

DYNAMICKÁ SIMULACE CHOVÁNÍ VZDUCHOTECHNIKY TUNELU BLANKA

*Oto Sládek**, *Lukáš Kurka**, *Lukáš Ferkl***, *Jan Pořízek****, *Michael Šebek*****

* Kybertec, s.r.o.

** Katedra řídicí techniky, FEL ČVUT

*** Satra, s.r.o

**** Ústav teorie informace a automatizace, AV ČR

Abstrakt

Následující článek pojednává o tvorbě simulačního modelu soustavy vzduchotechnik a okolního prostředí připravovaného tunelu Špejchar – Pelc-Tyrolka. V rámci provedených prací byl navržen komplexní systém simulace vzduchotechniky orientovaný na návrh systému řízení technologie tunelu. Tento návrh také umožní specifikování struktury regulace a optimalizaci provozních parametrů chování vzduchotechniky. Součástí navrhovaného řešení je také systém dynamické simulace dopravy, který také umožňuje studium emisního zatížení okolního prostředí. Simulace byla provedena pomocí produktu MATLAB 7.0. Použitá kombinace simulačních a softwarových řešení vytvořila dobrý precedens pro použití v této oblasti splnila všechny požadavky.



Obrázek 1: Část ortofotografické mapy Prahy s vyznačeným projektem tunelu Blanka.

1 Úvod

Na našem území bylo realizováno několik tunelových staveb obdobného charakteru. Na základě zkušeností z těchto realizací a zkušeností s podobnými stavbami ve světě bylo rozhodnuto o zlepšení návrhu systému algoritmizace ovládání technologických částí pro připravovaný tunel Blanka, který bude realizován v úseku Špejchar – Pelc-Tyrolka (viz obrázek 1). S ohledem na složitost řízených fyzikálních soustav se jako nezbytné a zároveň výhodné ukázalo vytvoření simulačního modelu těchto řízených soustav. Po nezbytné analýze byl jako nejvhodnější nástroj pro simulaci vybrán produkt MATLAB 7.0, a to především pro dobrou možnost podpory ve vztahu simulace systému – simulace řízení – reálná soustava, a dále pro dobrou podporu návrhu systémů řízení ať už formou vnitřních přídavných modulů. Dále se jako výhoda ukázala možnost přístupu k rozsáhlé skupině podpůrných systémů, které jsou k dispozici jako volně použitelné výsledky výzkumu v podobných oblastech.

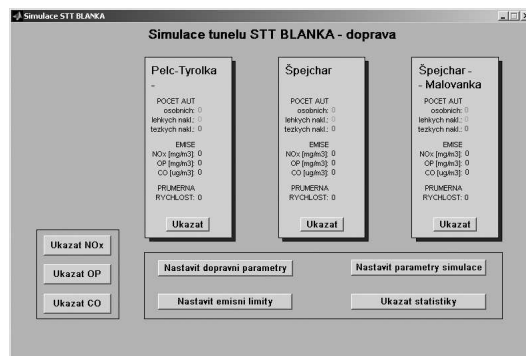
2 Technické řešení

Na začátku procesu vytváření modelu byla provedena analýza celku určeného pro vytvoření modelu. Rozborem situace bylo rozhodnuto o dekompozici systému na dvě základní části splňující nezbytné podmínky separability. První částí je část dopravní resp. simulující dopravní provoz v tunelových tělesech. Druhou částí je část vzduchotechnická, která popisuje jednak chování vzduchových hmot v jednotlivých tunelových tělesech, dále pak před portály apod. Vzhledem k délce obou tunelových těles byla pro výpočty rozdělena jednotlivá tunelová tělesa na úseky. Pojmeme úseku zde rozumíme tzv. vzduchotechnický úsek. Byl tedy vytvořen model VZT intuitivní prostorovou diskretizací a fyzikální vlastnosti byly soustředěny do jednotlivých kompartmentů. První část je tedy popisována dynamikou diskrétní, pro druhou část jsou naproti tomu charakteristické kontinuální procesy, které byly následně prostorově a také časově diskretizovány [7].

