České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Czech Technical University in Prague
Faculty of Electrical Engineering

Katedra řídicí techniky
Department of Control Engineering

Řízení ventilace tunelu Sitina

Ventilation Control of the Sitina Tunnel

Bakalářská práce

Vypracoval: **Marek Vachule**
Ročník: 3.
Školní rok: 2006/2007
Datum a místo: srpen 2007, Praha
Vedoucí: Ing. Lukáš Ferkl

České vysoké učení technické v Praze, fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

Školní rok: 2006/2007

Zadání bakalářské práce

Student: Marek Vachúle

Obor: Kybernetika a měření

Název tématu: Řízení ventilace tunelu Sitina

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s požadavky na řídicí systém tunelu Sitina.
2. Navrhněte pro tunel Sitina algoritmus řízení provozního větrání.
3. Navržený algoritmus implementujte v Matlabu a ověřte na simulátoru vzduchotechniky (dodá vedoucí práce).

Seznam odborné literatury:

- Ferkl, L., Kurka, L., Sládek, O., and Pořízek, J., 2005. "Simulation of traffic, ventilation and exhaust in a complex road tunnel," In Proc. of IFAC 2005, Prague.
- Technologické vybavení tunelů pozemních komunikací – technické podmínky (TP98), Ministerstvo dopravy a spojů & Eltodo EG, Praha, 2003
- Simulácia VZT tunelu Sitina, technická zpráva, Kybertec, s.r.o., Chrudim, 2006

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Lukáš Ferkl

Datum zadání bakalářské práce: zimní semestr 2006/07

Termín odevzdání bakalářské práce: 15. 8. 2007

Prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta elektrotechnická
-4-

v zast.
Prof. Ing. Zbyněk Škvor, CSc.
děkan

V Praze, dne 6. 3. 2007

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne ..... Podpis …….

Anotace

Cílem této bakalářské práce bylo seznámit se s požadavky na řídicí systém tunelu Sitina a navrhnout pro tento tunel algoritmus řízení provozního větrání. Navržený algoritmus měl být dále implementován do prostředí Matlabu. V tomto prostředí byl následně algoritmus ověřen na dříve naprogramovaném simulátoru vzduchotechniky.

Teoretický rozbor v úvodní části práce nabízí stručný přehled různých druhů ventilace a uvádí různé možnosti návrhu provozní ventilace. Dále práce obsahuje podrobný rozbor postupu navrhování algoritmu řízení a na závěr je uvedeno několik srovnávacích grafů pro různá nastavení navrženého algoritmu.

Annotation

The objective of this bachelor thesis was to study the requirements on control system of the Sitina tunnel and to design the control algorithm of its operating ventilation. The proposed algorithm had to be implemented in Matlab. Afterwards, the algorithm was verified on a previously programmed simulator of ventilation.

The preliminary theoretical analysis contains a short overview of ventilation types and presents the different possibilities how to design the operating ventilation. The work continues by detailed step-by-step analysis of the design process of the control algorithm. The last part of the work presents some comparative graphs showing different settings of the designed algorithm.

Poděkování

Chtěl bych velmi poděkovat všem, kdo mi pomáhali při tvorbě této práce, ať už přímo nebo nepřímo. Zvláště pak děkuji Ing. Lukáši Ferklovi, vedoucímu mé bakalářské práce, za trpělivost, cenné rady a podnětné připomínky a za možnost nahlédnout do mnoha materiálů týkajících se problematiky tunelové ventilace včetně diagnostických programů v jazyce Matlab.

Velice děkuji také svým rodičům, sourozencům a přítelkyni, protože mi v průběhu studia i psaní této práce poskytovali veškerou podporu.

Obsah

1. Úvod ... 2
1.1 Základní informace o tunelu z hlediska ventilace ... 3

2. Rozbor ... 3
2.1 Režimy ventilace ... 3
2.1.1 Nouzový režim vypnutí ... 4
2.1.2 Manuální režim ... 4
2.1.3 Požární režim ... 4
2.1.4 Režim automatické ventilace ... 4
2.2 Problematika návrhu automatické provozní ventilace ... 5

3. Rozbor fyzikálních dějů v tunelu ... 5

4. Volba algoritmu řízení ... 5
4.1 Vstupní parametry a jejich zpracování ... 6

5. Návrh řešení ... 7
5.1 Zpracování dat – průměrování a výběr nejhoršího ... 8
5.2 Návrh automatického řídicího systému ... 8
5.2.1 Stavový diagram ... 9
5.2.2 Rozhodovací funkce ... 9
5.2.3 Stavové diagramy regulátoru ... 11
5.2.4 Ventilace únikových chodeb ... 13
5.3 Strategie spínání ventilátorů ... 14

6. Ověřování na simulátoru vzduchotechniky ... 15
6.1 Metoda Monte Carlo ... 16
6.2 Postup simulace ... 16
6.2.1 Přehled skupin parametrů ... 17
6.2.2 Ladění konstant K1, K2 a K3 ... 17
6.3 Simulace ... 22
6.3.1 Rozbor výsledků simulace ... 22

7. Závěr ... 26

Použitá literatura ... 27

Příloha A – Obsah vloženého CD ... 29

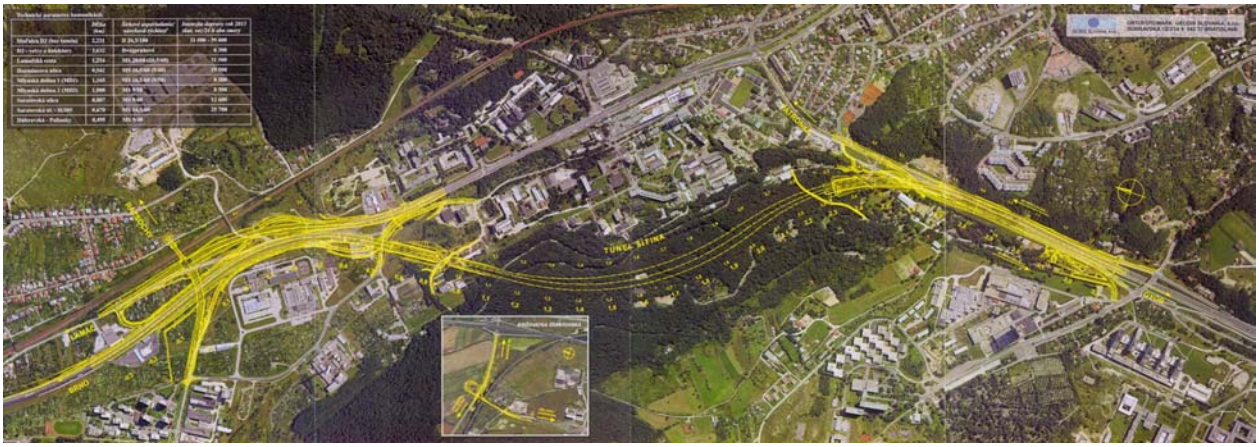
Příloha B – Nákres tunelu Sitina ... 31

1. Úvod

Úvodem uvedeme několik informací o tunelu, jehož řídicí systém je obsahem této práce. Vycházíme přitom z informací uvedených v pramenu [7].

Bratislavský tunel Sitina je klíčovým dálničním tunelem dálnice D2, která vede z České republiky přes Slovensko do Maďarské republiky. Je součástí evropského koridoru TINA č.IV.

Tunel Sitina propojí poslední chybějící úsek 3,3 km dlouhého dálničního obchvatu Bratislavy, který byl doposud zajišťován Lamačskou cestou a Mlýnskou dolinou, a zasahoval tedy nepřímo do městské zástavby. Tím se vyřeší nejen otázka kapacity tohoto dopravního tahu, ale také pro Bratislavu tak nepříjemné životní podmínky v okolí frekventované komunikace zajištující dopravu z České republiky dále na jih. Jde především o hluk a znečištěné ovzduší.



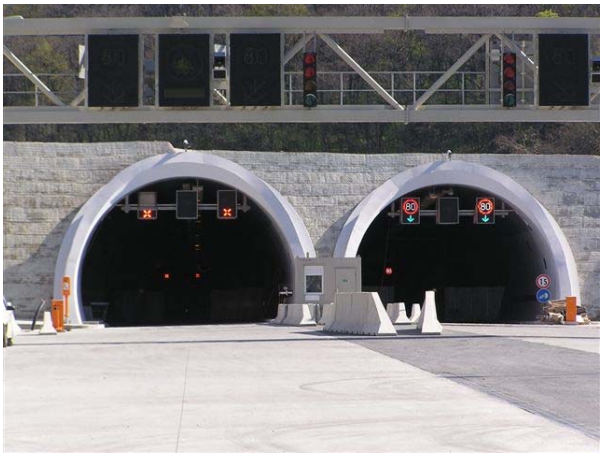
Obr. 1 - Letecký pohled na trasu tunelu

Tunel Sitina tvoří dva samostatné tunelové tubusy, každý s dvěma jízdními pruhy. Délka ražené západní (jižní) části tunelového tubusu je 1189 m, délka hloubené části v areálu Slovenské akademie věd je 206 m. Ražená východní (severní) část tunelového tubus má délku 1159 m a délka hloubené části v areálu Slovenské akademie věd je 216 m. Celková délka západního (jižního) tunelového tubusu spolu s překrytou částí tunelu je tedy 1440 m, východní (severní) tunelový tubus spolu s překrytou částí je dlouhý 1415 m. Tunel byl vybudován Novou rakouskou tunelovací metodou (NRTM). V každém tunelovém tubusu je jeden nouzový úkryt. Tubusy jsou propojeny únikovými chodbami na pěti místech. Šířka vozovky mezi obrubníky je 7,5 m, po obou stranách jsou chodníky 1 m široké. V délce 600 metrů se od jihovýchodního portálu razilo dovrchně se sklonem 1,59%, dále tunel stoupá se sklonem 2,35%. Maximální výška nadloží dosahuje 30 metrů. Tunel se začal razit 27. října 2003 od jihovýchodního portálu. V létě 2004 začala ražba i od severozápadního portálu. Západní tunelový tubus prorazili 8. února 2005, východní 3. května 2005. Slavnostní otevření tunelu se uskutečnilo podle plánu 24. 6. 2007. Tunel má celkem pět únikových cest a každých 180 metrů jeho délky jsou vybudovány výklenky SOS. Tunelové větrání je řešené jako podélné.

1.1 Základní informace o tunelu z hlediska ventilace

V tunelu, který je tvořen dvěma samostatnými tubusy, jsou nainstalovány ventilátory vždy po dvou vedle sebe. V západní (jižní) části tunelového tubusu, který má celkovou délku 1440 m, je umístěno pět dvojic, tedy deset ventilátorů. Ve východní (severní) části tunelového tubusu, která má celkovou délku 1415 m, je umístěno šest dvojic, tedy dvanáct ventilátorů. Ventilátory jsou axiální, o průměru 1030 mm a tahu 900 N.

Obr. 2 – Jihovýchodní portál tunelu



Obr. 3 - Severozápadní portál tunelu

2. Rozbor

Při rozboru a následném návrhu vycházíme zejména ze zkušeností kolegů při návrhu řízení ventilace pro tunely Panenská a Libouchec [2]. Protože v našem případě jde o tunel s tzv. podélným větráním, je automatická regulace větrání v obou tunelových tubusech řešena na stejném principu, jen s rozdílem počtu ventilátorů. Jiný počet ventilátorů ve východním a západním tubusu jde na první pohled proti logice, neboť v delším tunelovém tubusu, tedy v západním, je o jednu ventilátorovou dvojici méně. Důvod je prostý, tunel má sklon vozovky směrem k jihu a automobily, které pojedou do kopce, tedy východním tubusem, budou produkovat více emisí z důvodu vyššího výkonu motorů.

