

Ing. Jan ŠULC^{1), 2)}
 doc. Ing. Lukáš FERKL, Ph.D.²⁾
 Ing. Jiří CIGLER, Ph.D.³⁾
 Ing. Jiří ZÁPAŘKA⁴⁾

¹⁾ ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra řídicí techniky

²⁾ ČVUT v Praze, Univerzitní centrum energeticky efektivních budov

³⁾ Feramat Cybernetics, s.r.o.

⁴⁾ Satra, s.r.o.

Recenzenti:

Ing. Jan Šíroky, Ph.D.
 Ing. Stanislav Toman

Návrh, simulace a vyhodnocení regulace podélného proudění vzduchu během požárního větrání v tunelovém komplexu Blanka

Design, Simulation and Evaluation of Longitudinal Airflow Velocity Control during Fire Ventilation in the Blanka Tunnel Complex

Článek popisuje návrh a implementaci proporcionálně-integračně-derivačních (PID) regulátorů podélného proudění vzduchu při požáru v tunelovém komplexu Blanka. Pro šíření kouřové vlečky při požáru je zásadní rychlé dosažení a spolehlivé udržování potřebného směru a rychlosti podélného proudění vzduchu v tunelu. Tato požadovaná rychlost podélného proudění vzduchu se liší v různých úsecích tunelu vlivem podélného sklonu, změn příčného průřezu, přítomnosti vjezdových a výjezdových ramp a v neposlední řadě ve způsobu odvodu kouře. Požadovaná rychlost proudění vzduchu se mění také v čase. Nejprve jsou zohledněny potřeby evakuace osob a následně potřeby zasahujících jednotek integrovaného záchranného systému (IZS). Vzhledem k uvedeným skutečnostem by bylo časově velmi náročné naladit PID regulátor během komplexních zkoušek před otevřením tunelu, proto byl k naladění regulátoru použit simulační model, který výrazně ušetřil čas s laděním regulátoru. Na simulačním modelu bylo rovněž možné otestovat nestandardní situace během provozu tunelu, jako např. výpadky zařízení nezbytných pro řízení požárního větrání.

Klíčová slova: požární větrání tunelu, PID regulátor, matematický model, podélná rychlost proudění vzduchu

The paper describes a design and implementation of proportional-integral-derivative (PID) controllers for airflow velocity control during fire ventilation of the already operated tunnel complex Blanka. The desired value and direction of longitudinal airflow velocity should be maintained in order to control the smoke propagation. The desired longitudinal airflow velocity is different for different sections of the tunnel due to the road gradient, cross-section area, occurrence of entrance and exit ramps and for the way of smoke extraction as well. The desired airflow velocity also changes in time. At first, a need of evacuation, and then requirements of emergency services are taken into account. For such a complex tunnel, it would be time consuming to tune the PID controller during the complex examinations before opening of the tunnel to traffic. For this reason, the simulation model was used for the tuning of the controller, which significantly saved time with the controller tuning. Moreover, the simulation model can be used for testing of extraordinary situations during the tunnel operation, e.g. failure of some equipment necessary for fire ventilation control.

Keywords: fire ventilation of the tunnel, PID controller, mathematical model, longitudinal airflow velocity

ÚVOD

Větrání v městských tunelech, v případě vzniku požáru, hraje významnou roli z hlediska úspěšnosti evakuace osob bez asistence IZS. Efektivně navržený systém požárního větrání a algoritmů pro řízení může výrazně prodloužit čas využitelný pro evakuaci osob z místa zasaženého požárem. Následně, po příjezdu jednotek IZS, velitel hasičského záchranného sboru (HZS) přebírá velení a v této fázi musí požární větrání zajistit bezpečný přístup k požáru.

STRUČNÝ POPIS TUNELOVÉHO KOMPLEXU BLANKA

Tunelový komplex Blanka tvoří severozápadní část Městského okruhu



Obr. 1 Situace umístění tunelu Blanka v městské zástavbě včetně označení vjezdů a výjezdů z tunelu; tunel je součástí severozápadní části Městského okruhu v Praze [2]

Fig. 1 Situation of the Blanka tunnel placement in urban areas, including indication of entrance and exit ramps of the tunnel; the tunnel is a part of the northwestern section of the Prague City Ring Road [2]

v Praze, jeho celková délka včetně paralelně napojených ramp je 6 382 m [1]. Jedná se o dvoutubusový tunelový komplex, který navazuje na již zprovozněné tunely – Strahovský a Mrázovku. Slavnostní uvedení tunelového komplexu Blanka do zkušebního provozu proběhlo 19. září 2015, přičemž výstavba tunelu trvala celkem 8 let. Tunelový komplex se skládá celkem ze tří navazujících tunelů, které mohou být při odstávkách zbylých tunelů provozovány samostatně – Bubenečský, Dejvický a Brusnický tunel. Poloha tunelu Blanka v městské zástavbě je zobrazena na obr. 1.

SYSTÉM POŽÁRNÍHO VĚTRÁNÍ TUNELU BLANKA

Z hlediska návrhu požárního větrání se ukázaly jako hlavní následující skutečnosti:

- ❑ Hustota dopravy s výskytem kongescí (neprůjezdnosti, dopravní zácpy): denní intenzita dopravy je přes 60 000 voz./den v obou směrech.
- ❑ Kromě hlavních portálů tunelu – Malovanka a Troja se v tunelu vyskytují další 2 vjezdy a 2 výjezdy v rámci křižovek Pražský most a U Vorlíků. Společně s křižovatkami Malovanka a Troja má tunelový komplex celkem 15 portálů (vjezdů a výjezdů).
- ❑ Tunel kříží metro, prochází pod hustou zástavbou s množstvím inženýrských sítí pod povrchem, což se promítlo do kombinace ražených a hloubených úseků. V hloubených úsecích pod ulicí Milady Horákové nebylo možné z prostorových důvodů vést souběžně s tunelem požární větrací kanál tak, jak tomu je v ražených úsecích.
- ❑ V Bubenečském a Brusnickém tunelu jsou úseky s 5% podélným sklonem, což se významně promítá do šíření kouře vlivem vztakových sil požáru (komínový efekt).

Požární větrání je založeno na rychlé detekci mimořádné události a okamžitým řízením směru a rychlosti podélného proudění vzduchu.

