

Ing. Jan ŠULC¹⁾
doc. Ing. Lukáš FERKL, Ph.D.²⁾

¹⁾ČVUT v Praze, Univerzitní centrum energeticky efektivních budov; ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra řídicí techniky;
Feramat Cybernetics, s.r.o.

²⁾ČVUT v Praze, Univerzitní centrum energeticky efektivních budov

Recenzenti:

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

Návrh algoritmů řízení provozního větrání tunelu Blanka



Design of Algorithms for Control of Operational Ventilation of Tunnel Blanka

Tunelový komplex Blanka se svojí délkou téměř 5,5 km představuje nejdelší městský tunel ve střední Evropě a nejdelší silniční tunel v České republice. Příspěvek popisuje návrh a implementaci algoritmů řízení provozního větrání tunelového komplexu Blanka, který je součástí severozápadní části Městského okruhu v Praze. Algoritmy řízení jsou navrženy na základě fyzikálních modelů s ohledem na kvalitu vnitřního i vnějšího prostředí tunelu. Navíc je kladen důraz na snížení spotřeby elektrické energie.

Klíčová slova: provozní větrání tunelu, automatická regulace, algoritmus řízení, matematická optimalizace

The Blanka tunnel complex represents with its length of 5,5 km the longest city tunnel in the Central Europe and the longest road tunnel in the Czech Republic. The paper describes design and implementation of control algorithms for operational ventilation of tunnel complex Blanka which will be a part of northwest section of the Prague city ring road. The control algorithms are designed on the basis of physical models, taking into account internal and external environment of the tunnel. In addition, the reduction of electrical energy consumption is emphasized.

Keywords: operational ventilation of tunnel, automatic control, control algorithm, mathematical optimization

ÚVOD

Větrání představuje jednu z nejdůležitějších bezpečnostních technologií v silničních tunelech. Je to nezbytné opatření v případě vzniku požáru, hraje ale také klíčovou roli z hlediska řízení kvality vnitřního i vnějšího prostředí tunelu. Zejména v tunelech, které se nacházejí v městské zástavbě, je kladen zvýšený požadavek na ochranu vnějšího prostředí před emisí automobilových zplodin z tunelu. Na druhou stranu je větrání v tunelu jedna z nejnáročnějších technologií z hlediska spotřeby elektrické energie. Náklady na elektrickou energii se mohou u silničního tunelu vyšplhat na desítky milionů korun ročně. I proto je snížení celkové spotřeby elektrické energie tunelu, byť jen o jednotky procent ročně, velmi žádoucí.

Tunelový komplex Blanka je stavbou, která nemá v České republice obdoby. Stavba představuje nejdelší silniční tunel v České republice se čtyřmi mimoúrovňovými křižovatkami (Malovanka, Prašný most, U Vorlíků a Troja) s celkovou délkou téměř 5,5 km. Jen pro srovnání, doposud nejdelší silniční tunel v ČR, tunel Panenská na dálnici D8, měří „pouhých“ 2,2 km [1]. Předpokládá se, že náklady na elektrickou energii provozu tunelu budou výrazně vyšší než u ostatních tunelů, a proto byla v tunelu Blanka projektantem požadována optimalizace provozního větrání, která sníží energetické náklady větrání na minimum.



Obr. 1 Situace umístění tunelu Blanka v městské zástavbě. Tunel je součástí severozápadní části Městského okruhu v Praze [22]

SYSTÉM VĚTRÁNÍ TUNELU

Tunel Blanka disponuje polo-příčným systémem větrání. Součástí podélného systému větrání jsou proudové ventilátory, které podporují podélnou rychlost proudění vzduchu v tunelu. Tunel je vybaven celkem



Obr. 2 Nahoře: Proudové ventilátory v tunelu Blanka jsou umístovány obvykle po dvojicích nebo trojicích u stropu tunelu. Dole: Trojice axiálních ventilátorů ve strojovně vzduchotechniky, součást příčného systému větrání [2]

88 kusy proudových ventilátorů, které jsou umístěny po dvojicích nebo trojicích u stropu 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, a tudíž neumožňují plynulou regulaci otáček. Zbylých 25 kusů proudových ventilátorů má frekvenční měniče umožňující plynulou regulaci otáček.

Součástí příčného systému větrání tunelu jsou hlavní axiální ventilátory ve strojovnách vzduchotechniky. V tunelu Blanka jsou vystavěny celkem tři strojovny (Troja, Letná a Střešovice) s celkem 23 axiálními ventilátory, které zajišťují přívod čerstvého a odvod znečištěného vzduchu z tunelu. Ventilátory, které zajišťují přívod čerstvého vzduchu do tunelu, jsou vybaveny soft startéry neumožňující plynulou regulaci. Naopak, ventilátory sloužící pro odvod znečištěného vzduchu z tunelu mají frekvenční měniče s možností plynulé regulace otáček.

Pro provozní větrání je v tunelu k dispozici ještě strojovna Malovanka, která je vybavena ventilátorem pro převod znečištěného vzduchu ze severního do jižního tubusu.