2.1 Režimy ventilace

Problematika, kterou se bude zabývat tato práce, je automatická ventilace. Přesto je důležité upozornit na další nutné režimy, které musí ventilace tunelu z bezpečnostních a servisních důvodů mít. Jde o nouzové režimy pro případ havárie či požáru nebo o režimy pro opravy a měření v tunelu.

Navrhujeme tedy tyto druhy režimů ventilace:

- **Nouzový režim vypnutí**
- **Manuální režim**
- **Požární režim**
- **Režim automatické ventilace**

2.1.1 Nouzový režim vypnutí

Režim nouzové vypnutí je nutnou součástí každého řídicího systému. V tunelu Sitina je tedy nutné tento režim zabudovat také. Jde o bezpečnostní režim úplného vypnutí ventilátorů, který je možno použít ve výjimečných situacích. Jde o případy, kdy hrozí nebezpečí výbuchu v důsledku zkratu při havárii automobilu s hořlavým či výbušným materiálem nebo zkrat na ventilátoru a podobně.

2.1.2 Manuální režim

Tento režim by měl sloužit pro situace, kdy není možné předvídat, jak se bude systém chovat, a zároveň není zapnuto automatické větrání. V takovém případě bude systém přepnut do manuálního režimu, kdy bude možné ovládat jednotlivé ventilátory ručně.

Příkladem situace, kdy bude možné a nutné užít manuální režim, je odstávka automatické regulace při úpravě (přeprogramování) nebo opravě v případě poruchy.

Další situace, kdy je třeba užít manuální režim, je případ přeměřování parametrů tunelu pro potřeby lepšího nastavení a doladění některých konstant automatické ventilace. O těchto konstantách bude dále řečeno více.

2.1.3 Požární režim

Požární režim je velice důležitou součástí tunelové ventilace. Má za úkol odvést co nejúčinněji kouř a škodlivé zplodiny z prostoru tunelu a umožnit lidem včasný odchod z tunelu do bezpečí.

V důsledku několika katastrof v posledních letech se na požární ventilaci tunelů a její prevenci soustředila pozornost odborných kruhů. Byla provedena celá řada zkušebních požárů, a to nejen v zahraničích tunelech, ale také u nás. Z těchto zkoušek vyplývá, že pro dobré odvětrání jednosměrných tunelů s podélným větráním je nutná minimální rychlost proudění vzduchu v tunelu a ventilovat se musí vždy ve směru dopravy v tubusu zasaženém požárem.

Problém je, jak rychle po vzniku požáru začít nebezpečné zplodiny ventilovat. Ze zkoušek totiž vyplývá, že někdy je dobré začít ventilovat okamžitě, jindy až po určitém intervalu T_{fire}.[2]

Z toho vyplývá, že je nutné s pomocí odborníka, podle konkrétních parametrů daného tunelu, určit, jaký má být interval T_{fire}, tedy zpoždění ventilace od vzniku požáru (to může být i nulové). Dále je nutné začít ventilovat i druhý tubus paralelním směrem, aby nedošlo k nasávání kouře vycházejícího z hořícího tubusu. Velice důležitá je také ventilace únikových chodeb (nebo propojovacích chodeb vedoucích mezi tubusy). Do nich se nesmí dostat (nasát) kouř z hořícího tubusu. Je tedy nutné ventilaci únikových chodeb zapnout ve směru z čistého tubusu do hořícího, aby lidé unikající od požáru měli zajištěn dýchatelný vzduch. Přestože je požární ventilace velice důležitým a zajímavým tématem, tato práce se jí pro svůj rozsah a tématické zaměření nezabývá.

2.1.4 Režim automatické ventilace

Automatická ventilace pracuje bez zásahu obsluhy v době běžného provozu tunelu. Je navržená s maximálním důrazem na dodržení hlídaných limitů v tunelu a zároveň tak, aby šetřila

spotřebu elektrické energie. Rovněž je dbáno na rovnoměrné užívání všech ventilátorů s ohledem na jejich životnost. Jak již bylo v úvodu řečeno, rozdíly mezi tunelovými tubusy tunelu Sitina jsou pro potřeby ventilace zanedbatelné, a jejich ventilace bude tedy prováděna stejně.

2.2 Problematika návrhu automatické provozní ventilace

Při návrhu bude nutné postupovat tak, aby se daly jednotlivé části postupně navázat a propojit, proto je nutné sestavit si plán, podle kterého budeme postupovat.

Pro tunel Sitina jsme navrhli tento postup:

1. Rozbor fyzikálního modelu tunelu
2. Volba algoritmu řízení
3. Návrh algoritmu regulace
4. Odzkoušení návrhu na modelu

3. Rozbor fyzikálních dějů v tunelu

Existují různé složité způsoby fyzikálního popisu chování tunelů, které se snaží popsat proudění vzduchu v tunelu dynamicky. Tyto metody však vedou na soustavy nelineárních parciálních diferenciálních rovnic nebo se dokonce objevují pokusy užívat fraktály. Tyto přístupy jsou však velice výpočetně náročné a jejich aplikace na tunelová tělesa je velice problematická. Mimo to je z důvodu malého množství senzorů v tunelech, a tedy nedostatečných informací o reálném systému, problematické ověření správnosti výsledku.

Pro potřeby tunelů s podélným větráním bez přípojných a odbočovacích pruhů je však možné vše výrazně zjednodušit. Proudění totiž můžeme popsat Bernoulliho rovnicemi, které popisují jeho ustálený stav [1]. Toto zjednodušení je stále dosti komplikované, pokud bychom měli počítat se všemi faktory, které ovlivňují proudění. Jde hlavně o tlakové ztráty a zdroje tlaku, které působí na rychlost proudění vzduchu. V důsledku rozšiřování a zužování tunelové roury se podle Bernoulliho rovnice výrazně zrychluje a zpomaluje proudění v důsledku změn tlaku. Tento faktor však můžeme u tunelu Sitina zanedbat z důvodu jednoduché konstrukce. Dále jde o zrychlení proudění působením pístového efektu vznikajícího při průjezdu tunelem. Zvláště nákladní automobily jsou významné z důvodu velké čelní plochy, kterou před sebou tlačí vzduch, a zrychlují tak proudění v tunelu. Tento efekt je samozřejmě závislý na rychlosti automobilů a při výpočtu je nutné brát na zřetel i snížení efektu v případě kolony. Toto vše však můžeme při výpočtech zanedbat, neboť všechny výše zmíněné faktory působící na rychlost proudění se pro naše potřeby převedou na výstup, resp. na náš vstup jako informace o aktuální rychlosti proudění vzduchu v tunelu. Náš regulátor bude tedy mimo jiné pracovat s rychlostí prudění vzduchu. [2]

Sestavování konkrétních rovnic proudění však není součástí této práce, ale je možné je nalézt v příslušné literatuře (např. [1] nebo [4]).

4. Volba algoritmu řízení

Možné algoritmy řízení lze rozdělit na dvě základní skupiny. Jde o regulaci přímou nebo zpětnovazební.

Přímá regulace je však vhodná pouze pro systémy, u kterých není možná zpětnovazební regulace. Zároveň musíme velmi přesně znát vlastnosti systému a musíme být schopni velice

přesně modelovat chování systému. Tato regulace se tedy pro řízení ventilace tunelu Sitina nehodí, protože nemáme dostatek informací pro přesný popis chování tunelu.

Zpětnovazební regulace pracuje oproti přímé regulaci z aktuálními výstupními daty ze systému a pomocí nich ovlivňuje vstupy, přesněji řečeno svůj akční zásah. Podle způsobu zpracování výstupních dat dělíme regulátory dále na statické a dynamické. Jak již bylo ve fyzikálním rozboru řečeno, dynamický přístup je velice výpočetně složitý, a proto zbývá regulátor statický.

4.1 Vstupní parametry a jejich zpracování

Vstupní parametry řídicího systému a jejich zpracování jsou stěžejní pro další postup, návrh a realizaci celého řízení. Chování vzduchu uvnitř tunelu je ovlivněno mnoha faktory. Jde například o teplotu, tlak a směr větru u ústí tunelu. Nemalou roli může hrát i sklon tunelu a rozdílná nadmořská výška ústí tunelů. Jde ale o to, které informace o tunelu jsou k řízení jeho ventilace potřebné, jak je získáme a následně zpracujeme.

Rozdíl nadmořské výšky, který je přibližně 21 metrů, není u tunelu Sitina nijak významný. S délkou tunelu souvisejí rozdílné podmínky u ústí - když je tunel krátký, nikdy nevznikne tak velký rozdíl tlaku nebo teploty, který by bylo třeba brát v úvahu. Nejdůležitější informace pro ventilaci tunelu jsou bezpečnostní. Jde o zdraví škodlivé látky vznikající při spalování, tedy při jízdě automobilů, a dále mechanické částice zhoršující viditelnost. Proto má tunel na stěnách umístěny senzory pro měření koncentrace zplodin, tedy opacity, CO a NO_x. Pro upřesnění: NO_x jsou souhrnně oxidy dusíku - NO a NO_2. Udávají se v $mg.m^{-3}$. Individuálně jsou velice špatně měřitelné, a proto se měří dohromady, přestože výrazně škodlivým je pouze NO. CO (oxid uhelnatý) vzniká při nedokonalém spalování a je udáván v jednotkách ppm (parts per milion). Opacita je dohlednost, tedy udává, jak dobře je vidět na km vzdálenosti, čímž vypovídá o množství tuhých částic ve vzduchu (je udávána v km^{-1}). Dále jsou v tunelu umístěny senzory pro měření rychlosti proudění vzduchu, které jsou důležité pro kontrolu stálého proudění vzduchu za účelem větrání tunelu. Přestože jsou v tunelu umístěny senzory opacity, CO a NO_x, požadavkem je regulovat pouze podle koncentrace CO a opacity. Pokud by v budoucnu nastala situace, kdy by bylo potřeba regulovat od NO_x, stačí pouze vhodně nastavit konstanty navrhovaného regulátoru, neboť princip regulace zůstává stejný.

Tyto informace jsou tedy výstupem, který je nutné zpracovat a vyhodnotit a na jeho základě vypnout nebo zapnout určitý počet ventilátorů.

Zpracování dat ze senzorů zplodin, tedy senzorů měřících opacitu a CO, bude probíhat výběrem vždy nejhoršího údaje. Je to z toho důvodu, abychom nikde nepřekročili maximální limit. Zpracování dat ze senzoru rychlosti je závislé na konstrukci tunelu. Jde o to, co bylo již řečeno výše, že totiž pokud by se tunel významně rozšiřoval či zužoval (odbočky nebo zúžení), byla by rychlost proudění velice rozdílná. Důvodem je efekt, který je zřejmý z Bernoulliho rovnice [1]. Tento problém se ale tunelu Sitina netýká pro jeho konstrukční vlastnosti, které vedou k proudění homogennímu. Zpracování informací ze senzorů rychlosti proudění bude tedy velice jednoduché - sečteme všechny hodnoty a vypočteme průměr.

