bring, A., Malmström, T. G.: Simulation and measurement of road tunnel ventilation, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 12, No. 3, pp. 417-424. 1997.
- [4] Rothery, R. W.: Car Following Models, In: Rathi, A. K. (Ed.), *Traffic Flow Theory: A State of the Art Report*, FWHA, 2002.
- [5] Ferkl, L., Kurka, L., Sládek, O., Pořízek, J.: Simulation of traffic, ventilation and exhaust in a complex road tunnel, In Proc. of *IFAC 2005*, Prague, 2005.
- [6] Ferkl, L., Meinsma, G., Kurka, L.: Finding optimal control for highway tunnels. In proc. of *International Symposium on Design, Construction and Operation of Long Tunnels*. Taipei, 2005. ■

vého zařízení 400 a 540 kW jeden klášter s dívčí reálkou a seminář. Každé dva týdny se sem v topné sezóně dodává 27 tun pelet.

CCI 11/2005

(Ku)

* Nová norma ASHRAE

V polovině roku 2005 předložila ASHRAE dva nové návrhy norem (směrnic) a uvolnila je k veřejné diskusi.

V normě 138P „Metody a postupy k výpočtu špičkových topných a chladicích zátěží s výjimkou nízkopodlažních obytných budov“ jsou představeny postupy k zjišťování těchto zátěží v kancelářských a výrobních budovách.

Ve směrnici 10P „Kritéria k dosažení přijatelného vnitřního prostředí“ jsou představeny a zhodnoceny komplexní souvislosti a vztahy mezi kvalitou vnitřního ovzduší (zdroje škodlivin a pachů a jejich působení, objemové průtoky venkovního vzduchu) a činiteli tepelné pohody (teplota, vlhkost, rychlost vzduchu aj.).

CCI 7/2005

(Ku)

* Healthy Building 2006

Jako mezinárodní konference se bude konat ve dnech 4. až 8. června 2006 v portugalském Lisabonu.

Více informací: www.hb2006.org.

(Laj)