3 Simulace dopravy

Při návrhu simulace dopravy se u dosavadních pokusů vycházelo ze statistiky [1][3]. V představovaném přístupu je kladen důraz především na co nejvěrnější fyzikální reprezentaci provozu v tunelu. Hledělo se hlavně na maximální věrnost simulované dopravní situace a co největší výpočetní rychlost.

Doprava je implementována čistě diskrétně. Celý tunel reprezentuje jediná matice, přičemž každý řádek matice plně popisuje situaci na jednom metru délky tunelu. Podstatným obsahem jsou tři druhy informací – o vzhledu tunelu, o dopravní situaci a o zplodinách.



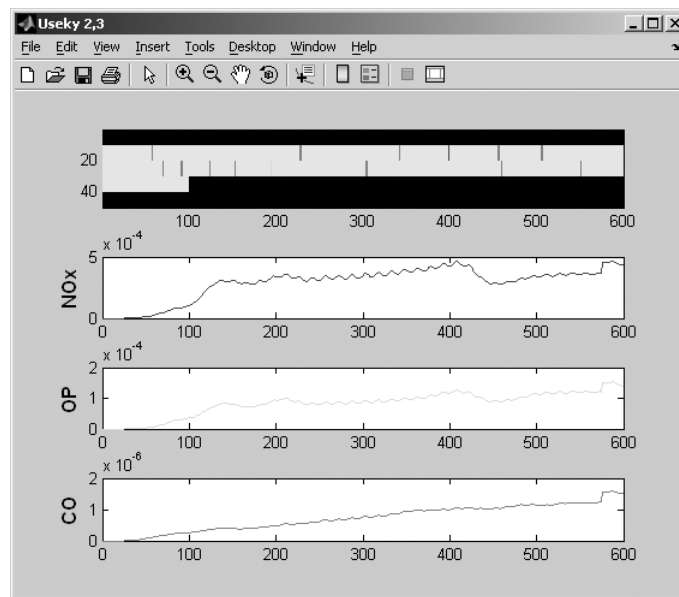
Obrázek 2: Ukázka GUI – ovládací panel simulace dopravy severního tunelového tělesa.

Vzhled tunelu je statická záležitost, která je nadefinována na začátku simulace a v jejím průběhu se buď nemění, nebo se změní najednou, skokem. Globálně jsou zapotřebí dva druhy informací - o dopravních omezeních (zúžení tunelu, kterým je simulován také přípojný a odbočovací pruh) a o maximálních povolených rychlostech. V případě simulací např. dopravních nehod, jsou pak pro požadované úseky (délka úseku např. 30 metrů) simulována sofistikovaným algoritmem dopravní omezení a vozidla pak nemohou např. části jednotlivých pruhů využívat.

Vozidla samotná jsou reprezentována především základními parametry – jejich skutečnými rychlostmi a typy vozidel. Typy aplikované v této simulaci jsou rozlišeny tři – osobní, lehká nákladní a těžká nákladní vozidla. Dále byla implementována pravidla pro sjíždění pruhů, odbočování a předjíždění. Samozřejmě jsou možnosti zvolit hustotu dopravy i její skladbu (tj. kolik procent dopravy tvoří osobní, lehká a těžká nákladní vozidla). Vozidla se chovají realisticky do nejmenších podrobností, např. si dodržují odstup dvou sekund za předchozím vozidlem a např. volbou hodnoty parametru je možné „zkazit“ zipování při sjíždění dvou pruhů, což je vlastnost, která je pro specificky české poměry dosti důležitá.

Co se týče výpočetní rychlosti, tento požadavek se zprvu nezdál příliš důležitý. Máme-li však před sebou takto rozsáhlý systém stává se výpočetní doba jednotlivých kroků simulace velmi důležitá, a to nejen z hlediska komfortu obsluhy.

Velkou výhodou je způsob reprezentace jednotlivých vozidel. Umožňuje totiž bohatě využít indexaci, což je způsob programování, kdy se co nejvíce změn v maticích snažíme vyjádřit změnou indexů nebo interními funkcemi MATLABU (např. `find`, `any` apod.) a zároveň se co nejvíce snažíme vyhnout cyklům (`for`, `while` apod.).



Obrázek 3: Ukázka GUI – horní graf představuje aktuální rozmístění jednotlivých vozidel v prvním úseku severního tunelového tělesa, pod ním jsou koncentrace jednotlivých škodlivin.