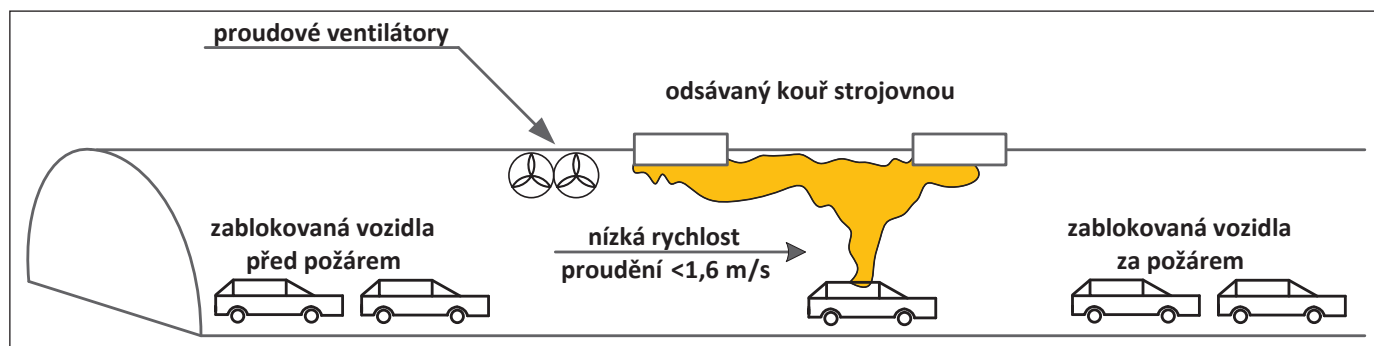
Detekce mimořádné události

Celý tunelový komplex je rozdělen na 125 detekčních úseků, ve kterých může být detekován požár. Délka detekčních úseků je 80 až 90 m. Pro detekci a lokalizaci místa požáru jsou v tunelu Blanka celkem tři druhy detektorů – liniový teplotní hlásič, kouřové detektory a video-detekce. Liniový teplotní hlásič je spolehlivý, ale často je zatížen zpožděním reakce při vyšších rychlostech podélného proudění. Po detekci liniovým teplotním hlásičem reaguje systém automaticky vyhlášením požáru. Kouřové detektory a video-detekce jsou využívány hlavně z důvodu rychlosti detekce a ověření místa požáru. K vyhlášení požárního poplachu dochází až po potvrzení dispečerem, protože oba způsoby detekce jsou náchylné na falešné alarmy, jako je průjezd nákladního vozidla s více než obvykle kouřícím výfukem [3]. V tunelovém komplexu Blanka je instalováno celkem 125 kouřových detektorů, kterým odpovídá 125 detekčních úseků. Kamer je v tunelu instalováno celkem 180. V případě detekce požáru v některé části tunelu dochází k okamžité uzavírací všech příjezdů do tunelu, naopak výjezdy zůstávají otevřené pro automobily, které zůstaly zablokovány v tunelu.

Požární větrání

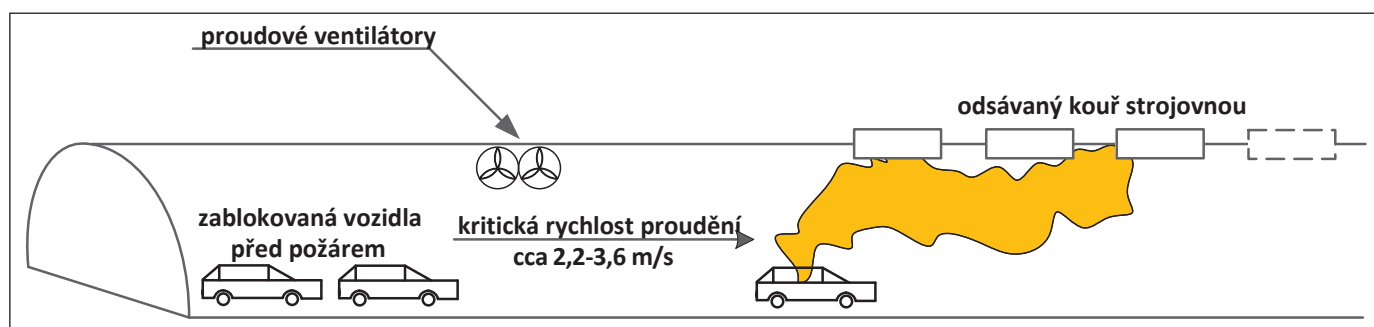
Během prvních minut je automaticky po vyhlášení požárního poplachu udržována rychlost proudění vzduchu ve směru jízdy vozidel (při běžném provozu) s ohledem na evakuaci osob před příjezdem a asistencí složek IZS. V městských tunelech s vysokou intenzitou dopravy a pravděpodobností kongesce je cílem ustálit rychlost proudění vzduchu na nízké hodnotě ve směru jízdy vozidel (1,1 až 1,6 m/s). Při takto nízkých rychlostech vzduchu má kouř tendenci šíření pod stropem tunelu v obou směrech.

Rychlá detekce je zásadní v klesajících úsecích s podélným sklonem -5 %. V ražených úsecích je v této fázi kouř odsáván přes 2 vyústky v klenbě tunelu, jedna před a jedna za místem požáru, jak je uvedeno na obr. 2.



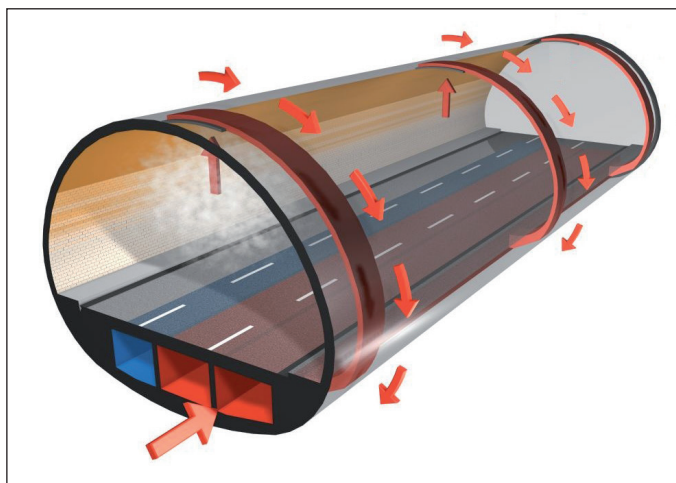
Obr. 2 Schéma odvodu kouře při požáru v I. fázi požárního větrání v ražených úsecích; nízká rychlost proudění vzduchu v tunelu se podle místa pohybuje od 1,1 do 1,6 m/s

Fig. 2 Diagram of the smoke exhaust during a fire in the phase I of the fire ventilation in the driven sections; low airflow velocity in the tunnel ranges from 1.1 to 1.6 m/s according to the location



Obr. 3 Schéma odvodu kouře při požáru ve II. fázi požárního větrání v ražených úsecích; kritická rychlost proudění v tunelu se podle místa pohybuje od 2,2 do 3,6 m/s

Fig. 3 Diagram of the smoke exhaust during a fire in the phase II of the fire ventilation in the driven sections; critical flow velocity in the tunnel ranges from 2.2 to 3.6 m/s according to the location



Obr. 4 Systém odvodu kouře v ražených úsecích; kouř je veden požárním kanálem pod vozovkou

Fig. 4 Smoke exhaust system in the driven sections; smoke is led through the fire exhaust duct under the roadway

V případě návrhového požáru, který odpovídá požáru nákladního vozidla, v určitém okamžiku vývoje začne kouř ohrožovat vozidla zablokovávaná ve směru jízdy za požárem. Nejpozději na povel velitele zásahu HZS aktivuje dispečer druhou fázi požárního větrání. V ražených úsecích se uzavírá klapka před požárem (na straně zablokovávaných vozidel) a otvírají se další dvě (ve dvoupruhových úsecích tunelu) až tři (ve třípruhových úsecích tunelu) ve směru jízdy. Strojovny odvádí kouř na maximální výkon.