Měřené parametry	jednotka	veličina
CO	[ppm]	koncentrace
Opacita	[km^{-1}]	viditelnost
Proudění	[ms^{-1}]	rychlost

Tabulka 1 - Přehled měřených parametrů

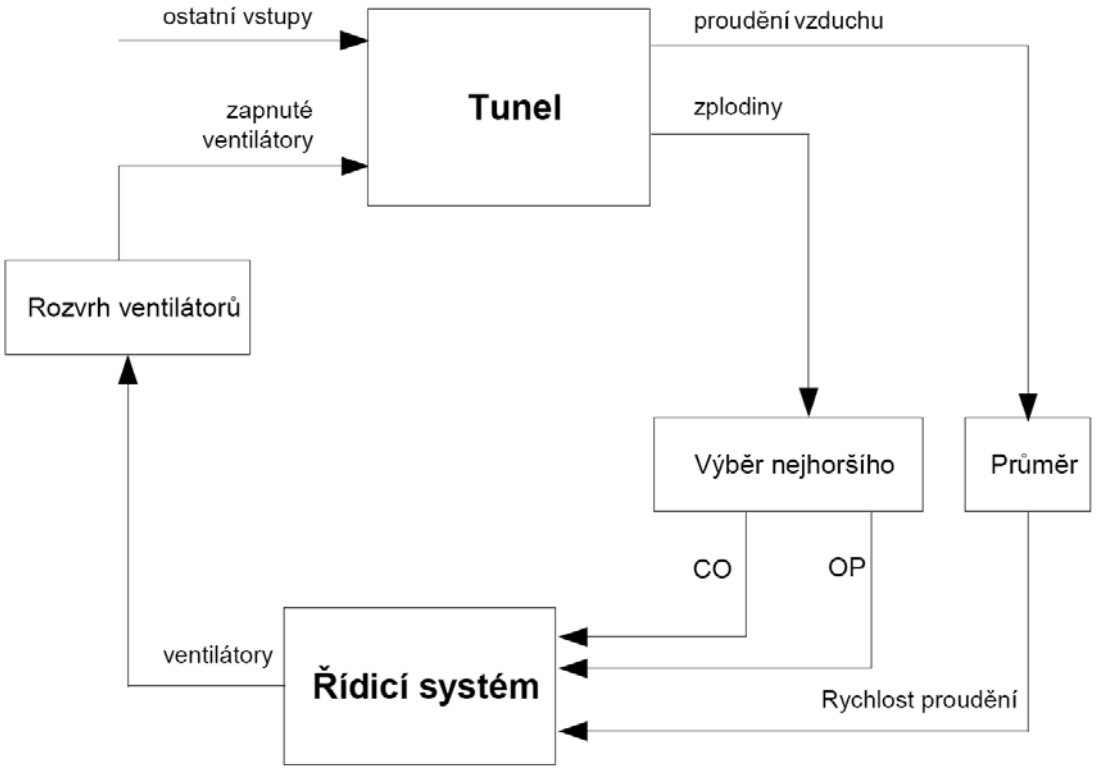
5. Návrh řešení

V rozboru byla provedena analýza tunelu, určen druh regulátoru a určeno bylo také, která data budou potřebná a zpracovávaná. Nyní je nutné rozdělit celý proces na několik základních částí. První část je tedy přijetí výstupních dat z tunelu, následuje zpracování a vyhodnocení nevyhovujících parametrů, tedy překročení daných emisních limitů nebo nedostatečné proudění vzduchu. Podle toho, jaké parametry nevyhovují, je dále rozhodnuto, kolik ventilátorů má být spuštěno, aby bylo možné dostatečně rychle situaci stabilizovat. Důležité je v tomto stádiu také porovnání, kolik ventilátorů je v danou chvíli vypnuto a kolik již zapnuto.

Parametr	Přípustná hodnota
CO[ppm]	<100
Opacita [km-1]	>5
Proudění [ms-1]	>1

Tabulka 2 - Přípustné hodnoty monitorovaných veličin

V závěru regulačního procesu je ještě určeno, které konkrétní ventilátory se mají zapnout. Zde přichází na řadu proces, který zajišťuje rovnoměrné rozložení ventilátorů, které jsou v danou chvíli zapnuté. Dále v tomto kroku rozhodujeme tak, aby žádný ventilátor neběžel příliš dlouho a zároveň nebyl stále vypínán a zapínán, a tím se nesnižovala životnost soustavy. Výstupem celého systému je tedy rozvrh, který přímo určuje ventilátory, které mají být v závislosti na momentální situaci zapnuté a které vypnuté. Celé orientační schéma systému je pro představu nakresleno ve schématu (Obr. 4).



Obr. 4 - Schéma řídicího systému

5.1 Zpracování dat – průměrování a výběr nejhoršího

Jak již bylo v úvodu řečeno, pokud má tunel konstantní průřez, je podle předchozích pozorování možné brát rychlost proudění vzduchu uvnitř tunelu jako homogenní. Tunel Sitina je příkladem takového tunelu, a toto musíme zohlednit při zpracování dat ze senzorů. Různé výsledky jednotlivých senzorů měřících rychlost proudění vzduchu jsou tedy způsobeny nesprávným umístěním nebo nesprávnou kalibrací těchto senzorů. Dále je možné, že některý senzor zaznamená fluktuace vzduchu vzniklé například průjezdem nákladního automobilu. Proto je třeba vytvořit průměr ze všech senzorů rychlosti proudění.

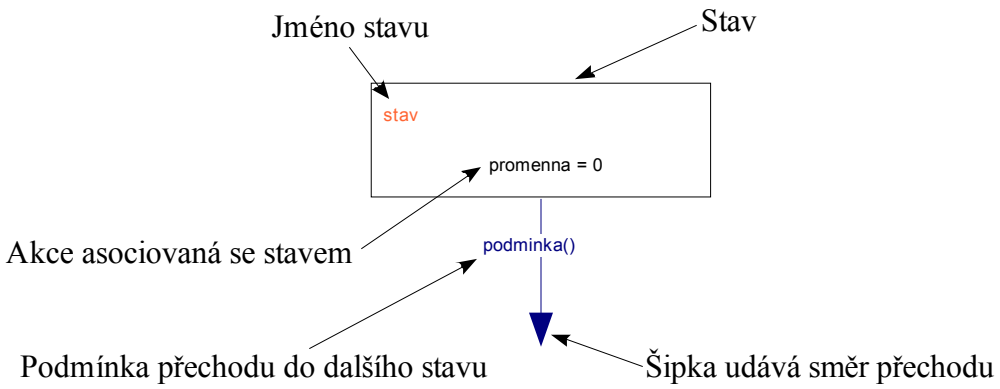
Pro měření, respektive zpracování výsledků měření senzorů zplodin je rozhodující naše zadání. Tedy norma, která udává maximální přípustnou koncentraci CO a opacity pro tunel. Proto zpracování informací senzorů měřících tyto údaje je jiné než u senzorů proudění vzduchu. V důsledku nerovnoměrného rozložení zplodin jsou totiž i výsledné hodnoty senzorů značně rozdílné. Musíme tedy, na rozdíl od proudění, brát jako vstup řídícího systému nejhorší údaj senzorů. Tím jedině zajistíme, že nebudou překročeny maximální přípustné koncentrace.

5.2 Návrh automatického řídicího systému

Automatickým řídicím systémem je myšlena ta část celé regulace, jejímž vstupem je nejhorší hodnota zplodin a průměrná hodnota rychlosti proudění vzduchu. Výstupem systému je počet ventilátorů, které musí být za daných podmínek zapnuté.

5.2.1 Stavový diagram

Pro popis automatického řídicího systému využijeme standardní stavový popis. Na příkladu níže si ukážeme princip všech stavů.



Obr. 5 - Stavový diagram

Každý stav má jméno a má přiřazenu akci, která se v něm provede. Systém tedy přejde do příslušného stavu, provede akci daného stavu a vyhodnotí situaci. Podle toho, jak se po provedení akce asociované se stavem změní situace, přejde systém do dalšího stavu nebo se smyčkou vrátí zpět. Smyčky se užívají například při několikanásobném připínání ventilátorů. Přechod do dalšího stavu je závislý na splnění podmínky daného přechodu. Podmínky jsou logické funkce nabývající hodnot 0 (FALSE) nebo 1 (TRUE).

5.2.2 Rozhodovací funkce

V regulátoru je několik námi nastavených parametrů. Ve zkušebním provozu bude pravděpodobně nutné parametry doladit. Pro souhrnnou představu slouží následující tabulka.

Název parametru:	Popis parametru:	Nastavená hodnota:	Možný interval nastavení:
Max_speed	nastavení počtu ventilátorů	10 (12)	-
Flow_limit	min. rychlost proudění vzduchu	1	(0; 2)
CO_limit	maximální povolená koncentrace	100	(80; 120)
OP_limit	minimální viditelnost	5	(4; 6)
K1 K2 K3	ladící konstanty rozvrhovací funkce priority ventilátorů	viz odstavec 6.2.2	-

Tabulka 3 – Parametry, jejich nastaveni a popis

Tabulka je však jen stručným přehledem, proto si jednotlivé parametry a logické funkce z nich složené popíšeme podrobněji.

První a v zásadě nejdůležitější logická funkce zjišťuje, zda jsou zplodiny v tunelu nad danými limity.

zplodiny_vysoke() = (CO > CO_limit) OR (OP <= OP_limit)

Proměnné v této logické funkci jsou OP (naměřená hodnota opacity) a CO (naměřené množství oxidu uhelnatého). Statické proměnné jsou CO_limit a OP_limit, které udávají limity pro dané proměnné. Proměnné, se kterými tato funkce pracuje, jsou již zpracované hodnoty naměřené senzory. Jak již bylo vysvětleno dříve, CO resp. OP jsou maximální hodnoty daného měření.

Druhá logická funkce zjišťuje, zda již stačila ventilace z tunelu odvětrat zplodiny, tedy jestli už není čas začít vypínat ventilátory.

zplodiny_nizke() = (CO < 0,8 * CO_limit) AND (OP > OP_limit * 1,2)

V této funkci jsou stejné statické i dynamické proměnné jako u předešlé. Přesto funkce zplodiny_nizke() není jen negací funkce zplodiny_vysoke(). Funkce totiž zajišťuje hysterezní chování regulátoru. Jde o situace, kdy se zplodiny po zapnutí ventilace vrátí zpět k limitním hodnotám. V takovém případě, pokud by byla funkce pouhou negací funkce předchozí, by se ventilace opět vypnula a koncentrace zplodin by se velice rychle dostala zpět nad limit. Toto chování by mělo za následek stálé vypínání a zapínání ventilátorů, což by vedlo k rychlému opotřebení celého systému. Proto byla zavedena hystereze, a to tak, aby ventilace probíhala až do doby, kdy jsou hodnoty zplodin o 20 % nižší než je určený limit. Takto navržená regulace sice není tak energeticky výhodná, zajišťuje však delší životnost ventilátorů a celého systému.

Další dvě logické funkce jsou obdobného charakteru jako předešlé, jen se týkají rychlosti proudění vzduchu.

proudeni_pomale() = v_vzduchu <= Flow_limit

proudeni_dostacujici() = v_vzduchu >= (Flow_limit + 1.5)

Obě funkce obsahují proměnnou v_vzduchu, která udává rychlost proudění vzduchu naměřenou v tunelu, resp. průměrnou hodnotu ze změřených údajů. Pro zajištění stability systému a funkční regulaci je nutné v tunelu udržovat určitou minimální rychlost proudění vzduchu. Prodění totiž zajistí stálý odvod zplodin. Funkce proudeni_pomale() tedy hlídá, kdy se v_vzduchu dostane pod kritickou hranici nastavené konstantní proměnné Flow_limit. Ta je nastavená v našem případě (viz Tabulka 3) na hodnotu 1 ms^{-1}. To vysvětluje i druhou funkci, která stejně jako předchozí funkce zplodin zajišťuje hysterezi systému. Zde je zajištěna hystereze přičtením čísla 1,5, což stejně jako nastavená proměnná Flow_limit je číslo, které je možné během záběhových zkoušek doladit.

Poslední logické funkce hlídají počet zapnutých ventilátorů.