KONCEPT ŘÍZENÍ PROVOZNÍHO VĚTRÁNÍ

Jednotlivé technologie tunelu (osvětlení, signalizace, čerpací stanice apod.) jsou obsluhovány řídicím systémem, který tvoří programovatelné logické automaty (PLC). PLC ovládají také všechna vzduchotechnická zařízení tunelu (proudové ventilátory a hlavní ventilátory) a tvoří nižší vrstvu celého řídicího systému vzduchotechniky. Nadřazený systém regulace provozního větrání v tunelu se označuje jako expertní systém. Řídicí a expertní systém si vyměňují provozní informace přes rozhraní, prostřednictvím kterého jsou expertnímu systému v pravidelných intervalech zaslána provozní data (rychlost proudění vzduchu, koncentrace škodlivin atd.) a expertní systém pak řídicímu systému zaslává požadavek na spuštění jednotlivých akčních členů vzduchotechnického systému.

Provozní větrání tunelu Blanka je navrženo tak, aby byly zajištěny provozní podmínky uvnitř tunelu (koncentrace škodlivin a opacita – viditelnost) a zároveň bylo chráněno prostředí mimo tunel – městská zástavba, to vše při minimalizaci nákladů na elektrickou energii.

S výrazným nárůstem počtu automobilů s katalyzátory a zpříšňováním emisních norem EURO není hrozba oxidu uhelnatého (CO) v dálničních tunelech tak vysoká jako v devadesátých letech. V tunelech znamená mnohem větší hrozbu koncentrace oxidů dusíku (NO_x). Výfukové plyny automobilů v tunelu, a to především diesellových, přispívají také ke zhoršování viditelnosti v tunelu. Veličina, která sleduje úroveň viditelnosti v tunelu, se nazývá opacita a platí, že čím vyšší je hodnota opacity, tím horší je viditelnost v tunelu, neboť opacita je převrácená hodnota propustnosti světla.

Pro řízení provozního větrání je nutné měřit následující fyzikální veličiny:

- rychlost proudění vzduchu v tunelu,
- koncentraci škodlivin (opacita, oxidy dusíku),
- intenzitu a rychlost dopravního proudu, skladbu dopravy.

Rychlost proudění vzduchu v tunelu se vyhodnocuje ultrazvukovými senzory rychlosti proudění [3]. Koncentrace oxidů dusíku a opacita v tunelu jsou vyhodnocovány senzory, které pracují na principu diferenční optické absorpční spektroskopie, kdy se vyhodnocuje spektrum světelného signálu vyslaného vysílačem a přijatého přijímačem. Tímto způsobem je možné vyhodnotit odděleně koncentrace oxidu dusnatého NO a dusičitého NO₂ [4]. Dopravní informace se vyhodnocují jako kombinace ze dvou nezávislých systémů – systému indukčních smyček a kamerového systému.

Provozní větrání tunelu může pracovat v několika režimech [5]:

1) Přirozené proudění

Během tohoto stavu je automatická regulace vypnuta. Tunel je provětráván působením pístového účinku vozidel a v tunelu je zajištěna požadovaná kvalita vnitřního ovzduší. Při tomto stavu nejsou kladeny požadavky na ochranu vnějšího prostředí v okolí tunelu. Během provozu se bude tento stav vyskytovat o víkendech, svátcích a v nočních hodinách pracovních dnů.

2) Větrání k zajištění koncentrace v tunelu – 0. stupeň ochrany

Přechod do tohoto stavu provozního větrání je realizován na základě překročení limitních hodnot koncentrací škodlivin v tunelu uvedených v tab. 1.

Tab. 1 Limitní hodnoty koncentrací škodlivin v tunelu Blanka

Veličina	Limitní hodnota
Oxidy dusíku (NO + NO ₂)	10 mg/m ³
Opacita	0,005 m ⁻¹

Limitní hodnoty škodlivin v tunelu byly stanoveny na základě doporučení silniční asociace PIARC [6] a podle CETU [7] tak, aby byly v souladu s právními předpisy ČR.

Automatická regulace musí během tohoto stavu zajistit regulaci podélné rychlosti proudění vzduchu v tunelu tak, aby se koncentrace škodlivin v tunelu držely v tolerančním pásmu +10 % od limitní hodnoty koncentrací.

3) Větrání k zajištění prostředí mimo tunel – I. stupeň ochrany

V tomto stavu je brán ohled na prostředí v okolí mimoúrovňové křižovatky Malovanka. Automatická regulace musí pomocí kombinace brzdného účinku proudových ventilátorů a odvodu vzduchu strojovny zajistit požadovaný průtok vzduchu z tunelu do oblasti MÚK Malovanka tak, aby byl snížen odvod zplodin z tunelu.

4) Větrání k zajištění prostředí mimo tunel – II. stupeň ochrany

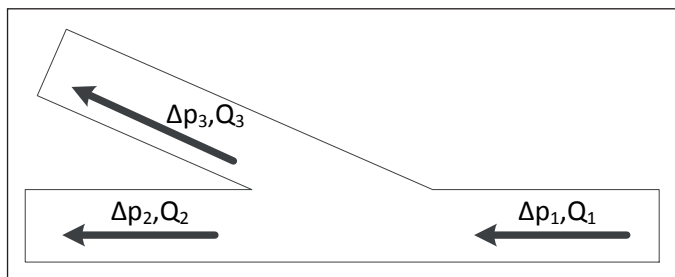
Pokud je systém provozován ve stavu II. stupně ochrany, je úkolem automatické regulace a řízeného větrání minimalizovat odvod znečištěného vzduchu ze všech výjezdových portálů proudovými ventilátory v kombinaci s odvodem strojovny při optimální spotřebě. Ideální stav lze popsat tak, že všemi výjezdovými i vjezdovými portály je do tunelu přiváděn venkovní vzduch, který je odváděn pouze strojovny, a to z důvodu rozptýlení znečišťujících látek ve vyšších úrovních atmosféry. Provozní stav II. stupeň ochrany je energeticky nejnáročnější [9]. Během jednoletého provozu bude tento stav spouštěn pouze v dopravních špičkách pracovních dnů. Z důvodu vysoké spotřeby elektrické energie se předpokládá, že poté bude tento stav iniciován na základě měření intenzity dopravy v tunelu v kombinaci s venkovním měřením koncentrace oxidů dusíku v oblasti MÚK Malovanka a bude spouštěn jen ve výjimečných případech.