Cílem druhé fáze požárního větrání je zabránit efektu zpětného vrstvení (tzv. backlayering), tedy zabránit šíření kouře na stranu stojících vozidel před požárem, a tím rovněž umožnit příjezd záchranných složek do tunelu. Obecně je známo, že při rychlostech proudění vzduchu vyšších, než je kritická rychlost proudění (vyšší než cca 2,2 m/s), se kouř šíří pouze ve směru proudění vzduchu. Cílem druhé fáze požárního větrání je odsát, pokud možno, co nejvíce zbylého kouře z tunelu. Požadovaná rychlost proudění vzduchu se tedy navýší na 2,2 až 3,6 m/s a rovněž se navýší i odsávaný průtok vzduchu strojovnou. Principiální schéma druhé fáze požárního větrání je zobrazeno na obr. 3.

Na základě doporučení pro požární bezpečnost tunelů České republiky vydané Ministerstvem dopravy ČR [4] by žádané rychlosti proudění vzduchu mělo být dosaženo do 3 až 5 minut a rychlost proudění vzduchu by se měla udržovat v pásmu $\pm 0,3$ m/s od žádané hodnoty. Zpětné proudění vzduchu proti směru jízdy je nepřípustné.

V tunelovém komplexu Blanka jsou uplatněny celkem tři způsoby odvodu kouře z tunelu:

- 1) V ražených úsecích je kouř odsáván nejprve vyústkami v klenbě tunelu, dále je veden skrze požární klapky požárním větracím kanálem pod vozovkou až k odváděcím axiálními ventilátorům ve strojovnách vzduchotechniky. Zde je extrahován z tunelu komínem do venkovního prostředí. Principiální schéma odvodu kouře v ražených úsecích je uvedeno na obr. 4 a obr. 5.
- 2) V hloubených úsecích je odvod kouře řešen hromadným odvodem, kdy místo několika vyústek je kouř odsáván pouze v jednom místě. Výlučně tak pro odvod kouře slouží v Dejvickém tunelu strojovny Špejchar a Prašný most. Principiální schéma hromadného odvodu kouře strojovnou je uvedeno na obr. 6.
- 3) V hloubených úsecích končících výjezdovým portálem je kouř odváděn čistě podélně bez využití axiálních ventilátorů ve strojovnách.



Obr. 5 Řídicím systémem dálkově ovládaná klapka, která je v zaústění každého ze svodů odvodu kouře do požárního větracího kanálu pod vozovkou

Fig. 5 Remotely controlled valve by the control system that is located in the fire exhaust duct under the roadway

Proudové ventilátory

K ovládání podélného proudění vzduchu v tunelovém komplexu Blanka slouží celkem 88 kusů proudových ventilátorů, které jsou umístěny po dvojicích nebo trojicích pod stropem tunelu. V tunelu Blanka jsou tři typy proudových ventilátorů, které se technicky liší výkonem motoru, průměrem oběžného kola a tahem ventilátoru. Z celkových 88 kusů proudových ventilátorů je 63 vybaveno soft startéry, které neumožňují plynulou regulaci otáček a umožňují ovládat ventilátory pouze způsobem start/stop. Zbylých 25 proudových ventilátorů má frekvenční měniče umožňující plynulou regulaci otáček.

Strojovny pro odvod kouře

Pro odvod kouře v případě požáru slouží hlavní axiální ventilátory ve strojovnách vzduchotechniky. V tunelu Blanka je celkem pět strojoven – Troja, Letná, Prašný most, Špejchar a Střešovice, které jsou vybaveny celkem 30 axiálními ventilátory s možností plynulé regulace otáček.

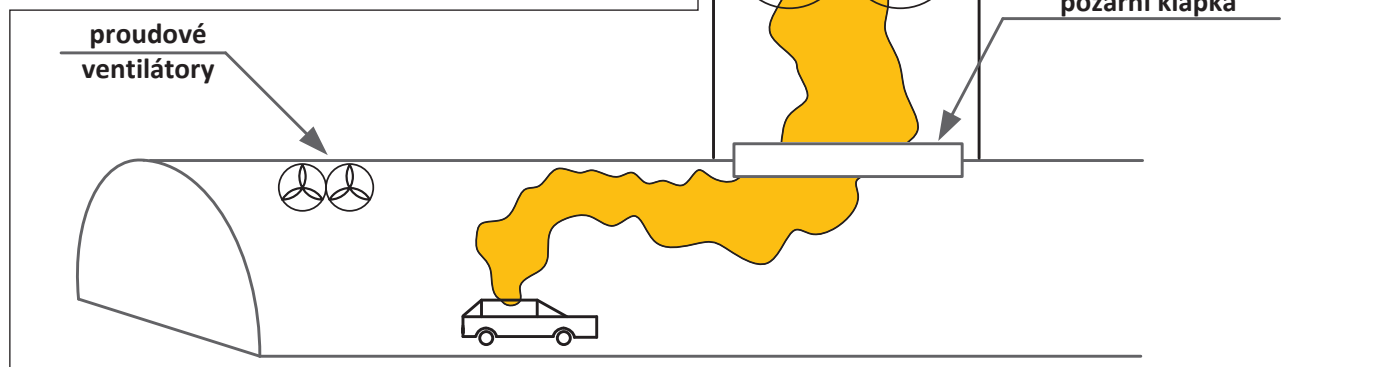
SIMULAČNÍ MODEL RYCHLOSTI PROUDĚNÍ VZDUCHU

Simulační model rychlosti proudění vzduchu umožňuje simulaci regulace podélné rychlosti proudění vzduchu v kterémkoli úseku tunelu. Pomocí modelu je možné nasimulovat mimořádné situace, které mohou během požáru nastat, např. zvýšená intenzita dopravy, porucha proudových ventilátorů atd. Jedná se o jednodimenzionální model, který je postaven na rovnicích kontinuity a Bernoulliho rovnicích.