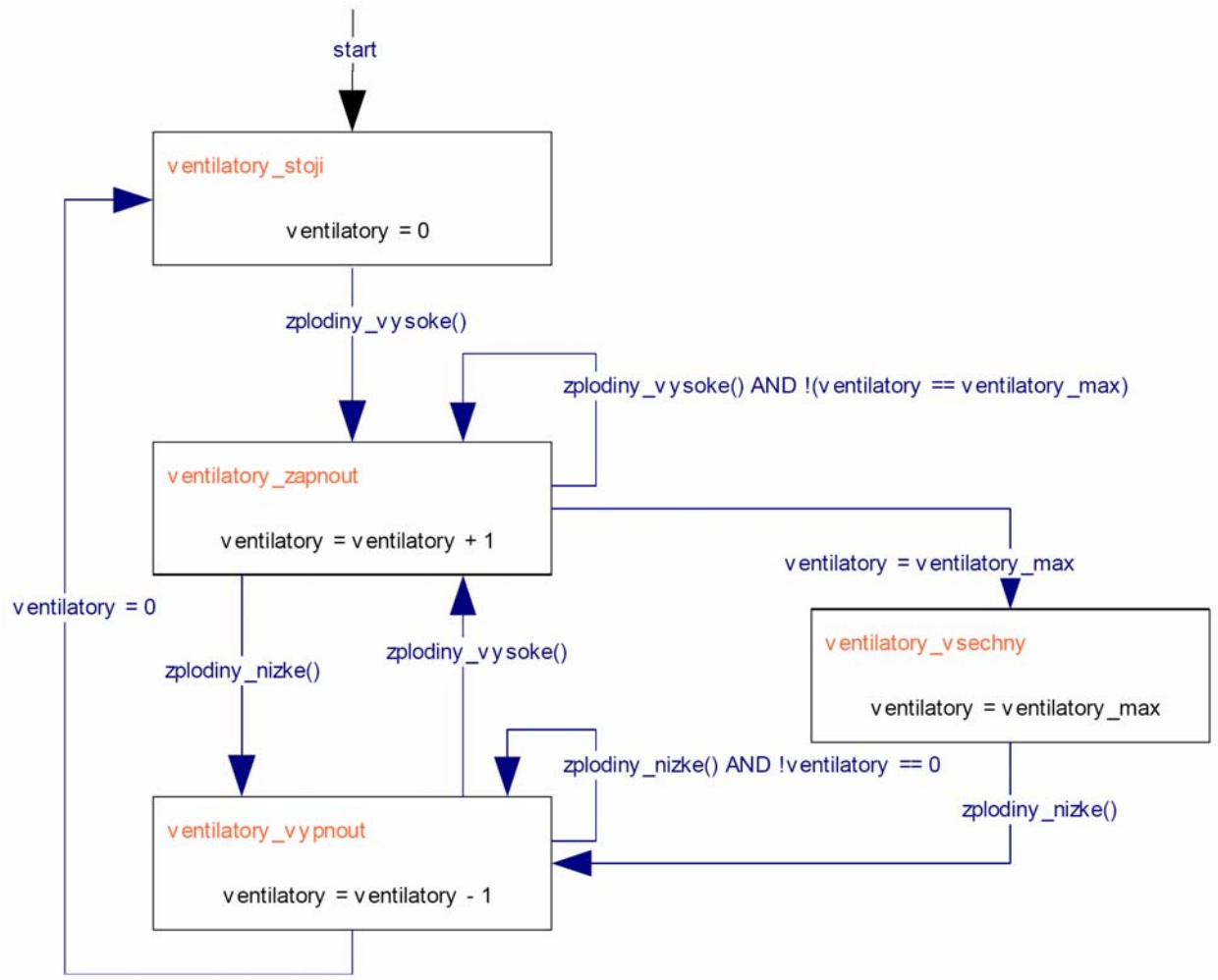
max_pocet_ventilatoru() = pocet_ventilatoru >= Max_speed

ventilatory_stoji() = pocet_ventilatoru <= 0

Konstanta Max_speed udává maximální počet použitelných ventilátorů. Pro naše potřeby má tedy hodnotu 12 pro východní, resp. 10 pro západní tunelovou rouru. Proměnná pocet_ventilatoru udává, kolik je právě zapnutých ventilátorů. Nabízí se otázka, proč hlídat maximální počet ventilátorů, když se jich stejně nemůže zapnout více, než je fyzicky přítomno. Odpověď je jednoduchá, pokud známe princip zapínání resp. vypínání ventilátorů. Pokud jsou totiž zplodiny či rychlost proudění nevyhovující, systém připíná ventilátory, a když je zase vše pořádku, systém ventilátory postupně vypíná. Kdyby však při nevyhovujících parametrech systém připínal ventilátory donekonečna, tedy do chvíle, kdy bude vše stabilizováno nad hysterezní hranici, došlo by k nepříjemné situaci. Bylo by totiž zapnuto, i když jen virtuálně, tolik ventilátorů, že by systému jejich vypnutí zabralo čas, po který by ventilace běžela zbytečně. Došlo by tedy k wind up efektu. Nastavená proměnná Max_speed tedy zamezí zbytečné prodlevě při vypínání ventilátorů, tedy potlačí wind up efekt. Prodleva by totiž vedla k dalším energetickým ztrátám, a jedním z hlavních cílů našeho systému je i energetická úspornost.

5.2.3 Stavové diagramy regulátoru

Námi navržený regulátor obsahuje dva nezávislé bloky. První blok obsluhuje regulaci zplodin (tedy OP a CO dohromady) a druhý obsluhuje regulaci proudění vzduchu. Regulace je navržena tak, aby mohly oba bloky běžet nezávisle a navzájem neinterferovaly.

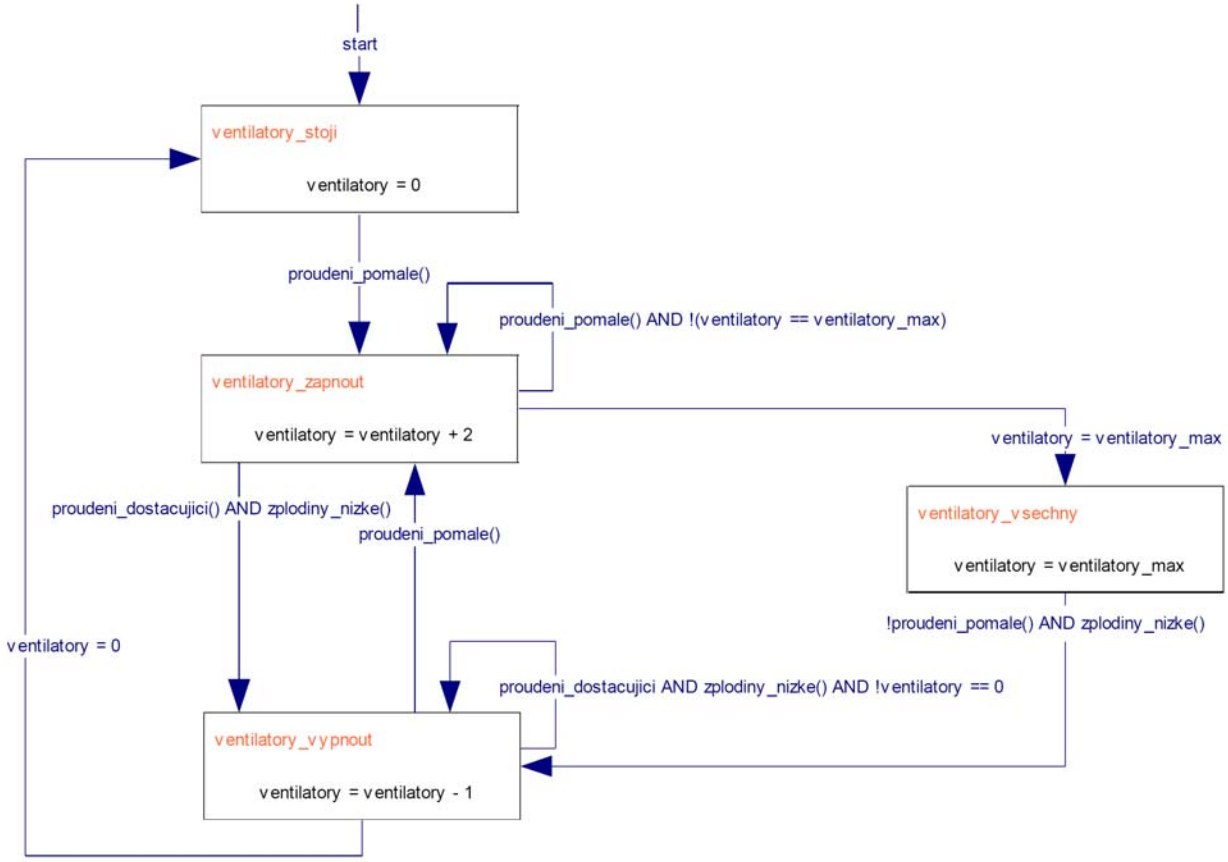


Obr. 6 - Stavový diagram regulace zplodin

Na začátku se regulátor nachází ve stavu ventilatory_stoji, v tomto stavu jsou všechny ventilátory vypnuté. Pokud je koncentrace zplodin v tunelu pod stanovenými limity, systém v tomto stavu setrvá. Jakmile však koncentrace v tunelu překročí danou mez, přeskočí systém do stavu ventilatory_zapnout a zapne první ventilátor. Pokud se koncentrace zplodin nesníží pod stanovenou mez, systém v tomto stavu setrvá. Bude tedy stále připínat ventilátory, dokud koncentrace zplodin neklesne nebo do doby, kdy bude zapnut maximální počet ventilátorů. Zde znovu zdůrazníme, že zplodiny_nizke() a zplodiny_vysoke() nejsou jen vzájemnou negací, ale mají jinou hodnotu pro přechod nahoru a jinou dolů. Jde o zamezení oscilaci a zajištění hysterezního chování regulátoru.

Přejděme tedy k situaci, kdy se zplodiny vrátily pod hlídanou mez. V takové chvíli se systém nachází buďto ve stavu ventilatory_zapnout nebo ve stavu ventilatory_vsechny. Z obou těchto stavů se systém přes podmínku zplodiny_nízké dostane do stavu ventilátory_vypnout, který se stará o postupné vypínání ventilátorů. Tento stav vypínání ventilátorů může přerušit jen situace, kdy zplodiny opět překročí hlídané limity a systém se opět vrátí do stavu zapínání ventilátorů.

Pokud se během vypínání parametry nezhorší nad limit, dojde k postupnému vypnutí všech ventilátorů. Tím se splní podmínka vedoucí k počátečnímu stavu a systém se opět vrátí na start. To však neplatí, pokud se nad resp. pod limitními hodnotami nenalézá zároveň i parametr v_vzduchu.



Obr. 7 - stavový diagram regulace proudění vzduchu

Stavový diagram regulace proudění je velice podobný stavovému diagramu pro hlídání zplodin. Má jen několik rozdílných detailů. V prvé řadě proudění na rozdíl od zplodin má a hlídá jen jeden parametr a jednu konstantu. Dále přechody mezi stavy jsou podmíněny nejen samotnou rychlostí proudění, ale také situací týkající se zplodin. Jak je např. vidět, ze stavu ventilatory_zapnout do stavu ventilatory_vypnout systém nepřejde, dokud se hodnoty proudění a zároveň i zplodin nedostanou pod resp. nad stanovené limity. Jde tedy o provázanost a zároveň podřízenost proudění a zplodin. Zároveň však je patrné, že pokud se proudění v tunelu zcela zastaví (bude nižší než námi nastavený 1 ms^{-1}), je nutné ho co nejrychleji obnovit. Proto se ve stavu ventilatory_zapnout zapínají resp. připínají v každém průchodu hned dva ventilátory najednou. Toto opatření vyplývá z předpokladu, že je lépe rychle obnovit ventilaci za cenu vyšší spotřeby elektrické energie (jsou zapnuty dva ventilátory) než později zapínat ventilátorů více pro odvětrání nahromaděných zplodin.