MATEMATICKÝ MODEL PROUDĚNÍ

Automatická regulace provozního větrání využívá matematického modelu proudění vzduchu v tunelu. Pro popis proudění vzduchu v tunelu byl zvolen jednodimenzionální model proudění založený na Kirchhoffových zákonech pro dynamiku tekutin [16]. Kirchhoffovy zákony pro dynamiku tekutin jsou analogií Kirchhoffovým zákonům v elektrotechnice [10].

První Kirchhoffův zákon

Prvním Kirchhoffovým zákonem je zákon zachování hmotnosti – rovnice kontinuity. V tomto zákonu je elektrický proud analogií hmotnostního



Obr. 3 Schematické vysvětlení Kirchhoffových zákonů pro dynamiku tekutin [16]

průtoků a zákon říká, že součet hmotnostních průtoků vzduchu vtékajících a vytékajících do, resp. z uzlu je roven nule. Předpokládáme-li ale, že hustoty vtékajícího a vytékajícího vzduchu jsou stejné, pak stejná rovnice platí i pro objemový průtok.

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

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

$$Q = A_T \cdot v_{air} \quad (2)$$

Na obr. 3 je schematicky znázorněna mimoúrovňová křižovatka tunelu. Pro tuto křižovatku lze formulovat první Kirchhoffův zákon následovně:

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

Druhý Kirchhoffův zákon

Druhým Kirchhoffovým zákonem je zákon pro smyčku. V tomto případě je elektrické napětí analogií tlaku a platí, že součet všech tlakových změn (tlakových ztrát a zisků) v jednoduchých smyčkách je roven nule. Tlakovou změnou se myslí rozdíl mezi celkovými tlaky na začátku a konci daného úseku. Tuto skutečnost lze popsat jednoduchým vzorcem:

$$\sum_i \Delta p_i = 0 \quad (4)$$

kde Δp_i je součet všech tlakových účinků (zisků a ztrát) v dané části tunelu.

V křižovatce zobrazené na obr. 3 nalezneme dvě jednoduché smyčky (větve), které se uzavírají přes vnější prostředí tunelu. Pro ně platí následující soustava rovností:

$$\begin{aligned} \Delta p_1 + \Delta p_2 &= 0 \\ \Delta p_1 + \Delta p_3 &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

V silničních tunelech se uplatňuje několik vlivů, které ovlivňují tlakové podmínky v dané části tunelu. Jedná se jednak o tlakové zisky, které zvyšují celkový tlak v tunelu, a také o tlakové ztráty, které celkový tlak snižují. Tlakový rozdíl v daném úseku tunelu Δp_i , který vystupuje v rovnicích (5), je možné rozepsat následovně:

$$\Delta p_i = \pm \Delta p_{pist} \pm \Delta p_{fans} - \Delta p_{fric} - \Delta p_{area} - \Delta p_{mom} \quad (6)$$

Jednotlivé tlakové členy v rovnici (6) závisí na rychlosti proudění vzduchu v tunelu a lze je vyjádřit přibližnými vzorci.

Člen Δp_{pist} reprezentuje pístový efekt projíždějících vozidel a k jeho výpočtu slouží vzorec (7)

$$\Delta p_{pist} = \frac{1}{2} \rho \frac{\sum_i C_v A_v N_i}{A_T} (v_{car} - v_{air})^2 \quad (7)$$

Automobily uvádějí vzduch v tunelu do pohybu, a pokud je jejich rychlost vyšší než rychlost proudění vzduchu ($v_{car} > v_{air}$), 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 [11]. V modelu proudění vzduchu je uvažováno celkem se třemi druhy vozidel – osobní automobily, lehké nákladní a těžké nákladní automobily.

Výraz Δp_{fans} vyjadřuje tlakovou změnu způsobenou spuštěním proudových ventilátorů v tunelu. Velikost této tlakové změny závisí především na otáčkách daného ventilátoru, umístění ventilátoru v tunelu a na katalogových parametrech daného ventilátoru.

$$\Delta p_{fans} = \frac{\eta_{JF} \rho Q_{ref}^2}{n_{ref}^2 A_{JF} A_T} n^2 + \frac{\eta_{JF} \rho Q_{ref}}{n_{ref} A_T} n \cdot v_{air} \quad (8)$$

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

Výraz Δp_{fric} značí tlakovou ztrátu způsobenou třením vzduchu v tunelu. Tato tlaková ztráta je, co se do velikosti týče, nejdůležitější hodnotou pro přesnou tvorbu matematického modelu proudění vzduchu v tunelu. Velikost tlakové ztráty závisí především na drsnosti stěn v tunelu. Výpočet tlakové ztráty třením je možné provést pomocí vzorce (9)

$$\Delta p_{fric} = \lambda \frac{L}{D_h} \frac{\rho}{2} v_{air}^2 \quad (9)$$

Pro výpočet koeficientu tření λ byl zvolen vztah podle Swameeho [12], který upravil profesor Hemzal [13].