Matematický model proudění byl popsán také v autorově článku [5], v uvedené publikaci se však pojednává o tzv. kvazi-stacionárním modelu proudění, kde se předpokládá ustálený stav rychlosti proudění, kde

Obr. 6 Schéma koncentrovaného odsávání kouře z tunelu: tento způsob odvodu kouře je uplatňován v hloubených úsecích a v ražených úsecích blízko strojoven; kouř je odváděn skrze jednu vícesegmentovou klapku umístěnou u stropu tunelu až k odvodním ventilátorům ve strojovnách, kde je extrahován z tunelu komínem do venkovního prostředí

Fig. 6 Diagram of the concentrated smoke exhaustion from the tunnel: this way of smoke exhaustion is applied in excavated sections and driven sections near ventilation machine rooms; the smoke is extracted through one multi-segment valve located by the tunnel ceiling to the exhaust fans in engine rooms, where it is extracted from the tunnel to the external environment through a chimney



je vlastní dynamika systému zanedbána. V tomto článku se budeme věnovat dynamickému modelu proudění, budeme tedy předpokládat, že rychlost proudění vzduchu v tunelu se mění v čase, tedy $\Delta v(t)/\Delta t \neq 0$.

Rovnice kontinuity

Tunelový komplex Blanka tvoří díky paralelně napojeným vjezdům a výjezdům sériově-paralelní síť, kde za zjednodušujícího předpokladu nestlačitelné kapaliny ($\rho = \text{konst.}$), který lze uplatnit pro Machovo číslo výrazně menší než 1 [6], platí rovnice kontinuity, tedy že součet vtékajících a vytékajících toků do, resp. z jednotlivých větví tunelu je roven nule:

$$\sum_i Q_i = 0 \quad (1)$$

Objemový průtok vzduchu v tunelu je dán součinem průřezu tunelu a rychlosti proudění vzduchu v jeho dané části:

$$Q_i = A_{r,i} v_i \quad (2)$$

Na obr. 7 nahoře je schematicky znázorněna výjezdová rampa tunelu. Pro tuto rampu lze formulovat rovnici kontinuity následovně:

$$Q_1 - Q_2 - Q_3 = 0 \quad (3)$$

Za předpokladu nestlačitelné tekutiny platí rovnice kontinuity i pro nestacionární proudění, kdy je průtok v tunelu časově proměnný [7], tedy:

$$\sum_i Q_i(t) = 0 \quad (4)$$

kde symbol t značí, že se jedná o časově proměnnou veličinu ($t \geq 0$).

Rovnice kontinuity platí také pro průtoky odsávané odvodními ventilátory ve strojovnách, viz obr. 7 dole, tedy:

$$Q_1(t) - Q_2(t) - Q_{vm}(t) = 0 \quad (5)$$

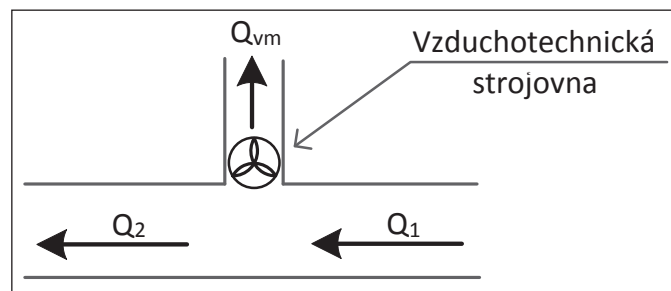
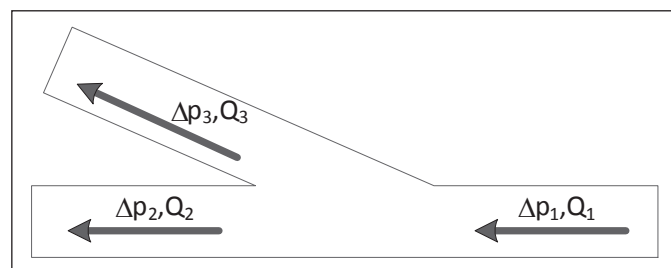
Rozšířená Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnicí pro úsek tunelu s konstantním průřezem je možné

vyjádřit v různých tvarech. Pro naše účely bude nejdůležitější použití rovnice v jejím rozšířeném tvaru, který je používán pro popis nestacionárního proudění reálné tekutiny a který zohledňuje vnější vlivy nuceného proudění a také tlakové ztráty třením a místními odpory [8], tedy:

$$\rho \int_0^L \frac{\partial v_i(s,t)}{\partial t} ds + \Delta p_{\text{loss},i} = \Delta p_{\text{gains},i} \quad (6)$$

Integrál v rovnici (6) popisuje dynamické chování vzduchu v tunelu, přičemž se integruje přes délku daného úseku tunelu. Druhý člen rovnice, $\Delta p_{\text{loss},i}$ označuje tlakové ztráty, které se v tunelu vyskytují – ztráty třením, místními odpory a v případě požáru také ztráta vzlakem, příp. expanzí požáru. Člen $\Delta p_{\text{gains},i}$ na pravé straně rovnice označuje tlakové zisky, tedy vnější síly, které způsobují nucené proudění. V silničních tu-



Obr. 7 Nahoře: schematické znázornění platnosti rovnice kontinuity pro toky vtékající, resp. vytékající z uzlových bodů; dole: objemové průtoky vzduchu v případě odsávání vzduchu, resp. kouře z tunelu

Fig. 7 Top: schematic representation of the validity of the continuity equation for streams flowing in, resp. out from the nodes; bottom: volume flow rates of air in the case of exhaustion of air, resp. smoke, from the tunnel

nelech se jedná o síly způsobené spuštěním proudových ventilátorů a síly vyvolané pístovým efektem vozidel.

Předpokládáme-li, že rychlost proudění vzduchu v daném úseku není závislá na vzdálenosti, pak je možné člen reprezentující dynamiku vzduchu integrovat a obdržet následující tvar rozšířené Bernoulliho rovnice:

$$\rho L_i \frac{dv_i}{dt} + \Delta p_{loss,i} = \Delta p_{gains,i} \quad (7)$$

Tlakové ztráty $\Delta p_{loss,i}$ lze obecně vyjádřit ve tvaru:

$$\Delta p_{loss,i} = \Delta p_{fric,i} + \Delta p_{area,i} + \Delta p_{fire,i} \quad (8)$$

zatímco tlakové zisky ve tvaru:

$$\Delta p_{gains,i} = \Delta p_{pist,i} + \Delta p_{fans,i} \quad (9)$$

Výraz $\Delta p_{fric,i}$ značí tlakovou ztrátu způsobenou třením vzduchu v tunelu. Velikost této tlakové ztráty závisí především na drsnosti stěn v tunelu. Výpočet tlakové ztráty třením je možné provést pomocí vzorce (10):

$$\Delta p_{fric,i} = \frac{1}{2} \rho \lambda \frac{L_i}{D_{h,i}} v_i^2 \quad (10)$$

Pro výpočet koeficientu tření λ byl zvolen vztah podle Swameeho [9], který upravil profesor Hemzal [10].