5.2.4 Ventilace únikových chodeb

V tunelu jsou na pěti místech vybudovány propojky mezi tunelovými tělesy. Jde o únikové chodby, kterými se dá v případě nouze (požáru, havárie…) dostat z jedné tunelové roury do druhé. Tyto únikové chodby musí být z bezpečnostních důvodů pravidelně odvětrávány.

K zajištění tohoto požadavku však stačí, když se vždy jednou denně, a to v čase nejčistšího vzduchu v tunelu, propojky vyvětrají. Větrání proto bude zajištěno vždy v nočních hodinách, čímž bude zajištěna nízká hladina znečištění. Přesnou hodinu pravidelné ventilace propojek bude nutné určit v době záběhu tunelu. Odhadem lze říci, že bude tunelem jezdit nejméně automobilů mezi druhou a pátou hodinou ranní. Doba trvání této ventilace je stanovena na 15 minut denně, což by mělo zajistit dostatečné provětrání prostoru propojek.

5.3 Strategie spínání ventilátorů

Strategie spínání ventilátorů, o které byla řeč již dříve, je velice důležitá pro dobrou ventilaci a dlouhou životnost celého systému. Ventilátory jsou v tunelu rozmístěny po dvojicích, přesto je v návrhu bereme jako jednotlivé ventilátory a snažíme se, aby se rovnoměrně střídaly v činnosti. Toto střídání povede k delší životnosti, neboť jeden ventilátor nebude vytížen více než ostatní. Dalším důvodem rovnoměrného užívání ventilátorů je rovnoměrné rozložení běžících ventilátorů po celé délce tunelu. I když bylo řečeno, že v tunelu se dá vzduch brát jako homogenní těleso, je dobré, aby se ventilace prováděla rovnoměrně po celé délce tunelu.

Spínání ventilátorů je tedy proces, kterým zajistíme rovnoměrnou ventilaci tunelového tělesa a zároveň prodloužíme životnost celé soustavy. Proto je na problematiku strategie spínání kladen velký důraz. Nabízí se několik řešení tohoto problému. Ta lze při zjednodušení rozdělit do dvou kategorií.

První kategorie pracuje s určitými předem připravenými rozvrhovacími tabulkami, které pak systém podle situace pouze aplikuje. Pro představu uvedeme příklad. Máme větrat čtyřmi ventilátory, v posledním kroku jsme větrali dvěma, a to konkrétně pátým a devátým, proto nyní připneme další dva, a to první a dvanáctý. Protože každý ventilátor má běžet dva cykly, nechali jsme běžet stávající a dodali podle tabulek, kde jsou zapsány všechny možnosti, další dva ventilátory tak, aby byla ventilace rovnoměrná. Takové řešení ventilace je však v našem případě velice nevhodné. Potřebuje totiž mnoho desítek tabulek pro různé možnosti a zajistí pouze rovnoměrný počet užití jednotlivých ventilátorů. Nezajistí však rovnoměrnou dobu užívání, nehledě na to, že tabulkové systémy jsou záležitostí spíše minulosti nebo se nehodí na tak dynamickou úlohu jako je tato.

Druhá kategorie pracuje s určitou ohodnocovaní funkcí jednotlivých ventilátorů. Tento způsob jsme zvolili jako vhodnější a navrhli ohodnocovaní funkci, jejíž princip si vysvětlíme níže.

Ústřední myšlenkou je výpočet ohodnocovacího kritéria, které seřadí ventilátory podle priority pouštění. Pak bude následovat požadavek, kolik ventilátorů pustit, nakonec jen systém vezme seřazené ventilátory a určený počet odshora zapne.

Pro výpočet celkové doby provozu jednotlivých ventilátorů je nutné znát tyto údaje:

- čas posledního sepnutí (T_{last})
- poslední celkovou dobu provozu (T_{total})
- jestli ventilátor právě běží nebo ne (bezi_nebezi)
- aktuální čas (T_{actual})

Čas budeme měřit v minutách a výpočet provedeme takto:

$T_{total} = T_{total} + (T_{actual} - T_{last})$ pro běžící ventilátor
$T_{total} = T_{total} + 0$ pro stojící ventilátor

Jak je vidět z rovnic pro právě běžící ventilátory, je nutné T_{total} aktualizovat, zatímco pro ventilátory stojící stačí číslo poslední. Výsledek výpočtu udávající dobu, jakou již ventilátor běžel, nemůže však sám být ohodnocovací funkcí. To by totiž vedlo k situaci, kdy by systém v každém kroku ventilace měnil ventilátory, protože se doba jejich běhu stále mění. Taková regulace je ale nejen velmi nešetrná k ventilátorům, ale také velmi neekonomická – když totiž ventilátor již běží, je dobré ho nechat běžet určitou dobu. Pokud má mít regulátor malou spotřebu elektrické energie, je nutné ohodnocovací funkci navrhnout specifičtěji.

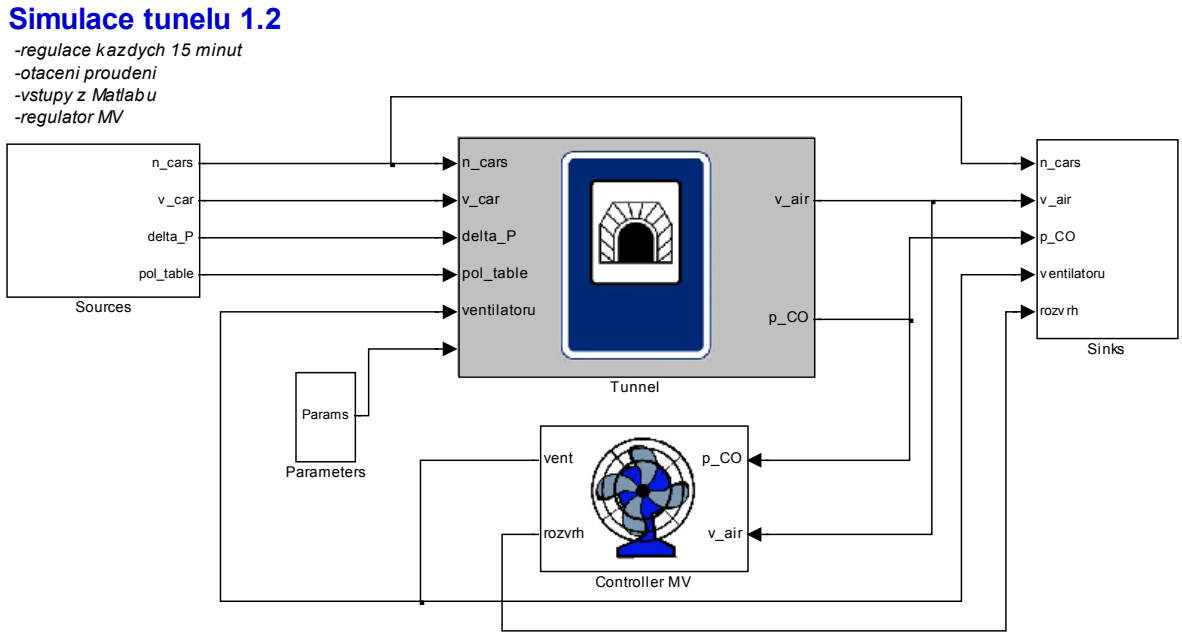
Proto jsme navrhli ohodnocovací funkci penalizace ventilátorů $P(n)$, kde n je číslo ventilátoru, která problém vypínání a zapínání vyřeší. Ohodnocovací funkce spočítá penalizaci takto:

$$P(n) = T_{total} - K1 \cdot bezi_nebezi + \max((0; K2 + K3 \cdot (T_{last} - T_{actual})^2))$$

Tato funkce po naladění konstant $K1$, $K2$ a $K3$ zaručí, že poběží právě ten ventilátor, který již dlouho neběžel. Zároveň nebude docházet k tomu, že by ventilátor, který běží pouze jeden cyklus, byl vypnut a místo něj byl zapnut jiný. Proměnná $bezi_nebezi$ nabývá hodnot 1, když je ventilátor zapnut, a -1, když je vypnut. Samotné ladění konstant $K1$-3 bude součástí ověřovací části. Předem je však možno říci, že konstanty budou moci velice dobře ovlivnit délku ventilačních cyklů jednotlivých ventilátorů.

6. Ověřování na simulátoru vzduchotechniky

Simulátor vzduchotechniky je simulační model založený na Bernoulliho rovnicích, rovnici kontinuity proudění a statickém makroskopickém modelu dopravy [1]. Tento model nám má sloužit pro ověření funkčnosti našeho regulátoru. Přestože je model statický, je velice dobrým zkušebním nástrojem díky užití metody Monte Carlo (viz odstavec 6.1). Simulátor vzduchotechniky vzešel z přípravné studie proudění v tunelu Sitina [4].



Obr. 8 - Simulační prostředí v Simulinku

Na obrázku je vidět simulační prostředí v programu Simulink, které je grafickým výstupem celého modelu a regulátoru. Ten je v obrázku reprezentován blokem s nápisem Controller MV.

6.1 Metoda Monte Carlo

V minulosti byl velký problém, jak analyzovat silně stochastické systémy. Při jaderném vývoji v 50. letech byla poprvé užita metoda, která je založena na provádění náhodných experimentů s modelem systému. Základem metody je stochastický model. Ten je většinou výpočetně nenáročný a velmi jednoduchý. Síla metody Monte Carlo (MC) však tkví v mnohonásobném opakování simulace při pseudonáhodných změnách parametrů. Protože je model výpočetně nenáročný, je díky moderní výpočetní technice možné provést řádově stovky simulací. Výsledek pak velmi dobře ukazuje, jak by se asi mohl systém chovat. [9]

Simulace MC je velice vhodným nástrojem pro diagnostiku právě našeho problému. Nejde zde totiž o případ, kdy chceme jasné výsledky v konkrétních číslech, ale spíše představu o chování námi navrženého regulátoru. Chceme zjistit, jestli je stabilním nástrojem pro regulaci ventilace při různých simulačních scénářích.

6.2 Postup simulace

Navržený regulátor byl implementován do programu Matlab a následně propojen se simulátorem vzduchotechniky. Při propojování bylo nutné provést některé menší úpravy, jako sjednocení vstupních a výstupních proměnných pro správnou komunikaci simulace s regulátorem nebo sjednocení simulačního času.

Dalším krokem k samotné simulaci je volba parametrů (viz odstavec 6.2.1), které jsou potom pomocí metody MC užity k odzkoušení funkce regulátoru. Sledovali jsme čtyři skupiny

parametrů – složení dopravy (osobní (OS) a nákladní), zastoupení dieselových osobních automobilů, emisní limity a tlakový rozdíl mezi tunelovými portály. Parametry jsme poté metodou „každý s každým“ složili do možných scénářů. O tom bude však řeč až dále, protože před samotnou simulací je nutné nastavit konstanty K1-3, které jsou velice důležité pro ohodnocovací funkci při spouštění ventilátorů.

6.2.1 Přehled skupin parametrů

Podle přístupu, který byl zvolen pro podobné tunely Panenská a Libouchec [2], jsme uvažovali následující skupiny parametrů:

- Doprava (D)
    - Silný provoz, pouze OS
    - Silný provoz, normální skladba
    - Slabý provoz, pouze OS
    - Slabý provoz, normální skladba
- Poměr diesel:benzín u OS (DB)
    - 1:3
    - 1:2
    - 2:3
    - 1:1
- Emise (E)
    - Nominální
    - Zvýšené o 20%
    - Snížené o 20%
    - Snížené o 40%
- Tlakový rozdíl (T)
    - Normální
    - Posílen kladný komínový efekt
    - Posílen záporný komínový efekt

Simulace jsou prováděny v 24 hodinovém cyklech s nejmenší jednotkou minuta, tedy graf ukazuje chování tunelu během jednoho dne resp. 1440 minut.