Výraz Δp_{area} značí tlakové ztráty způsobené místními odpory. Mezi ztráty způsobené místními odpory řadíme ztráty způsobené změnou geometrie tunelu (zúžení, rozšíření profilu tunelu, spojování a dělení proudů za křižovatkou aj.). Obecně lze tyto tlakové ztráty vyjádřit vztahem

$$\Delta p_{area} = \frac{1}{2} \rho \xi v_{air}^2 \quad (10)$$

Koeficient ξ je koeficient místní tlakové ztráty a jeho výpočet závisí především na geometrii tunelu. Výpočet koeficientů místní tlakové ztráty pro různé případy změny geometrie tunelu lze nalézt např. v [14].

Poslední člen v rovnici (5), Δp_{mom} , značí lokální zpoždění vzduchu v tunelu, které reprezentuje vlastní dynamiku vzduchu v tunelu [15]

$$\Delta p_{mom} = \rho L \frac{dv_{air}}{dt} \quad (11)$$

V rovnicích výsledného dynamického tlaku v tunelu byla zanedbána tlaková změna polohové energie způsobená převýšením portálů tunelu, protože výškové převýšení portálů tunelu Blanka je nevýznamné a tlaková změna způsobená tímto efektem je malá ve srovnání s jinými tlakovými změnami. Taktéž byl zanedbán vliv větru na portály tunelu, a to z důvodu příznivého zahloubení tunelu pod úroveň okolního terénu [11].

Pomocí Kirchhoffových zákonů je možné popsat aerodynamické chování celého tunelového komplexu Blanka a vytvořit tak soustavu nelineár-

ních diferenciálních rovnic, ve kterých jako neznámé vystupují rychlosti proudění vzduchu v jednotlivých úsecích. Soustava je numericky řešitelná nástroji pro matematické výpočty jako MATLAB, MATHEMATICA apod.

ALGORITMUS ŘÍZENÍ PROVOZNIHO VĚTRÁNÍ

Schéma regulační smyčky je zobrazeno na obr. 4. Expertní systém si vyměňuje provozní informace s řídicím systémem přes rozhraní. Expertní systém v intervalech 15 minut vypočítává akční zásah na základě aktuální rychlosti proudění vzduchu, koncentrace zplodin a dopravní situace v tunelu. Požadovaný akční zásah se zapíše na rozhraní a řídicí systém pak nastaví akční členy (proudové ventilátory a hlavní ventilátory ve strojovnách).

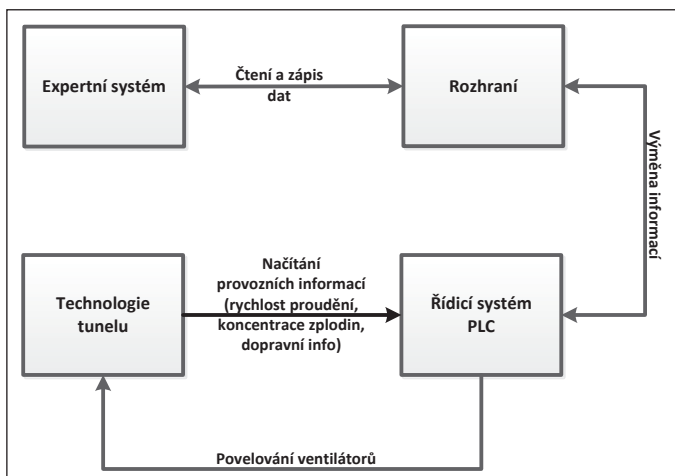
Vzorkovací perioda regulátoru byla s ohledem na setrvačnost vzduchu v tunelu volena 15 minut. Dynamika tunelu byla zanedbána s ohledem na vzorkovací periodu regulátoru, protože během čtvrt hodiny, kdy je konstantní akční zásah regulátoru, se systém ustálí a při dostatečně vhodné filtraci dat ze senzorů rychlosti proudění vzduchu a měření koncentrací škodlivin je možné potlačit výkyvy rychlosti proudění vzduchu způsobené projíždějícími vozidly, a poté má smysl pracovat pouze s ustáleným modelem proudění vzduchu v tunelu, kdy se zanedbají členy odpovídající lokálnímu zrychlení vzduchu reprezentující vlastní dynamiku vzduchu v tunelu (rovnice (11)).

Výsledný akční zásah vznikne řešením problému matematické optimalizace. Cílem této optimalizace je minimalizovat výkon všech zařízení v tunelu při dodržení daných omezení, které vzniknou jako požadavek provozního větrání během jednotlivých stavů (0. stupeň, I. stupeň, II. stupeň ochrany). Během jednotlivých stavů jsou kladeny různé požadavky na dodržení kvality vnitřního i vnějšího prostředí tunelu a rychlosti proudění vzduchu v tunelu a na rampách tunelu.