Výraz $\Delta p_{area,i}$ značí tlakové ztráty způsobené místními odpory. Mezi ztráty způsobené místními odpory řadíme ztráty vstupem a výstupem, dále ztráty způsobené změnou geometrie tunelu (zúžení, rozšíření profilu tunelu, spojování a dělení proudů za křižovatkou aj.). Obecně lze tyto tlakové ztráty vyjádřit vztahem:

$$\Delta p_{area,i} = \frac{1}{2} \rho \zeta v_i^2 \quad (11)$$

Součinitel ζ je koeficient místní tlakové ztráty a jeho výpočet závisí především na geometrii tunelu. Výpočet součinitelů místní ztráty pro různé případy změny geometrie tunelu lze nalézt např. v [8].

Zatímco tlaková ztráta expanzí požáru může být v případě příčného systému větrání zanedbána [11], tlakovou ztrátu vlivem vztaku požáru je možné zanedbat pouze v případě nulového sklonu vozovky v tunelu. Tuto ztrátu je možné přesně modelovat pouze pomocí trojrozměrných CFD simulací, přičemž modelování této tlakové ztráty jednodimenzionálně je pouze přibližné, přičemž v našem simulačním modelu používáme model navržený podle Opstada [12]. Model požáru je použitelný pouze pro případy podélného odvodu kouře z tunelu, tedy výjezdovými rampami. Model počítá s proměnnou teplotou během požáru i s jeho časově proměnným tepelným výkonem.

Člen $\Delta p_{pist,i}$ reprezentuje tlakový zisk, pístový efekt projíždějících vozidel, a k jeho výpočtu slouží vzorec [13]:

$$\Delta p_{pist,i} = \frac{1}{2} \rho \frac{\sum_k C_{v,k} A_{v,k} N_k}{A_{T,i}} (v_{car,i} - v_i)^2 \quad (12)$$

Automobily uvádějí vzduch v tunelu do pohybu, a pokud je jejich rychlost vyšší než rychlost proudění vzduchu ($v_{car} > v_i$), potom pístový efekt vyjadřuje tlakový zisk a v rovnicích se uvažuje s kladným znaménkem.

V opačném případě je nutno tento člen reprezentovat jako tlakovou ztrátu se záporným znaménkem [5]. V případě požáru jsou v tunelu vozidla, která vyjíždějí z tunelu za požárem (u nich můžeme předpokládat tlakový zisk), a také vozidla, která jsou před požárem zablokována, u nich předpokládáme nulovou rychlost a počítáme s nimi jako s tlakovou ztrátou. V modelu proudění vzduchu je uvažováno celkem se třemi druhy vozidel – osobní automobily, lehké nákladní a těžké nákladní automobily.

Výraz $\Delta p_{fans,i}$ vyjadřuje tlakovou změnu způsobenou spuštěním proudových ventilátorů v dané části tunelu. Velikost této tlakové změny závisí především na otáčkách daného ventilátoru, umístění ventilátoru v tunelu a na parametrech daného ventilátoru a lze ji vypočítat pomocí vzorce (13):

$$\Delta p_{fans,i} = \frac{\eta_{JF} \rho Q_{ref}^2}{n_{ref}^2 A_{JF} A_{T,i}} n_i^2 - \frac{\eta_{JF} \rho Q_{ref}}{n_{ref} A_{T,i}} n_i v_i \quad (13)$$

Proudové ventilátory mohou buď podporovat, nebo brzdít podélnou rychlost proudění vzduchu v tunelu, to odpovídá kladnému nebo zápornému znaménku tohoto členu.

V rovnicích pro výpočet tlakových ztrát v tunelu byla zanedbána tlaková ztráta způsobená převýšením portálů tunelu, protože výškové převýšení portálů tunelu Blanka je nevýznamné a tlaková ztráta způsobená tímto efektem je malá ve srovnání s jinými tlakovými ztrátami. Taktéž byl zanedbán vliv větru na portály tunelu, a to z důvodu příznivého zahloubení tunelu pod úroveň okolního terénu [5].

V případě paralelně napojených vjezdů a výjezdů je nutno uvažovat ještě s podmínkou rovnosti tlaku v odbočkách. Pro výjezdovou rampu tunelu, uvedenou na obr. 7 (nahoře) obdržíme následující soustavu Bernoulliho rovnic:

$$\begin{aligned} \rho L_1 \frac{dv_1}{dt} + \Delta p_{loss,1} + \rho L_2 \frac{dv_2}{dt} + \Delta p_{loss,2} &= \Delta p_{gains,1} + \Delta p_{gains,2} \\ \rho L_1 \frac{dv_1}{dt} + \Delta p_{loss,1} + \rho L_3 \frac{dv_3}{dt} + \Delta p_{loss,3} &= \Delta p_{gains,1} + \Delta p_{gains,3} \end{aligned} \quad (14)$$

Pomocí rovnic kontinuity a Bernoulliho rovnic je možné popsat aerodynamické chování celého tunelového komplexu Blanka, přičemž cílem je obdržet stavový popis nelineárního dynamického systému v explicitním tvaru:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{f}(\vec{v}(t)) + \vec{g}(\vec{v}(t))\vec{u}(t) \quad (15)$$

kde $\vec{v}$ označuje vektor, jehož jednotlivé složky reprezentují rychlosti proudění v_i v jednotlivých částech tunelu a $\vec{u}$ označuje vektor jednotlivých akčních veličin – počet proudových ventilátorů, které běží v dané části tunelu, $\vec{f}$ a $\vec{g}$ jsou nelineární funkce, které závisí na rychlostech proudění v jednotlivých částech tunelu.

Stavový popis ve tvaru (15) je možné využít pro simulaci rychlosti proudění v tunelu v závislosti na čase pomocí algoritmu ODE45 [14], který je používán pro numerické řešení soustav diferenciálních rovnic. Algoritmus ODE45 vyžaduje explicitní vyjádření vektoru derivací rychlosti proudění v každém časovém okamžiku. To je možné vyjádřit jako řešení soustavy lineárních rovnic, kde neznámými jsou derivace rychlosti proudění v čase. Rozšíříme-li soustavu rovnic (14) o derivovanou rovnici kontinuity, obdržíme soustavu tří lineárně nezávislých rovnic pro tři neznámé:

$$\begin{aligned} \rho L_1 \frac{dv_1}{dt} + \Delta p_{loss,1} + \rho L_2 \frac{dv_2}{dt} + \Delta p_{loss,2} &= \Delta p_{gains,1} + \Delta p_{gains,2} \\ \rho L_1 \frac{dv_1}{dt} + \Delta p_{loss,1} + \rho L_3 \frac{dv_3}{dt} + \Delta p_{loss,3} &= \Delta p_{gains,1} + \Delta p_{gains,3} \\ A_1 \frac{dv_1}{dt} - A_2 \frac{dv_2}{dt} - A_3 \frac{dv_3}{dt} &= 0 \end{aligned} \quad (16)$$

Tímto způsobem je tedy možné explicitně vyjádřit stavový popis celého tunelového komplexu, ve kterých jako stavové proměnné vystupují rychlosti proudění vzduchu v jednotlivých úsecích. Soustava je numericky řešitelná nástroji pro matematické výpočty jako MATLAB, MATHEMATICA apod.