Kombinací výše uvedených skupin parametrů nám vyjde, že pro každé tunelové těleso dostaneme 192 simulačních scénářů. Pro každý simulační scénář pak provedeme simulaci celkem 20 krát pro různé kombinace vstupů.

6.2.2 Ladění konstant K1, K2 a K3

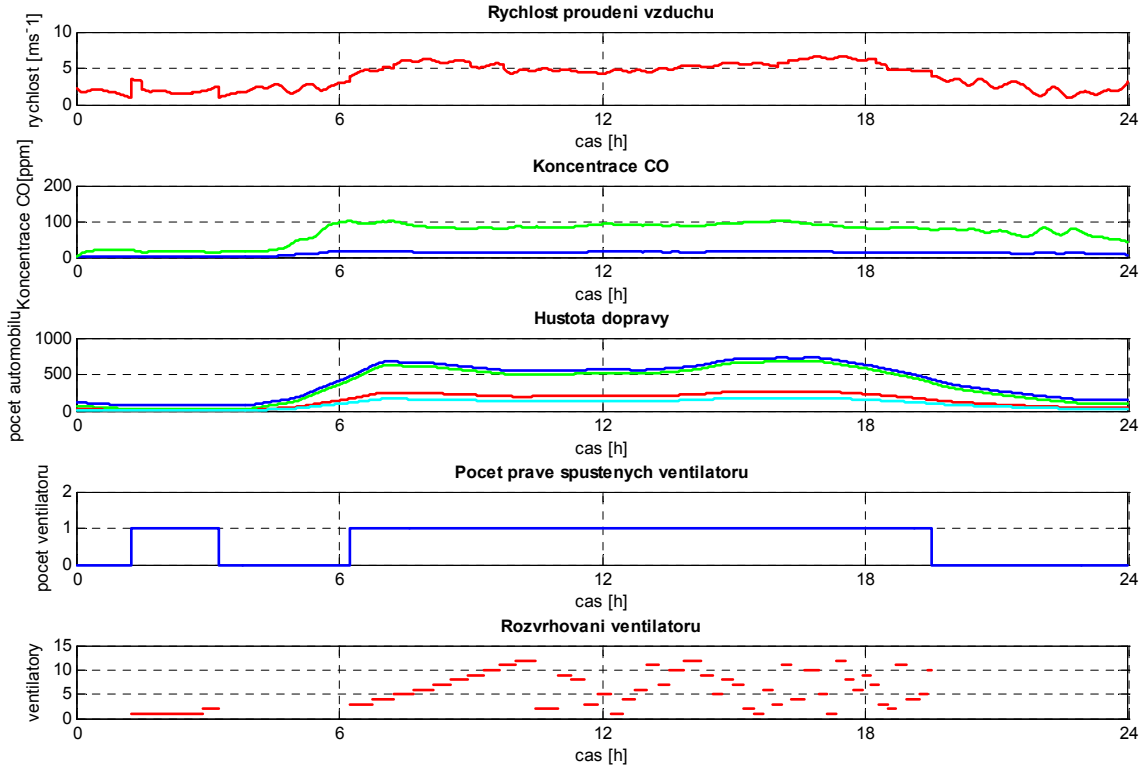
Konstanty K1, K2 a K3 jsme naladili pro tři různé režimy. Jak bylo výše zmíněno, je systém nastaven na simulační čas 1440 impulsů (minut). Jde tedy o to nastavit konstanty regulátoru tak, aby doba běhu jednoho ventilátoru byla v rozmezí dvaceti minut až dvou hodin. Dále tedy budou uvedena tři různá naladění a z grafů bude patrný dopad nastavení na chování regulace.

Konstanta	naladění I	naladění II	naladění III
K1	1000	100	10000
K2	0,1	$5{,}0*10^{10}$	1
K3	1	$5{,}0*10^{-10}$	1

Tabulka 4 - Přehled naladění konstant

V tabulce (viz Tabulka 4) je uveden přehled tří možných nastavení konstant, které jsou výsledkem ladění a jsou záměrně zvoleny tak, aby byl patrný dopad na chování rozvrhovacího systému.

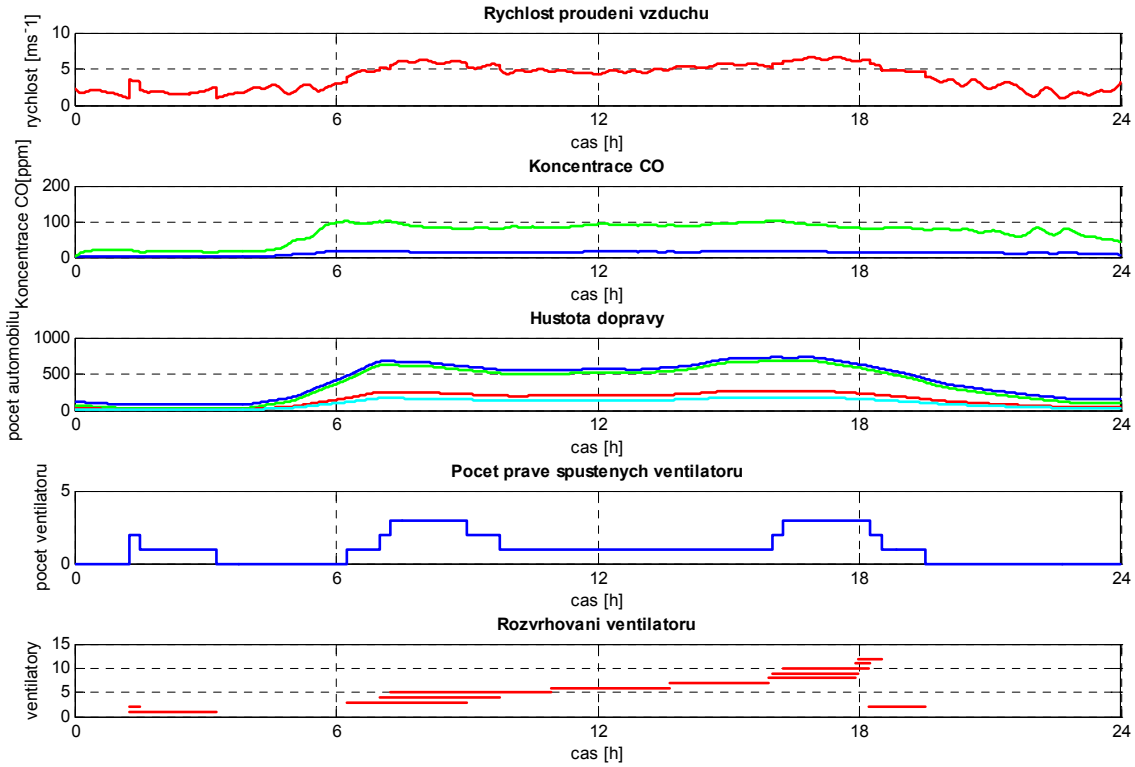
Úvodem je třeba říci, že všechna tři nastavení jsou testována za stejných podmínek, tedy stejného proudění vzduchu, stejné hladiny CO a stejné hustoty dopravy.



Obr. 9 - Nastavení I

Jak je vidět z grafu (viz Obr. 9), při nastavení I je počet ventilátorů zapnutých v jednu chvíli vždy maximálně jeden. Je to způsobeno tím, že regulátor je pomalý a na malá, krátká překročení limitu nereaguje. Je dále velice důležité všimnout si grafu rozvrhování ventilátorů. Zde je kromě prvního spuštění prvního ventilátoru, kde jde spíše o vyrovnání počátečních

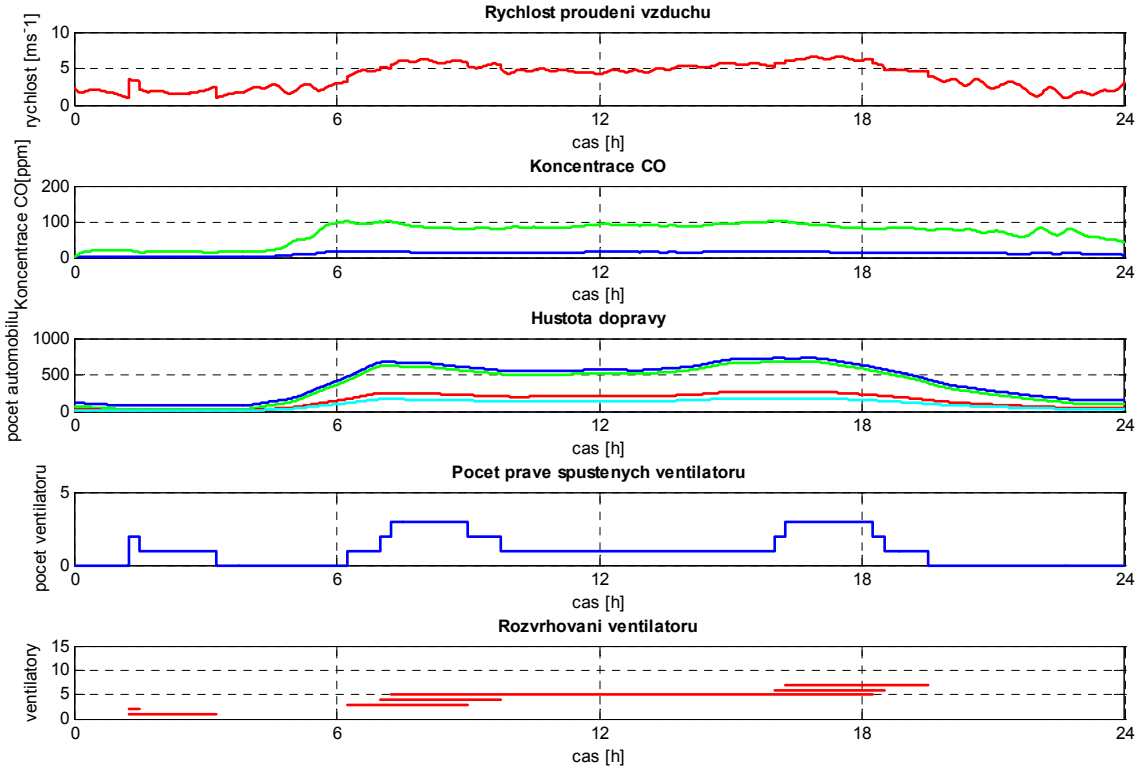
podmínek, velice krátká perioda spouštění jednotlivých ventilátorů. Regulátor nechá běžet jeden ventilátor maximálně cca 20 minut, velice rychle ventilátory střídá, a to by pro optimalizaci z hlediska životnosti nebylo výhodné. Ventilátor navíc při rozběhu odebírá více proudu než při rovnoměrném otáčení.