Matematická optimalizace

Algoritmus řízení provozního větrání je založen na matematické optimalizaci. Cílem matematické optimalizace je nalézt minimum hodnotící funkce při dodržení omezení. Úlohu matematického programování lze zapsat následovně [18]

$$\begin{aligned}
 x^* &= \min f_0(x) \\
 &\text{s omezením} \\
 f_i(x) &\leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, r \\
 h_i(x) &= 0 \quad i = 1, 2, \dots, s
 \end{aligned}
 \tag{12}$$



Obr. 4 Schéma řídicí smyčky provozního větrání tunelu Blanka

kde jsou:

- x vektor neznámých – proměnných, přes které se provádí optimalizace,
- x^* vektor proměnných, které jsou výsledkem optimalizace,
- $f_0(x)$ hodnotící funkce, kterou je cílem minimalizovat,
- $f_i(x)$ funkce reprezentující omezení ve tvaru nerovnosti,
- $h_i(x)$ funkce reprezentující omezení ve tvaru rovnosti,
- r počet omezení ve tvaru nerovnosti,
- s počet omezení ve tvaru rovnosti.

Formulace optimalizační úlohy provozního větrání

V případě řízení provozního větrání je možné vektor neznámých x zapsat jako:

$$x = [v_1, v_2, \dots, v_m, n_1, n_2, \dots, n_n, Q_1, Q_2, \dots, Q_p, s_1, s_2, \dots, s_m]^T
 \tag{13}$$

kde jsou:

- v_1, v_2, \dots, v_m rychlosti proudění vzduchu v jednotlivých úsecích tunelu [m/s],
- n_1, n_2, \dots, n_n počty proudových ventilátorů, které se mají spustit v daném úseku [-],
- Q_1, Q_2, \dots, Q_p množství vzduchu, které má být odvedeno, příp. přivedeno do tunelu jednotlivými strojovými [m³/s],
- s_1, s_2, \dots, s_m tzv. *slack variables* odpovídající jednotlivým rychlostem proudění v jednotlivých úsecích tunelu [m/s], viz dále,
- m celkový počet neznámých rychlostí proudění,
- n celkový počet skupin ventilátorů v tunelu, které je možno spustit,
- p celkový počet strojoven v tunelu, které je možno spustit.

Proměnné n_1, n_2, \dots, n_n a Q_1, Q_2, \dots, Q_p jsou proměnné, které definují výsledný akční zásah. Tyto proměnné mají tzv. tvrdá omezení, angl. *hard constraints*, tedy fyzická omezení akčních členů. Např. maximální povolený průtok strojovnou, maximální počet ventilátorů, které je možno v daném úseku spustit, atp. Tvrdá omezení lze zapsat do funkcí $f_i(x)$, které reprezentují omezení ve tvaru nerovnosti.

Počty proudových ventilátorů n_1, n_2, \dots, n_n , které se mají spustit v daném úseku tunelu, mohou nabývat hodnot kladných i záporných desetinných čísel. Kladné znaménko počtu spuštěných ventilátorů znamená přímý chod ventilátoru podporující rychlost proudění vzduchu ve směru jízdy vozidel, záporné znaménko znamená brzdný chod. V případě, že se v daném úseku nachází ventilátor s frekvenčním měničem, tak na něj případně desetinná část z celkového počtu požadovaných ventilátorů ke spuštění.

Hodnotící funkce $f_0(x)$ reprezentuje jednak elektrický výkon všech zařízení v tunelu, a také penalizaci na požadovanou rychlost proudění vzduchu v daných úsecích.

$$f_0(x) = \sum_{i=1}^n P_i(n_i) + \sum_{j=1}^p P_j(Q_j) + \sum_{k=1}^m a_k \cdot (v_k - s_k)^2
 \tag{14}$$

kde je:

- $P_i(n_i)$ elektrický výkon proudových ventilátorů ve skupině „ i “ [kW],
- $P_j(Q_j)$ elektrický výkon strojovny „ j “ v závislosti na objemovém průtoku vzduchu, který je strojovnou do tunelu přiváděn, příp. z tunelu odsáván [kW],
- $v_k - s_k$ odchylka od požadovaného pásma rychlosti proudění vzduchu v úseku „ k “ [m.s⁻¹], viz dále,
- a_k váha penalizace odchylky od požadovaného pásma rychlosti proudění vzduchu pro úsek „ k “ [kW.s.m⁻¹].

Závislost elektrického výkonu na počtu spuštěných ventilátorů lze aproximovat lineárním vztahem

$$P_i(n_i) = P_{0i} \cdot n_i \quad (15)$$

Závislost elektrického výkonu strojovny na odsávaném, resp. přiváděném množství vzduchu do tunelu, lze popsat pomocí vztahu

$$P_j(Q_j) = P_{jREF} \left(\frac{Q_j}{Q_{jREF}} \right)^3 \quad (16)$$

Paralelní běh všech ventilátorů ve strojovně je z energetického hlediska nejvýhodnější a při výpočtech výkonu se uvažuje vždy s paralelním chodem všech ventilátorů.

Model rychlosti proudění vzduchu se vyskytuje ve funkcích $h_i(x)$, které reprezentují omezení ve tvaru rovnosti. Model popisují Kirchhoffovy zákony pro dynamiku tekutin, viz část MATEMATICKÝ MODEL PROUDĚNÍ. Funkce $h_i(x)$ závisí na výsledných rychlostech proudění vzduchu a také na akčních členech (ventilátorech a strojovnách). Výsledkem prvního Kirchhoffova zákona jsou lineární funkce, výsledkem druhého Kirchhoffova zákona jsou nelineární funkce, protože jednotlivé členy rovnice (6) závisí na rychlosti proudění vzduchu nelineárně.