Pro regulaci podélné rychlosti proudění vzduchu byl zvolen PID regulátor, jakožto jeden z nejpoužívanějších průmyslových regulátorů. Výhodou PID regulátoru je také fakt, že jeho algoritmus je možné implementovat do většiny dnes dostupných programovatelných logických automatů (PLC). PID regulátor byl nalaďen na základě simulačního modelu, který byl popsán v této části.

ALGORITMUS PID REGULÁTORU

Po vyjádření explicitního stavového popisu rychlosti proudění vzduchu v tunelu je možné do simulátoru implementovat PID regulátor pro regulaci žádané rychlosti proudění vzduchu. Cílem PID regulátoru je regulovat žádanou rychlost proudění vzduchu během I. a II. fáze požárního větrání před ohniskem požáru. Akční veličinou je žádaný počet proudových ventilátorů, které mají být spuštěny. Algoritmus diskrétního PID regulátoru je možné vyjádřit v následujícím tvaru:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \sum_{i=0}^t e(i) \Delta T + K_d \frac{e(t) - e(t-1)}{\Delta T} \quad (17)$$

Regulační odchylku je možno vypočítat následujícím způsobem:

$$e(t) = v_{ref}(t) - v(t) \quad (18)$$

Jedná se o zpětnovazební regulátor, přičemž schéma simulační regulační smyčky je zobrazeno na obr. 8. Zde je kromě matematického modelu a PID regulátoru zobrazen ještě poruchový signál, který není

zohledněn v matematickém modelu, např. vliv větru na portály tunelu, komínový efekt způsoben převýšením portálů tunelu, výpadek zařízení nutných pro regulaci atd.

Akční veličina regulátoru $u(t)$ je po výpočtu rozdělena mezi proudové ventilátory, které jsou pro regulaci k dispozici. Akční veličina může obecně nabývat reálných hodnot, protože pokud je pro regulaci k dispozici proudový ventilátor s frekvenčním měničem, je možné desetinnou část přerozdělit právě na tento proudový ventilátor. Díky potřebě chlazení motoru je nutné, aby ventilátor s frekvenčním měničem byl spuštěn alespoň na 30 procent nominálních otáček. Všechny proudové ventilátory v tunelu umožňují reverzní chod pro brzdění rychlosti proudění vzduchu. Pokud je hodnota $u(t)$ záporná, potom je spuštěn požadovaný počet ventilátorů v reverzním chodu.

Jak již bylo řečeno v kapitole „Koncept řízení požárního větrání tunelu Blanka“, je tunel Blanka rozdělen na 125 detekčních úseku pro lokalizaci požáru. Pro každý z detekčních úseků byl nalaďen samostatný PID regulátor, přičemž jednotlivé úseky se liší následujícími parametry:

- ☐ konstantami K_p , K_i a K_d regulátoru pro I. a II. fázi požárního větrání,
- ☐ požadovanými rychlostmi proudění vzduchu v I. a II. fázi požárního větrání,
- ☐ skupinou proudových ventilátorů, která může být během regulace použita,
- ☐ maximální a minimální přípustná hodnota akční veličiny $u(t)$,
- ☐ odsávaným množstvím vzduchu z tunelu pomocí strojoven v I. a II. fázi požárního větrání.

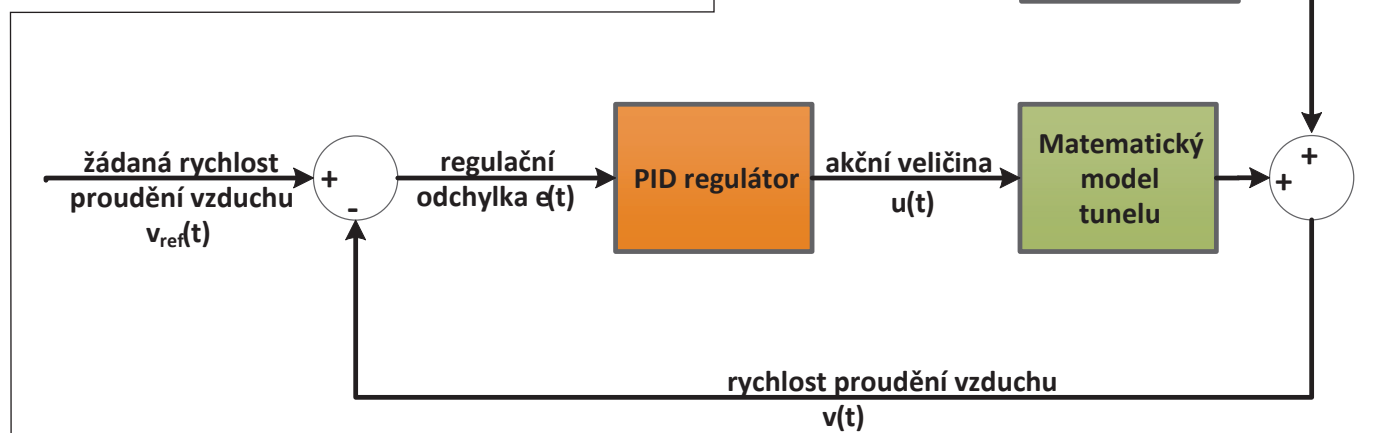
Během komplexních zkoušek bylo ověřeno, že derivační složka regulátoru nemá v tomto případě výrazný vliv na zrychlení regulace rychlosti proudění vzduchu, naopak je náchylná na šum a chyby měření. Z toho důvodu se derivační složka regulátoru nevyužívá ($K_d = 0$) a pro regulaci je použit pouze PI regulátor.