Obr. 10 - Nastavení II

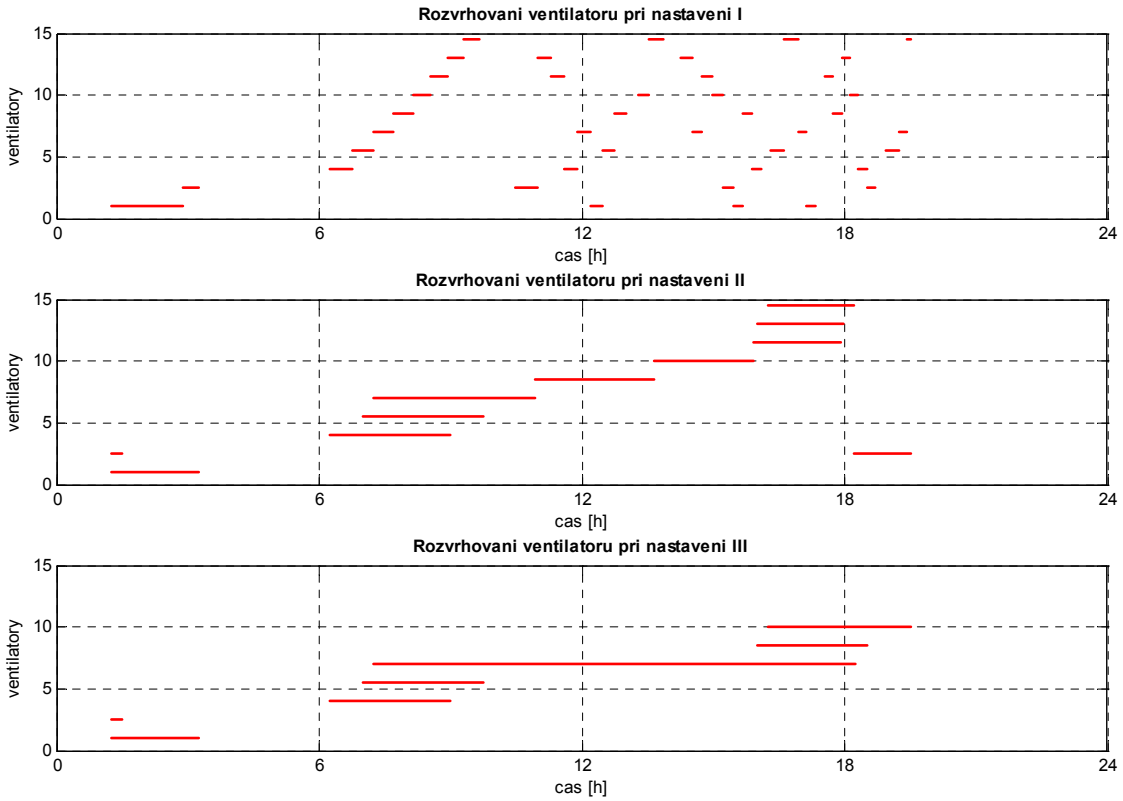
V tomto grafu (viz Obr. 10) je vidět již lepší rychlost reakce na malá, ale pro dodržení limitů důležitá překmitnutí hlídaných parametrů. Toto lepší chování je patrné z grafu z počtu právě spuštěných ventilátorů. Maximální počet zapnutých ventilátorů již není jeden, ale tři. Hned v úvodu je také vidět velice rychlá reakce na nedostatečné proudění vzduchu. Regulátor zapíná hned dva ventilátory najednou, aby se vyhnul případným komplikacím, o kterých jsme v souvislosti s nedostatečným prouděním již mluvili.

Velice dobře vypadá i graf rozvrhování ventilátorů. Za 24 hodin se všech dvanáct ventilátorů prostřídalo. Ventilátory nebyly stále zapínány a vypínány, což odpovídá naší podmínce energetické optimality. Doba jejich spuštění se pohybovala kolem dvou až tří hodin.



Obr. 11 - Nastaveni III

Nastavení III je v počtu právě spuštěných ventilátorů shodné s nastavením II, reakce je tedy taktéž velice pohotová. Výrazně rozdílné je rozvrhování ventilátorů. Přestože doba a počet zapnutých ventilátorů jsou shodné, možnost jejich pokrytí je velice rozdílná. Za 24 hodin nebyly zapnuty ani všechny ventilátory a pátý ventilátor běžel necelých 12 hodin. Takové nastavení by mohlo v horizontu více hodin či dní být i vhodné. Je ale riziko, že intenzita průjezdu a skladby automobilů je přibližně periodický děj, který se opakuje ve 24 hodinovém cyklu. Je tedy velice pravděpodobné, že by se systém choval stále stejně a nepoměrně zatěžoval jeden ventilátor, tak, jako je tomu v případě pátého ventilátoru. Toto nastavení je tedy sice dostatečně rychlé, nedokáže však dostatečně rovnoměrně zapínat ventilátory.



Obr. 12 - Srovnání grafů rozvrhování pro všechna nastavení

Na závěr pro srovnání všech tří nastavení ukazuje graf (viz Obr. 12) všechny tři rozvrhy. Na srovnávacím grafu je nejlépe vidět, jak velký rozdíl v chování regulátorů může způsobit různé nastavení konstant K1, K2 a K3.

Nastavení	Doba provozu [min]
I	945
II	1470
III	1470

Tabulka 5 – Doby provozu ventilátorů při jednotlivých nastaveních

Jak je vidět z tabulky (Tabulka 5), nejmenší dobu provozu ventilátorů sice vykazuje nastavení I, přesto není vhodné, a to kvůli častému spínání, které způsobuje vyšší odběr proudu při rozběhu a snižuje životnost ventilátorů. Nastavení II bylo nejlepším vzhledem k našim požadavků pro rychlost reakce a zároveň potřeby ekonomického spínání ventilátorů. Toto nastavení proto použijeme v závěrečné části, kde budeme pomocí metody MC simulovat různé scénáře (viz odstavec 6.1).

6.3 Simulace

V simulaci budeme tedy, jak již bylo řečeno, využívat pro nastavení konstant K nastavení II. Dále byli zvoleny tři scénáře s různou skladbou parametrů (viz odstavec 6.2.1), které budou pro chování systému charakteristické. Poté byla spuštěna simulace.

Zvolili jsme následující scénáře:

I. scénář:
   a. Doprava – silný provoz, normální skladba
   b. Poměr diesel:benzín u OS – 1:2
   c. Emise – zvýšené o 20%
   d. Tlakový rozdíl – posílen záporný komínový efekt

II. scénář:
   a. Doprava – slabý provoz, pouze OS
   b. Poměr diesel:benzín u OS – 2:3
   c. Emise – zvýšené o 20%
   d. Tlakový rozdíl – normální

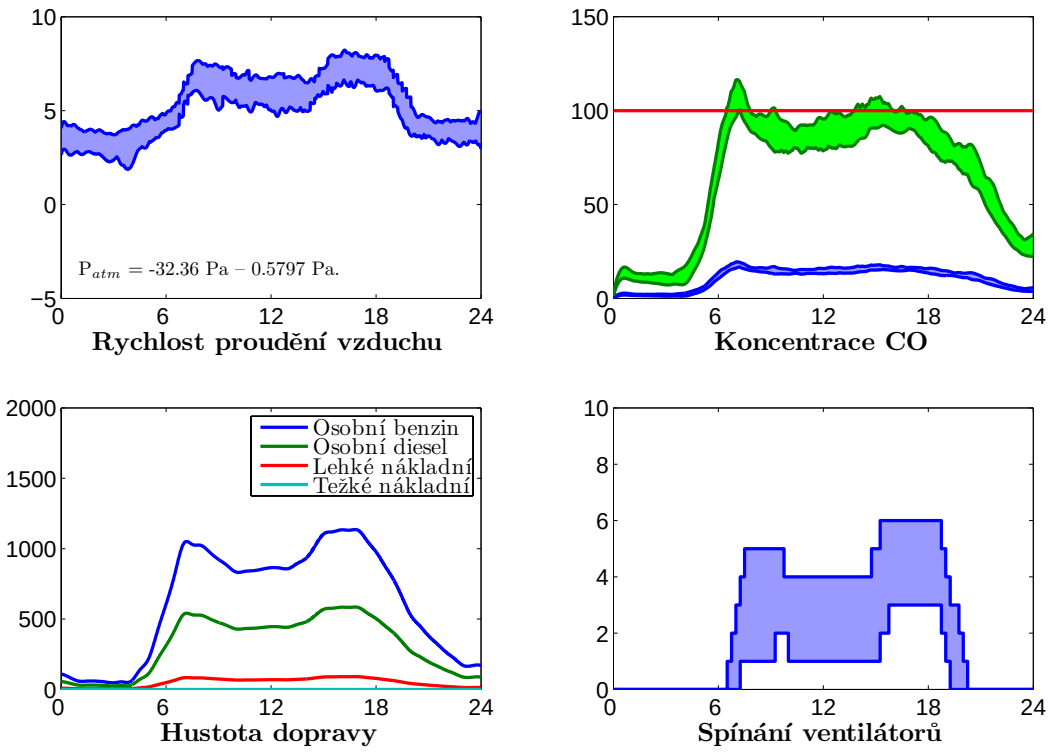
III. scénář:
   a. Doprava – slabý provoz, normální skladba
   b. Poměr diesel:benzín u OS – 1:1
   c. Emise – nominální
   d. Tlakový rozdíl – posílen kladný komínový efekt

Scénáře jsou zvoleny tak, aby bylo možné zjistit, zda se regulátor dokáže vyrovnat s různými situacemi, které mohou v tunelu nastat.

6.3.1 Rozbor výsledků simulace

Simulace se podařila uspokojivě. Je však vhodné grafy okomentovat, neboť je na nich několik detailů, které zasluhují naši pozornost.

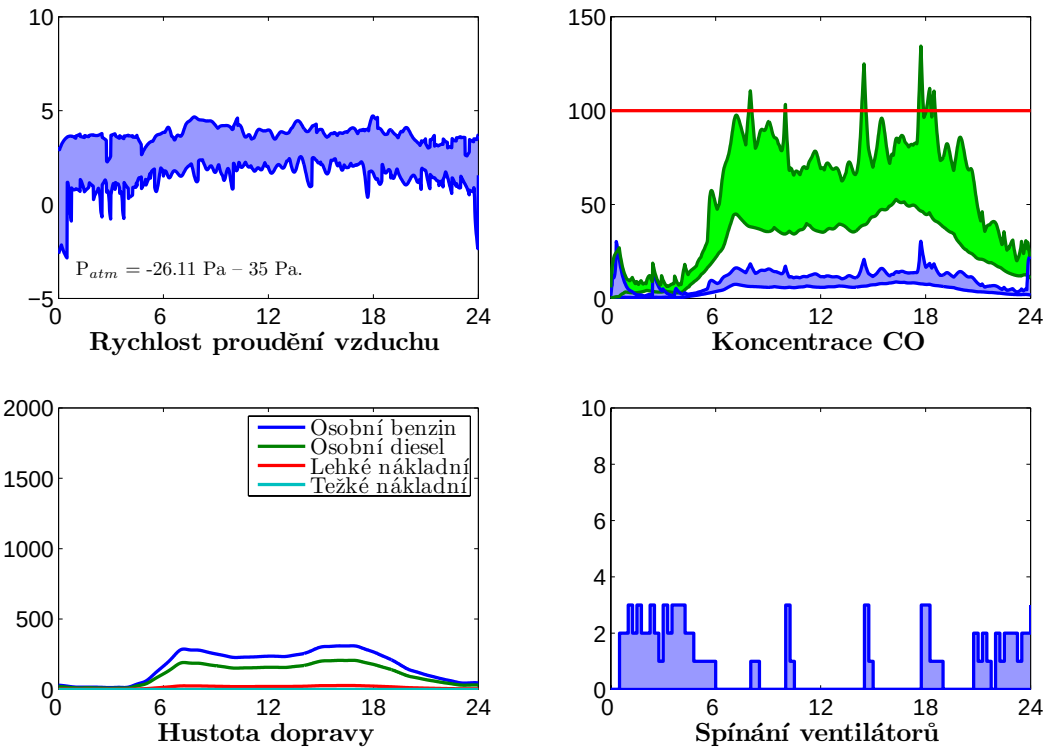
V úvodu by bylo dobré vysvětlit, jak vůbec tyto grafy vznikají. U rychlosti proudění a koncentrace CO se totiž jedná o složené grafy simulující signály z více senzorů, navíc zašuměných. Grafy spínání ventilátorů také přesně neudávají jeden výsledek, jde totiž o interval, ve kterém se výsledky simulace pohybovaly. Jedině grafy hustoty dopravy jsou jasně určeny, neboť jsou jasným a nezašuměným vstupem do regulace, který udává počet automobilů dané kategorie, projíždějících tunelem danou chvíli.