Řídicí systém poskytuje expertnímu systému – regulátoru provozního větrání informace o intenzitě dopravy, rychlosti dopravního proudu a skladbě vozidel. Dopravní informace jsou řídicím systémem aktualizovány každých 5 minut, a je tedy prakticky nemožné reagovat na změny rychlosti proudění vzduchu způsobené aktuální dopravní situací v tunelu. Cílem provozního větrání není regulace na přesnou hodnotu rychlosti proudění vzduchu, ale regulace v žádaném pásmu rychlosti proudění vzduchu. Např. během II. stupně ochrany provozního větrání je určen požadavek na minimalizaci rychlosti proudění vzduchu na výjezdových rampách, a to nejlépe tak, aby se výjezdové rampy dostaly do podtlaku a byl jimi nasáván čerstvý vzduch. Není tedy řečeno, na jakou požadovanou rychlost má systém regulovat, ale rychlost proudění vzduchu by se měla držet v pásmu kolem nulové hodnoty. V hodnotící funkci $f_0(x)$, viz rovnice (14), proto vystupují členy $(v_k - s_k)^2$, které je cílem minimalizovat.

Na jednotlivé žádané rychlosti proudění vzduchu jsou kladeny různé váhy, což je v algoritmu reprezentováno váhami a_k . Např. v jednom úseku tunelu je nutné dodržet požadovanou rychlost proudění vzduchu přísněji než v jiném úseku, kde nebude vadit větší odchylka od žádané rychlosti proudění vzduchu. Platí, že čím vyšší je váha a_k , tím více je penalizována odchylka od žádané rychlosti proudění vzduchu, a tím větší úsilí bude pro dosažení požadované rychlosti automatickou regulací vynaloženo, což neznamená nic jiného než vyšší spotřebu elektrické energie.

V případě, že dojde k navýšení hodnot koncentrací zplodin nad povolené meze, je nutné do tunelu přivést čerstvý vzduch, aby došlo k naředění koncentrací zplodin. V takovém případě je nutné upravit minimální požadovanou rychlost proudění vzduchu v daném úseku. Na základě měření koncentrací zplodin algoritmus upravuje minimální žádanou rychlost proudění v daném úseku podle následující rovnice

$$v_{\min}(i) = v_e(i) + K_c \cdot (c_m(i) - c_{\lim}) \quad (17)$$

Požadavek na navýšení minimální žádané rychlosti proudění vzduchu se ignoruje až ve chvíli, kdy měřené koncentrace zplodin poklesnou pod úroveň 75 % úrovně spínací.

VÝSLEDEK SIMULACE

V této části je na základě simulací vyhodnocena kvalita regulace provozního větrání. Výsledky regulace provozního větrání přímo na tunelovém komplexu zatím nejsou k dispozici.

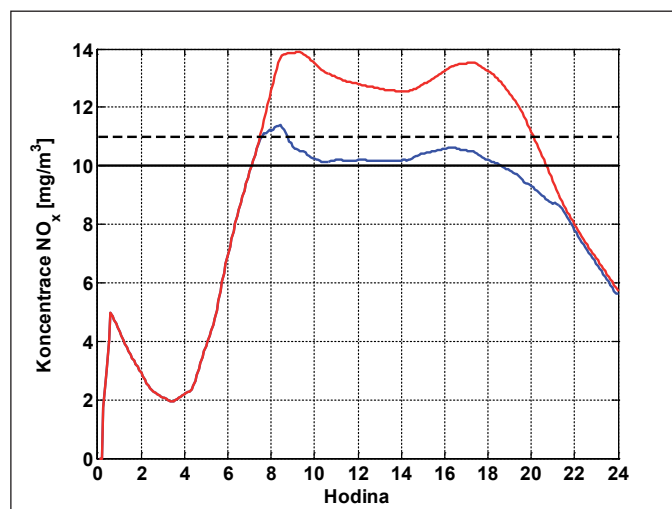
Vstupem do simulace jsou fiktivní dopravní informace (intenzita dopravy, skladba dopravy a rychlost dopravního proudu), které jsou odhadovány na základě dopravních studií [19] a [21]. Podle těchto studií se předpokládá, že skladba vozidel v tunelu Blanka bude mít následující charakter – 95 % osobní automobily, 4 % lehké nákladní automobily a 1 % těžké nákladní automobily. Předpokládá se, že oběma tunelovými tubusy projede cca 37 000 vozidel denně. Dále se předpokládá, že celková denní intenzita provozu vozidel bude do jednotlivých hodin pracovního dne rozložena tak, že intenzita dopravy v tunelu bude nabývat dvou špiček, první mezi 7. a 9. hodinou ránní a druhé mezi 16. a 18. hodinou odpolední.