Při simulaci emisí byl použit podobný způsob jako u vozidel. Vozidlo za jednu sekundu vyprodukuje určité množství (hmotnost) emisí. V celém modelu zplodin se tak pracuje pouze s hmotnostmi, protože hmotnost představuje (na rozdíl od koncentrace) invariantní proměnnou nezávislou na rychlosti proudění, průřezu tunelu apod. Emise se v tunelu pohybují v diskretizovaných „balících“, stejně jako vozidla jsou popsány svojí rychlostí (která je dána rychlostí proudění vzduchu) a dalšími parametry. Vzniklý obraz je diskretní, a jeho rekonstrukce probíhá např. aplikací klouzavého průměru. Zplodiny se rozdělují v tunelových křižovatkách, jsou odsávány vzduchotechnickými strojovny atd. podle topologie simulovaných tunelových staveb.

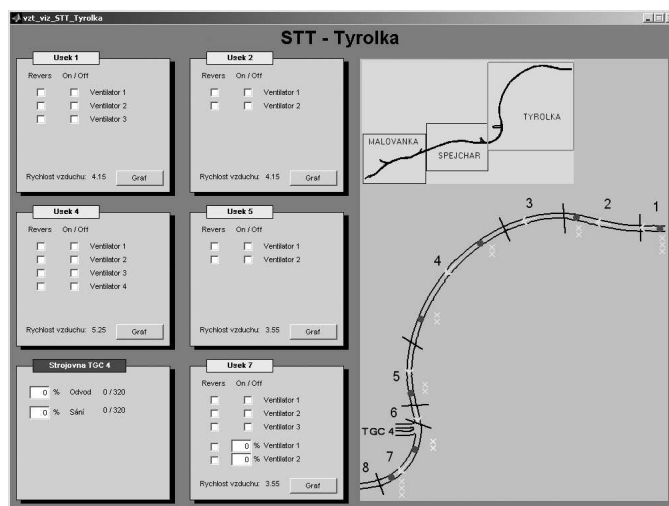
Zde se ukázal hlavní problém výpočetní rychlosti. Klouzavý průměr je totiž na delších horizontech a u dlouhých matic velmi pomalý. Místo klouzavého průměru byla tedy použita konvoluce dvou vektorů. Jde o známý trik, který se používá například ve zpracování obrazu, kde je také potřeba vysoké výpočetní rychlosti. Vstupem do konvoluce jsou daný vektor a vektor délky n , jehož jednotlivé prvky mají hodnotu $1/n$. Výsledek je stejný a jelikož je funkce konvoluce (`conv`) také vnitřní funkcí MATLABU, výpočetní rychlost se opět výrazně zvýší. Tunel Blanka je dlouhý přibližně 5 600 metrů, celkem tedy 11 200 prvků dlouhá matice, která ho popisuje. Na počítači Intel Pentium IV 2,4 GHz, 512 MB RAM s operačním systémem WINDOWS 2000 a verzi MATLAB 7.0 trvá výpočet jednoho kroku simulace kolem 0,1 s.

4 Simulace vzduchotechniky

Pro formálně správný dynamický popis proudění by musely být použity Navier – Stokesovy rovnice. Řešení těchto nelineárních parciálních diferenciálních rovnic je však velice obtížné i pro velmi malé soustavy. Pouze případné sestavení okrajových podmínek pro tunelovou stavbu těchto rozměrů by bylo prací na mnoho let.

Namísto Navier – Stokesových rovnic popisujících dynamiku systému, byly použity upravené rovnice kontinuity a Bernoulliho rovnice, které popisují ustálený stav proudění. Při předpokladu dynamiky změn parametrů soustavy (např. rychlost aut, hustota dopravy, spuštění ventilátorů) lze předpokládat, že těmito rovnicemi lze popsat i dynamiku změn rychlosti proudění v tunelu, což se prokázalo [4].

Jak bylo již dříve zmíněno, celý tunel je rozdělen do jednotlivých úseků, které převážně odpovídají tzv. vzduchotechnickým úsekům. Jednotlivé úseky jsou vzájemně propojeny rovnicemi kontinuity (rovnice 1).