Obr. 13 - Scénář I

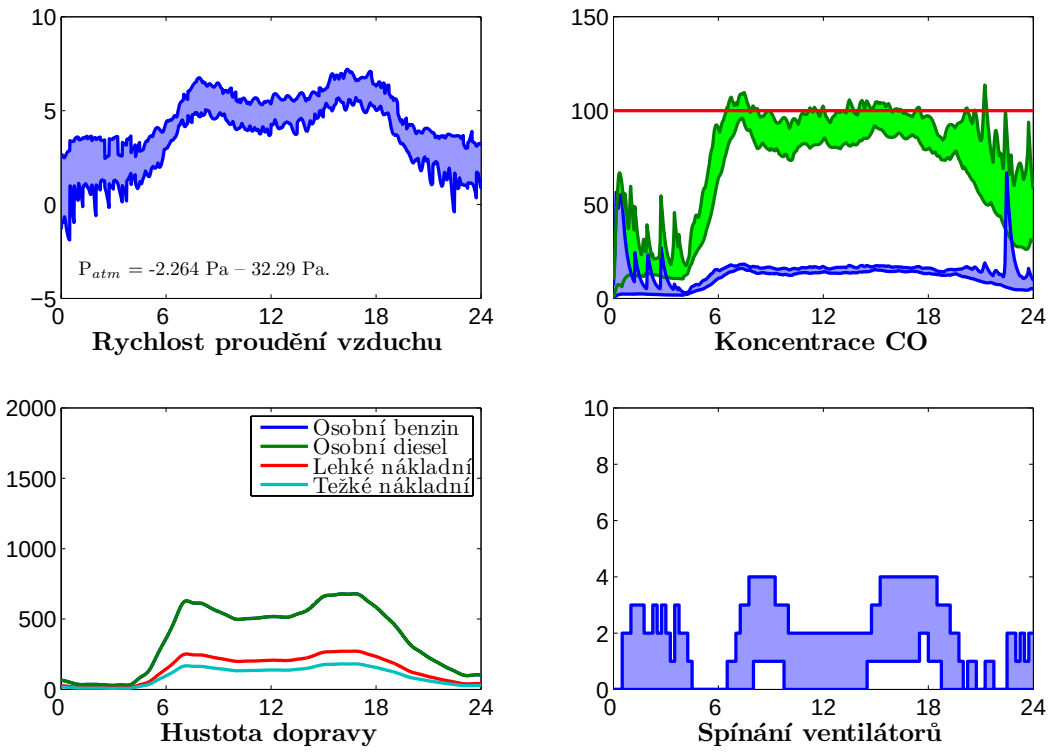
U scénáře I (viz Obr. 13) se jedná o situaci, kdy je provoz velice silný a poměr osobních automobilů s benzínovými motory a dieselovými motory je 2:1. Taková situace je velice nepříjemná, je zde však jeden pozitivní faktor – posílený kladný komínový efekt. Ten pomáhá ventilaci, protože sám vytváří ve směru pohybu automobilů „průvan“. Je zde ale ještě jedna nepříjemnost, a tou je zvýšení emisí o 20 %.

Když se zaměříme na grafy postupně, je vidět, že proudění vzduchu je celou dobu vysoce nad limitem, což je správně. Počet automobilů je vysoký. Koncentrace CO dvakrát významně překročí limity, a to jasně souvisí s počtem automobilů projíždějících v danou chvíli tunelem. Spínání ventilátorů se děje samozřejmě v závislosti na překročených limitech CO. V nejhorších situacích (tedy kolem 7:00 a 15:00 hodin) se odvětrává dvěma až šesti ventilátory najednou.



Obr. 14 - Scénář II

Náročným by pro regulaci měl být i druhý scénář, kde je sice normální tlak a slabý provoz osobních automobilů, jsou však zvýšené emise o 20 %. Jde tedy o situaci, která by mohla být nebezpečná. Je zde však jeden důležitý faktor – málo osobních aut vytváří i méně škodlivin, a zároveň automobily, které jedou ve velkých rozestupech, vytvářejí lépe pístový efekt. Toto vše se také ukázalo na grafech scénáře II. Nedostatečná rychlost proudění vzduchu vedla k zapnutí jednoho až tří ventilátorů v ranních a večerních hodinách (jezdí opravdu málo automobilů a pístový efekt nestačí). Jinak přes den byla situace příznivá a pístový efekt stačil, až na několik výjimek, kdy se muselo pro překročení koncentrace CO ventilovat. Situace ale zdaleka nebyla tak špatná jako u grafů scénáře I, protože počet zapnutých ventilátorů nepřekročil tři zároveň zapnuté.



Obr. 15 - Scénář III

Scénář III, kde je slabý provoz s normální skladbou a nominální hodnotou emisí, by neměl být ničím zajímavý. Je tu však jedna nesrovnalost v grafu hustoty dopravy - benzínové a dieselové automobily jsou totiž v poměru 1:1, a tudíž není vidět modrá čára benzínových automobilů. Tento poměr, kdy dieselových automobilů je tolik, vede k vysokým koncentracím CO a v kombinaci s posílením kladného komínového efektu je situace horší než u scénáře II. Počet ventilátorů se stále pohybuje v intervalu mezi jedním a čtyřmi ventilátory, tudíž je stále velká rezerva pro mnohem horší scénáře.

Celá simulace dopadla velice uspokojivě a ukázalo se, že při počtu 10 resp. 12 ventilátorů má tunel veliké rezervy i při velice náročných scénářích, jaké by se v něm mohly odehrát.

7. Závěr

Obsahem této práce byl komplexní návrh řízení ventilace tunelu Sitina včetně hlídání parametrů spotřeby energie.

V průběhu práce byl nejdříve navržen algoritmus pro automatickou ventilaci, následně připojen algoritmus pro rozhodovaní spínání ventilátorů a nakonec byl celý systém napojen na zkušební simulátor tunelové ventilace. Zde byly nejdříve nastaveny parametry ovlivňující penalizační resp. ohodnocovací funkci pro rozvrhování ventilátorů. V závěru byly zvoleny scénáře pro simulaci MC.

Simulace ověřila, že regulátor je schopen za různých situací (scénářů) vždy dobře odvětrat tunelové roury. Při odzkoušených scénářích se nevyužilo nikdy více než 6 ventilátorů najednou, což dokazuje velké rezervy a dostatečnost celého systému regulace.

Použitá literatura

[1] "Simulation of traffic, ventilation and exhaust in a complex road tunnel,", Ferkl, L., Kurka, L., Sládek, O., and Pořízek, J., In Proc. of IFAC 2005, Prague, 2005..

[2] Řízení vzduchotechniky v tunelu Panenská a Libouchec, Ferkl, L. a kol., Praha 2005

[3] "Technologické vybavení tunelů pozemních komunikací - technické podmínky (TP98)", Ministerstvo dopravy a spojů & Eltodo EG, Praha, 2003

[4] "Simulácia VZT tunelu Sitina", technická zpráva, Kybertec, s.r.o., Chrudim, 2006

[5] Konstrukce (časopis) (online). 17. 3. 2005 (cit.25.4.2007) World Wide Web: http://www.konstrukce.cz/index.php?clanek=252

[6] Slovenská správa cest (SSC) (online). 16.09.2004 (cit.20.4.2007) World Wide Web:http://www.ssc.sk/user/view_page.php?page_id=425

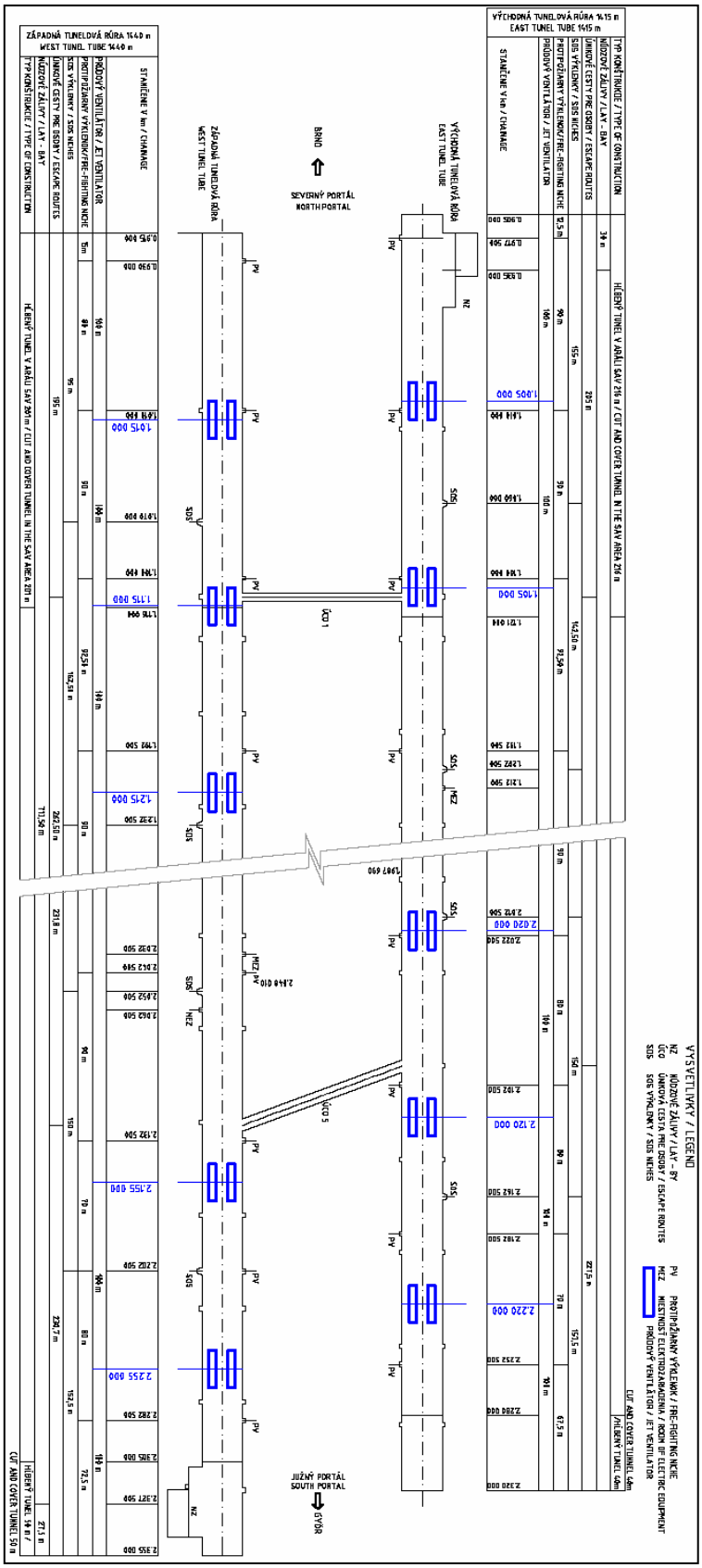
[7] Diaľnice a tunely na Slovensku (online) 27.6.2007 (cit. 15.7.2007) World Wide Web: http://www.highways.sk/index.html

[8] Požiarna bezpečnosť cestných tunelov , Technický predpis 04/2006, účinnosť od 01. 12. 2006 World Wide Web: www.ssc.sk/custom/tp/2006/TP_04_2006_konecne.pdf

[9] Wikipedie, mnohojazyčná webová encyklopedie, 30. 1. 2007 (cit.8.8.2007) World Wide Web: http://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_Monte_Carlo

[10] Autor fotografií: Marián Balaj (obr. 2,3)

Příloha A – Obsah vloženého CD

- elektronická podoba této práce ve formátu .pdf (bc_prace.pdf)
- nákres tunelu viz příloha B ve formátu .pdf (tunel.pdf)
- všechny tabulky užité v práci (tabulky.xls)
- všechny grafy užité v práci (adresář - grafy)
- zdrojové kódy programu pro Matlab

Príloha B – Nákres tunelu Sitina