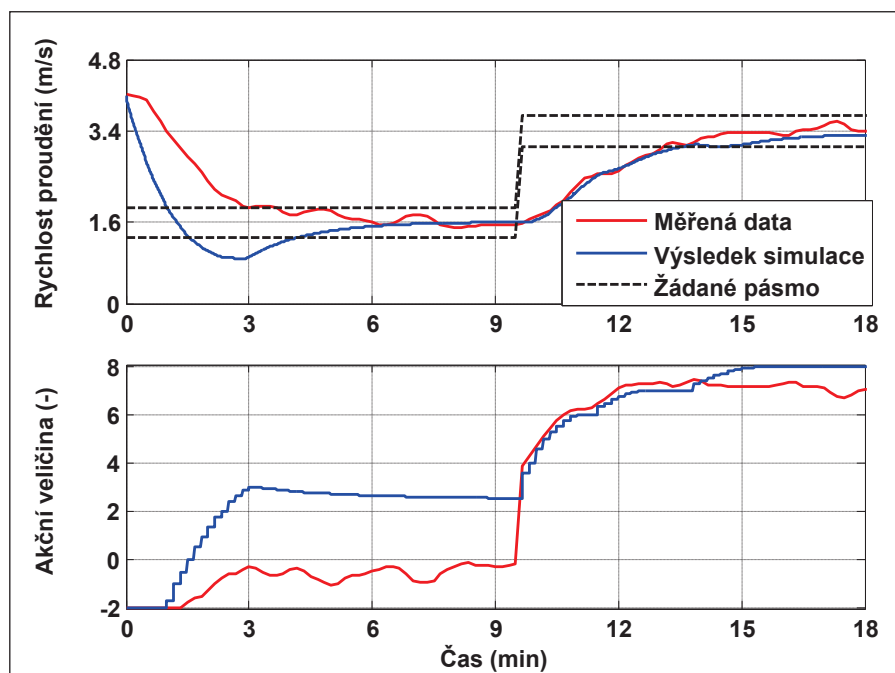
VÝSLEDKY REGULACE PODÉLNÉ RYCHLOSTI PROUDĚNÍ VZDUCHU BĚHEM KOMPLEXNÍCH ZKOUŠEK

Komplexní zkoušky tunelového komplexu Blanka probíhaly v několika etapách od zkoušek jednotlivých zařízení, přes zkoušky automatiky řízení až po součinnost veškerého technologického vybavení na mimořádnou událost.

Obr. 8 Schéma regulační smyčky PID regulátoru pro regulaci podélné rychlosti proudění vzduchu v tunelu; jedná se o simulační schéma, pomocí kterého je možné otestovat funkčnost PID regulátoru

Fig. 8 Diagram of the PID control loop for controlling the longitudinal airflow velocity in the tunnel; it is a simulation diagram, which allows to test the functionality of the PID controller





Obr. 9 Vyhodnocení regulace rychlosti proudění vzduchu PI regulátorem v úseku SM59 během komplexních zkoušek: červená křivka reprezentuje změřená data během zkoušky a modrá křivka data, která vzešla jako výsledek simulace rychlosti proudění; čárkovanou čarou je vykresleno žádané pásmo rychlosti proudění vzduchu během regulace, v tomto pásmu by se měla rychlost proudění vzduchu během regulace udržovat

Fig. 9 Evaluation of the airflow velocity control by PI controller in the section SM59 during the comprehensive testing: red curve represents the data measured during the test and the blue curve data, which came as a result of the airflow simulation; the dashed line marks the region of airflow velocity desired during the controlling, airflow velocity should be maintained within this region during the controlling

Regulátor podélného proudění byl prověřován v rámci 2. etapy komplexních zkoušek *Automatika řízení podélného větrání*. Funkčnost regulace rychlosti proudění vzduchu byla testována ve všech úsecích a zároveň proběhla optimalizace parametrů nastavení regulátoru. Během zkoušek se ukázalo, že nastavení parametrů pomocí simulace vyžadovalo jen minimum úprav a ve výsledku uspořilo mnoho dní zkoušení na skutečném díle.

V této části ukážeme výsledek regulace rychlosti proudění vzduchu pomocí PI regulátoru bez přítomnosti zdroje požáru a jedoucích či zablokovaných vozidel v tunelu. Vybraný detekční úsek má označení SM59 a nachází se v severním tunelovém tubusu, v hloubené tunelové části Brusnice, tedy blízko výjezdového portálu Malovanka. Jedná se o úsek, ve kterém není během požáru využito aktivního odsávání kouře strojovou, kouř je odváděn z tunelu výjezdovou rampou Malovanka. Na obr. 9 je uveden výsledek regulace rychlosti proudění vzduchu během I. a II. fáze požárního větrání včetně srovnání s matematickým modelem rychlosti proudění vzduchu. Zkouška trvala celkem 18 minut, z toho prvních více než 9 minut trvala I. fáze požárního větrání a požadovaná rychlost proudění v první fázi byla 1,6 m/s a ve druhé fázi byla žádaná rychlost navýšena na 3,4 m/s. Cílem regulace je dosáhnout cílové hodnoty rychlosti proudění vzduchu v co nejkratším čase a poté ji udržovat v pásmu $\pm 0,3$ m/s od požadované hodnoty. Zpětné proudění vzduchu proti zablokovaným vozidlům před požárem (odpovídá záporné rychlosti proudění vzduchu) je nepřipustné.

Na horním grafu v obr. 9 je zobrazen vývoj rychlosti proudění vzduchu $u(t)$ během regulace a na dolním grafu je zobrazena akční veličina $u(t)$, tedy počet proudových ventilátorů, které se mají spustit. Připomeňme,

že záporná hodnota $u(t)$ označuje situaci, kdy proudové ventilátory běží v reverzním chodu a brzdí podélnou rychlost proudění vzduchu v tunelu. Červená křivka reprezentuje reálně změřená data během zkoušky, modře je potom vykreslen výsledek simulace regulace na matematickém modelu.

Počáteční rychlost proudění během zkoušky byla 4,1 m/s, což je relativně vysoká hodnota a může reprezentovat vliv pístového efektu vozidel, která vyjíždějí z tunelu. Ze zkušebního provozu tunelového komplexu Blanka víme, že rychlosti proudění během ranní a odpolední špičky dosahují podobných rychlostí. Proudové ventilátory dokázaly zbrzdít rychlost proudění na požadovanou hodnotu $1,6 \pm 0,3$ m/s během cca 3 minut. Žádané rychlosti proudění ve II. fázi požárního větrání bylo dosaženo do cca 5 minut a během regulace nedošlo k nežádoucímu otočení směru rychlosti proudění proti směru jízdy vozidel.

Ačkoliv srovnání matematického modelu a reálně změřené rychlosti proudění vzduchu v tunelu vykazuje především v I. fázi poměrně velkou chybu, která může být způsobena zanedbáním komínového efektu, vlivu větru na portály tunelu, popř. nepřesným modelem vlivu proudových ventilátorů v brzděném chodu, výsledek je pro účely ladění PI regulátoru podélné rychlosti proudění vzduchu uspokojivý a dokazuje, že pokud je k dispozici dostatečně přesný matematický model

proudění vzduchu, je možné tento model použít k návrhu regulátorů pro požární větrání, což ušetří mnoho času s laděním regulátorů během komplexních zkoušek. Navíc je nutné si uvědomit, že pro modelování dynamiky proudění vzduchu v tunelu nebylo využito reálně změřených dat rychlosti proudění vzduchu a dynamika proudění vzduchu byla modelována pouze na základě fyzikálních rovnic.