Koncentrace zplodin – oxidy dusíku jsou odhadovány na základě těchto dopravních informací. Výpočet vychází ze zjednodušeného modelu, který je popsán v [11] a částečně také v [20]. Koncentrace zplodin závisí na skladbě vozového parku podle emisní normy EURO. Emisní norma EURO 4 je platná od roku 2005, norma EURO 5 od roku 2009 a norma EURO 6 platí od roku 2014 [23]. Předpokládá se, že tunelem Blanka budou projíždět především vozidla emisní kategorie EURO 4 a EURO 5. Skladba vozidel v tunelu podle této emisní normy byla záměrně upravena tak, aby tunelem projížděla ve větším poměru vozidla kategorie EURO 3 a 4, aby bylo vidět, že regulace se dokáže vyrovnat s nepříznivými podmínkami, které v tunelu mohou nastat.

Vybraný scénář simulace postihuje řízení koncentrací zplodin NO_x během jednoho pracovního dne. Během simulace je tedy nastaven stav provozního větrání 0. stupeň ochrany.

Na obr. 5 jsou zobrazeny odhadované průběhy koncentrací NO_x během simulovaného dne v místě, kde se budou nacházet čidla měření koncentrací. Jedná se vždy o místa, kde se předpokládá nejvyšší dosahovaná koncentrace zplodin během provozu.

Je vidět, že před osmou hodinou dopolední dojde vlivem zvýšené intenzity provozu vozidel k překročení limitní hodnoty koncentrace NO_x v severním tubusu. Regulátor však na tuto situaci dokázal zareagovat spuštěním proudových ventilátorů, viz obr. 6. Proudové ventilátory běží



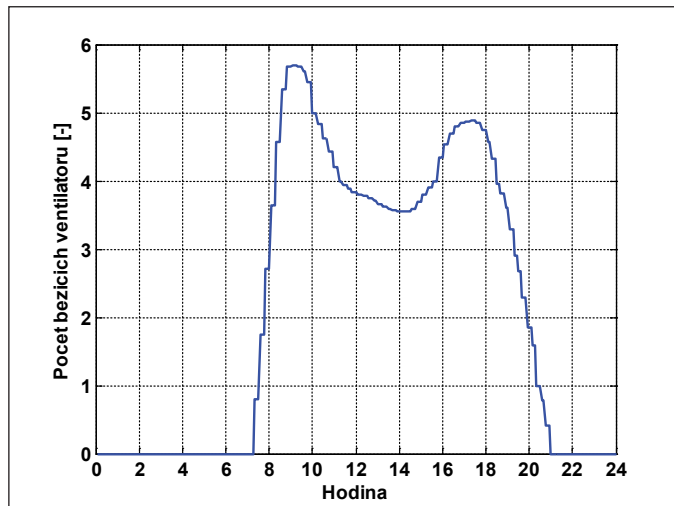
Obr. 5 Vývoj koncentrací NO_x v severním tubusu při automatické regulaci (modrá křivka) a při přirozeném proudění vzduchu (červená křivka). Černou čarou je zobrazena hranice značící limitní hodnotu koncentrací a čárkovanou čarou povolená hranice během regulace +10 procent od limitní hodnoty.

a reagují na aktuální měření koncentrace NO_x , v důsledku toho dojde k nárůstu rychlosti proudění vzduchu v zasažené části, viz obr. 7, a tím i k naředění koncentrací NO_x . Ve večerních hodinách klesá intenzita dopravního provozu v tunelu, snižuje se tedy potřeba přívodu čerstvého vzduchu, a tím i požadavek na spouštění proudových ventilátorů.

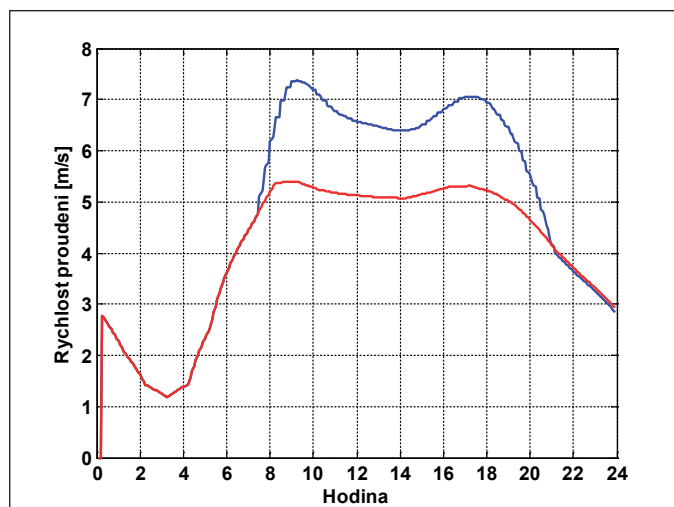
Obr. 5 navíc porovnává automatickou regulaci a přirozené proudění vzduchu, kdy je automatická regulace v tunelu vypnuta (červená křivka). Je vidět, že regulace dokáže do měřeného místa koncentrací přivést v důsledku spuštění proudových ventilátorů čerstvý vzduch, a tím dokáže držet koncentrace škodliviny NO_x v tolerančním pásmu 10 % nad limitní hodnotou 10 mg/m^3 . Pokud by byla automatická regulace vypnuta, koncentrace zplodin NO_x by se během špičkové intenzity provozu držely trvale nad limitní hodnotou.