Obrázek 4: Ukázka GUI – interaktivní ovládací panel ventilace.

$$\Delta(v_{air}S_{tun}) = 0 \quad (1)$$

v_{air} = rychlost proudění vzduchu
 S_{tun} = průřez tunelu

Pro každý vzduchotechnický úsek je sestavena Bernoulliho rovnice (rovnice 2). Ta popisuje tlakový rozdíl mezi dvěma úseky v tunelu. Rovnice se skládá z několika částí popisujících tlakové ztráty i zdroje tlaku.

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_{loc} + \Delta P_{fric} \pm \Delta P_{pist} \pm \Delta P_{fans} \quad (2)$$

P_{tot} = celkový tlakový rozdíl
 P_{loc} = tlaková změna způsobená změnou průřezu tunelu a dále vstupu a výstupem
 P_{fric} = tlaková změna způsobená třením
 P_{pist} = tlaková změna způsobená projíždějícími vozidly
 P_{fans} = tlaková změna způsobená proudovými ventilátory

Tlaková změna způsobená změnou průřezu (rovnice 3) je závislá na koeficientu ζ . Ten je různý pro ztráty zúžením, rozšířením, vstupem a výstupem.

$$\Delta P_{area} = \frac{\rho}{2} \zeta v_{air}^2 \quad (3)$$

ρ = hustota vzduchu
 ζ = ztrátový koeficient
 v_{air} = rychlost proudění vzduchu

Tlaková změna způsobená třením (rovnice 4) je závislá na drsnosti stěn, rozmístění dopravního značení a dalších faktorech.

$$\Delta P_{fric} = \frac{\rho}{2} \lambda \frac{l}{d_H} v_{air}^2 \quad (4)$$

λ = koeficient tření
 l = délka úseku
 d_H = hydraulický průměr úseku

Tlaková změna způsobená pístovým efektem (rovnice 5) je závislá především na množství a rychlosti projíždějících aut. V současné době simulace rozlišuje 3 typy aut (osobní, lehká nákladní, těžká nákladní), které mají odlišné účinné čelní plochy, způsobující pístový efekt. Při výpočtu pístového efektu je také počítáno s jeho snížením při jízdě v koloně.

$$\Delta P_{pist} = \frac{\rho l (v_{veh} - v_{air})^2 \gamma_{conv}}{2 S_{tun} v_{veh}} \sum_i S_i n_i \quad (5)$$

- v_{veh} = průměrná rychlost vozidel
- γ_{conv} = polynom reprezentující snížení účinku při jízdě v koloně
- S_{tun} = průřez tunelu
- S_i = účinná čelní plocha vozidel daného typu
- n_i = počet vozidel daného typu

Tlaková změna způsobená ventilátory (rovnice 6) je závislá především na příkonu, účinnosti a výstupní rychlosti ventilátoru.

$$\Delta P_{fans} = \frac{\rho}{2} \frac{\eta P_{fan}}{S_{tun} v_{fan}} (v_{fan} \pm v_{air}) \quad (6)$$

- η = účinnost přeměny tahu na tlak
- P_{fan} = výkon ventilátoru
- v_{fan} = výstupní rychlost proudění ventilátoru

Neznámými v těchto rovnicích jsou rychlosti v jednotlivých sekcích tunelu. Soustava rovnic která se získá pro celý tunel není separovatelná a musí řešit jako celek. Jak je zřejmé jde o soustavu nelineárních rovnic, kterou již nelze řešit analyticky a je nutno použít numerických metod [6]. Pro řešení této soustavy byly použity metody, které vychází z algoritmu funkce `strscne` vyvinutou v Itálii na Univerzitě ve Florencii [2].

Numerické řešení je velmi obtížnou částí úlohy. Přesto se optimalizací zdrojového kódu podařilo dosáhnout výpočetních rychlostí kolem 1 s na krok simulace. Výpočet vzduchotechniky se ovšem provádí jednou za deset kroků simulace (tedy každých 10 sekund), protože proudění uvnitř tunelu nemá tak rychlou dynamiku, jako má doprava.