ZÁVĚR

Článek popisuje návrh PID regulátoru na základě dynamického matematického modelu proudění vzduchu v tunelu, který je založen na Bernoulliho rovnicích a rovnicích kontinuity. Díky dostatečně přesnému modelu proudění vzduchu bylo možné naladit regulátor ještě před začátkem komplexních zkoušek, což při komplexních zkouškách ušetřilo mnoho času s nastavováním regulátoru. Navíc bylo na simulacním modelu možné otestovat nestandardní události, které mohou během regulace podélné rychlosti proudění nastat, jako např. výpadek ventilátoru.

Kontakt na autory: jan.sulc.2@cvut.cz (návrh PID regulátoru); jiri.zaparka@email.cz (návrh systému požárního větrání)

Poděkování: Vývoj simulátoru regulace podélného proudění vzduchu tunelu Blanka byl vyvíjen ve spolupráci se společnostmi FERAMAT CYBERNETICS s. r. o. a SATRA s.r.o. Autoři by také rádi poděkovali firmě ELTODO a.s., která implementovala navržený regulátor do PLC. Práce byla částečně financována z projektu Univerzitního centra energeticky efektivních budov ČVUT, z interního grantu ČVUT SGS16/232/ /OHK3/3T/13 a z projektu Norských fondů v rámci programu CZ07 – Program spolupráce škol a stipendia.

Použité veličiny:

$A_{r,i}$	průřez tunelu v jeho dané části [m ²]
A_{jF}	průřez daného ventilátoru [m ²]
$C_{v,k} \cdot A_{v,k}$	upravená čelní plocha vozidel typu „k“ [m ²]
$D_{h,i}$	hydraulický průměr tunelu v dané části [m]
$e(t)$	regulační odchylka při požární regulaci PID regulátorem v daném čase t [m.s ⁻¹]
f, g	nelineární vektorová pole funkcí, které závisí na rychlostech proudění vzduchu v daných částech tunelu
K_p	proporcionální konstanta PID regulátoru [-]
K_i	integrační konstanta PID regulátoru [-]
K_d	derivační konstanta PID regulátoru [-]
L_i	délka části tunelu [m]
N_k	ekvivalentní počet vozidel daného typu „k“ v dané části tunelu [-]
n_i	otáčky daného ventilátoru, který běží v dané části tunelu [s ⁻¹]
n_{ref}	jmenovité otáčky daného ventilátoru [s ⁻¹]
Q_i	objemový průtok vzduchu v dané části tunelu [m ³ .s ⁻¹]
Q_{vm}	objemový průtok vzduchu odsávaný z tunelu strojovnou [m ³ .s ⁻¹]
Q_{ref}	jmenovitý průtok vzduchu daného ventilátoru [m ³ .s ⁻¹]
$\Delta p_{loss,i}$	tlakové ztráty v dané části tunelu [Pa]
$\Delta p_{gains,i}$	tlakové zisky v dané části tunelu [Pa]
Δp_i	celková tlaková změna v dané části tunelu [Pa]
$\Delta p_{pist,i}$	tlakový zisk vyvolaný pístovým efektem vozidel [Pa]
$\Delta p_{fans,i}$	tlakový zisk vyvolaný spuštěním proudových ventilátorů [Pa]
$\Delta p_{fric,i}$	tlaková ztráta vyvolaná třením vzduchu [Pa]
$\Delta p_{area,i}$	tlaková ztráta způsobená místními odpory [Pa]
$\Delta p_{fire,i}$	tlaková ztráta způsobená vzlakem požáru [Pa]
Δt	časový krok regulátoru [s]
$u(t)$	akční zásah v daném časovém okamžiku, jedná se o požadovaný počet spuštění proudových ventilátorů
v_i	střední rychlost proudění vzduchu v dané části tunelu [m.s ⁻¹]
$v_{car,i}$	rychlost jízdy dopravního proudu v dané části tunelu [m.s ⁻¹]

$v_{ref}(t)$	žádaná hodnota rychlost proudění vzduchu při požární regulaci v daném čase t [m.s ⁻¹]
λ	koeficient tření [-]
η_{jF}	účinnost přeměny tahu na tlak proudového ventilátoru [-]
ρ	hustota vzduchu v tunelu [kg.m ⁻³]
ζ	koeficient místní tlakové ztráty [-]

Použité zdroje:

- [1] O tunelovém komplexu Blanka [online]. Dostupné z: <http://www.praha.eu/jnp/cz/doprava/automobilova/tunelblanka>
- [2] SATRA, s. r. o. *Co přinesla Blanka?* [online]. Dostupné z: <http://www.tunel-blanka.info/>
- [3] NCHRP. Design Fires in Road Tunnels. National Academy of Sciences, 2011.
- [4] POSPÍŠIL, P. Metodický pokyn: Větrání silničních tunelů. Praha: Ministerstvo dopravy – Odbor pozemních komunikací, 2013.
- [5] ŠULC, J. a FERKL, L. Návrh algoritmů provozního větrání tunelu Blanka. *Vytápění, větrání, instalace*. 2015, roč. 24, č. 4, s. 178–183. ISSN 1210-1389.
- [6] DRIKAKIS, D. a RIDER, W. *High-Resolution Methods for Incompressible and Low-Speed Flows*. Springer, 2005.
- [7] FRAUENFELDER, P. a HUBER, P. *Introduction to Physics: Mechanics, Hydrodynamics, Thermodynamics*. Pergamon, 1966.
- [8] JEŽEK, J., VÁRADIOVÁ, B. a ADAMEC, J. *Mechanika tekutin*. České vysoké učení technické, 2000.
- [9] SWAMEE, P. a JAIN, A. Explicit Equations for Pipe-Flow Problems. *Journal of the Hydraulics Division*. 1976, s. 657–664.
- [10] HEMZAL, K. Součinitel tření při proudění tekutin – komparace vztahů. *Vytápění, větrání, instalace*. 2003, roč. 12, č. 1, s. 30–32.
- [11] CETU. *Dossier pilote des tunnels équipements*. č. 4., 1. Listopad 2003.
- [12] OPSTAD, K., AUNE, P. a HENNING, J.E. Fire Emergency ventilation capacity for road tunnels with considerable slope. In: *Proceedings of the 9th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*. s. 535–543, Aosta, 1997.
- [13] POŘÍZEK, J. Simulace 1-D proudění v portálovém objektu tunelu Blanka. *Vytápění, větrání, instalace*. 2007, roč. 16, č. 2, s. 83–88.
- [14] CEILER, F.E. a KOFMAN, E. *Continuous System Simulation*. Springer, 2006.
- [15] SATRA, S. R. O. Datový archiv společnosti. ■

NOTUS-R

Regulátory konstantního průtoku vzduchu

- Efektivní řešení regulace průtoku vzduchu VZT systémů s jednoduchým nastavením
- Průtok vzduchu 60-3950 m³/h, rychlost proudění 3-9 m/s, pracovní tlak 50-1000 Pa
- Servopohon 24V, 0-10V nebo 230V, On/Off
- Nastavení průtoku ruční nebo servopohonem