ZÁVĚR

Autor se snažil čtenářům přiblížit algoritmus řízení provozního větrání tunelu Blanka, který je založen na matematickém modelu proudění vzduchu a optimalizaci. Cílem řízení provozního větrání je zajistit přípustnou kvalitu vnitřního a rovněž vnějšího prostředí tunelu. Během



Obr. 6 Spouštění proudových ventilátorů v severním tunelovém tubusu během automatické regulace



Obr. 7 Vývoj rychlosti proudění vzduchu v místě měření koncentrací NO_x . Modrá křivka reprezentuje vývoj během automatické regulace a červená křivka případ, kdy je automatická regulace vypnuta.

jednorocního zkušebního provozu tunelu by měl být algoritmus řízení přesně naladěný a měly by být vyřešeny potenciální výpadky zařízení, a to jak po softwarové, tak hardwarové stránce.

Kontakt na autora: jan.sulc@uceeb.cvut.cz

Autor by na tomto místě rád poděkoval společnosti FERAMAT CYBERNETICS, s r. o. za podporu při vývoji Expertního systému, dále projektantům ze společnosti SATRA, spol. s r. o., a to především p. Ing. Pořízkovi a Ing. Zápařkovi za rady a připomínky. Autor by také rád poděkoval firmě ELTODO, a.s., která implementovala rozhraní pro komunikaci mezi expertním systémem a řídicím systémem v reálném provozu. Práce byla částečně financována z grantů č. CZ.1.05/2.1.00/03.0091 Univerzita centra energeticky efektivních budov ČVUT a z interního grantu ČVUT SGS13/209/OHK3/3T/13.

Použité zdroje:

- [1] ŘEDITELSTVÍ SILNIC A DÁLNIC. Tunely. In: *Tunely ve správě ŘSD* [online]. 2012. Dostupné z: <http://www.rsd.cz/doc/Silnicni-a-dalnicni-sit/Tunely/tunely-ve-sprave-rsd>
- [2] SATRA, SPOL. S R. O. Tunelový komplex Blanka. In: *Informace o projektu* [online]. 2014. Dostupné z: <http://www.tunelblanka.cz/informace-o-projektu.php?action=1>
- [3] SICK MAIHAK GMBH. FLOWSIC 200 – Flow Velocity Measuring Device, Product Information.
- [4] SICK MAIHAK GMBH. VICOTEC 320 – Přístroj pro měření NO , NO_2 a snížení viditelnosti – Instalace, obsluha, údržba. 2009.
- [5] SATRA, SPOL. S R. O. Městský okruh Malovanka – Pelc Tyrolka, Softwarový projekt, revize D – C3 Požadavky na řízení hlavního větrání, část C3.1 Souhrnná část. Květen 2014.
- [6] PIARC. Pollution par le dioxyde dzote dans les tunnels routiers, č. 4.1. Zář 2000.
- [7] CETU. Dossier pilote des tunnels équipements, č. 4.1. Listopad 2003.
- [8] POŘÍZEK, J. Simulace 1-D proudění v portálovém objektu tunelu Blanka. *Vytápění větrání, instalace*. 2007, roč. 16, č. 2, s. 83 – 88.
- [9] POŘÍZEK, J. Navržený způsob větrání v tunelu Blanka. *Silniční obzor*, duben 2012, roč. 73, s. 91-94.
- [10] SULLIVAN, C. Lumped Fluid Systems. Dartmouth College [online]. Únor 2014. Dostupné z: http://www.dartmouth.edu/~sullivan/22files/Fluid_sys_anal_w_chart.pdf
- [11] ŠULC, J. *Řízení ventilace tunelu Blanka*. Praha, 2012. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra řídicí techniky.
- [12] SWAMEE, P. a JAIN, A. *Explicit Equations for Pipe-Flow Problems*. Journal of the Hydraulics Divison. 1976, s. 657-664.
- [13] HEMZAL, K. Součinitel tření při proudění tekutin – komparace vztahů. *Vytápění větrání, instalace*. 2003, roč. 12, č. 1, s. 30-32.
- [14] IDELCHICK, I. *Handbook Of Hydraulic Resistance*. Begell House, 2001. Třetí vydání.
- [15] BRDIČKA, M., SAMEK, L., a SOPKO, B. *Mechanika kontinua*. Praha: Academia, 2005. Třetí vydání.
- [16] ŠULC, J., FERKL, L. Design of fire ventilation control in the Blanka tunnel. In: *Symposium on Zagreb Underground 2014*.
- [17] BOYD, S. and VANDENBERGHE, L. Convex Optimization I. Stanford University Press [online]. 2004. Dostupné z: https://web.stanford.edu/~boyd/cvxbook/bv_cvxbook.pdf
- [18] BOYD, S. course - Convex Optimization I – lecture slides. Stanford University [online]. Summer Quarter 2013-2014. Dostupné z: <http://web.stanford.edu/class/ee364a/lectures.html>
- [19] TSK PRAHA. Dopravněinženýrské podklady pro Městský okruh – Soubor staveb Malovanka – Pelc Tyrolka. Praha, únor 2008.
- [20] ELTODO EG, a.s. Technické vybavení tunelů pozemních komunikací TP 98. Praha, 2004.
- [21] ATEM, s. r. o. Zjištění aktuální dynamické skladby vozového parku na silniční síti v ČR a jeho emisních parametrů v roce 2005. Praha, únor 2006.
- [22] SATRA, s. r. o. DATOVÝ ARCHIV SPOLEČNOSTI.
- [23] AUTOLEXICON.NET. Emisní norma EURO [online]. 2014. Dostupné z: <http://cs.autolexicon.net/articles/emisni-norma-euro/>