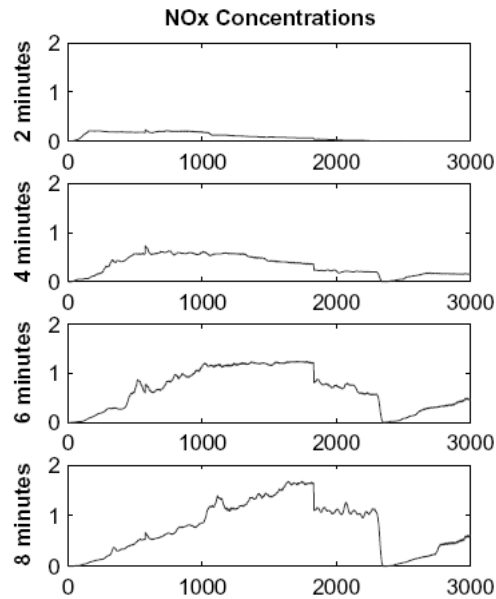
5 Výsledky simulace

Výstupem simulace jsou především koncentrace škodlivin v jednotlivých úsecích tunelu. Jak již bylo zmíněno, předností tohoto simulačního programu je možnost simulovat i dynamiku tunelu. Na příkladu obrázku 5 jsou uvedena rozložení koncentrací škodlivin v severním tunelovém tělese za prvních osm minut od otevření tunelu. Hustota provozu byla 1 620 vozidel/hodinu, složení provozu 95 % osobních vozidel, 4 % lehkých nákladních vozidel a 1 % těžkých nákladních vozidel.

Dále je zde uvedena tabulka maximálních dosažených koncentrací škodlivin pro projektovaný tunel Blanka a pro existující tunel Mrázovka (tabulka 1). Z uvedených hodnot je vidět, že simulované hodnoty tunelu Blanka jsou podobných hodnot, jako má tunel Mrázovka. Pro důkladnou verifikaci stávajícího modelu bude samozřejmě potřeba další, daleko podrobnější rozbor [5].

Tabulka 1: Srovnání typických emisí projektovaného tunelu Blanka (simulace) a již realizovaného tunelu Mrázovka (naměřená data).

Tunel	CO [ppm]	NOx [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	OP [km^{-1}]
Mrázovka	4,8	3,2	0,9
Blanka	5,2	2,6	0,6



Obrázek 5: Příklad simulace dynamiky systému. Vývoj koncentrací NO_x za prvních osm minut provozu tunelu.

6 Závěr

Navržený systém simulace VZT prokázal svoji životaschopnost při reálném návrhu reálné tunelové stavby. V průběhu prací bylo nutné provést praktické a implementační řešení velkého množství problémů, které z uvedeného popisu, vzhledem k rozsahu, nemohou vyplynout. Výsledkem je kompaktní systém pro řešení této specifické problematiky a to včetně příslušných optimalizovaných metod numerické a algoritmické optimalizace. Jeho implementace se ukazuje jako zajímavý precedens pro tvorbu simulačních modelů orientovaných na návrh systémů řízení technologií tunelových staveb. Hlavním přínosem je pak možnost energetické optimalizace nároků technologických částí ve vztahu k zatížení životního prostředí.

Reference

- [1] R. Bellasio. Modelling traffic air pollution in road tunnels. *Atmospheric Environment*, 31:1539–1551, 1997.
- [2] Morini, B. Bellavia, S., Macconi, M. An affine scaling trust-region approach to bound-constrained nonlinear systems. *Applied Numerical Mathematics*, 44:257–180, 2003.
- [3] Boman, C. A. Bring, A., Malmström, T. G. Simulation and measurement of road tunnel ventilation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 12(3):417–424, 1997.
- [4] Razím, M. Kotek, Z., Kubík, S. *Nelineární dynamické systémy*. SNTL, Praha, 1973.
- [5] PIARC. *Road Tunnels: Emissions, Environment, Ventilation*. PIARC, 1996.
- [6] E. Vitásek. *Numerické metody*. SNTL, Praha, 1987.
- [7] P. Zítek. *Simulace dynamických systémů*. SNTL, Praha, 1990.

Kontakty

Oto Sládek: sladek@kybertec.com
 Lukáš Kurka: kurka@kybertec.com
 Lukáš Ferkl: ferkl@control.felk.cvut.cz
 Jan Pořízek: jan.porizek@satra.cz
 Michael Šebek: msebek@utia.cas.cz