České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Simulace a řízení ventilace dálničních tunelů

Praha, 2010 **Autor: Jan Šulc**

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

Poděkování

Chtěl bych poděkovat všem, kteří se podíleli na tvorbě této práce, ať už přímo nebo nepřímo. Děkuji především vedoucímu bakalářské práce Ing. Lukáši Ferklovi PhD., který se mi po celou dobu tvorby bakalářské práce ochotně věnoval a dal mi cenné rady a připomínky.

Dále bych chtěl poděkovat mému otci Ing. Pavlu Šulcovi, který mi v rámci své projekční činnosti zprostředkoval kontakty na společnosti, které se dané problematice věnují a poskytly mi mnoho důležitého pracovního materiálu. Jedná se především o firmu Spel Kolín spol. s r.o., Ředitelství silnic a dálnic ČR - oddělení telematiky a tunelového technologa Ing. Aleše Lebla. Právě firmě Spel Kolín spol. s r.o. patří výrazný dík, neboť tato firma mě nechala pod svoji záštitou tuto práci zpracovat. Ostatním výše uvedeným společnostem rovněž děkuji.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce bylo seznámit se se základními principy větrání a s fyzikálními ději ovlivňujícími zplodiny v dálničních tunelech. Potom bylo zapotřebí navrhnout univerzální simulátor koncentrací škodlivin včetně algoritmu pro provozní větrání v libovolném dálničním tunelu. Simulátor byl otestován na dvou dálničních tunelech – Radejčín a Klimkovice, přičemž tunel Radejčín je v současné době v realizaci a bude vybaven vzduchotechnikou. Před nasazením vzduchotechniky do provozu je nutné provést simulace pro různé dopravní situace.

Firma Spel Kolín spol. s.r.o. může využít tento simulátor při výstavbě dalších dálničních tunelů.

Abstract

The objective of this bachelor thesis was to study the basic principles of the ventilation and physical processes that influence exhaust pollutants in the highway tunnels. It was necessary to program the simulator of the exhaust pollutants concentrations and the suitable algorithm of the operating ventilation. This simulator was tested on two highway tunnels – Radejcin and Klimkovice. The Radejcin tunnel is under construction and will be equipped with air conditioning. It is important to simulate this tunnel for the different traffic situations before applying ventilation on the real system.

The company Spel Kolin spol. s.r.o. can use this simulator during the realization of future tunnels.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Jan Šulc**

Studijní program: Elektrotechnika a informatika (bakalářský), strukturovaný
Obor: Kybernetika a měření

Název tématu: **Simulace a řízení ventilace dálničních tunelů**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s požadavky na řídicí systémy dálničních tunelů.
2. Seznamte se s fyzikálními ději ovlivňujícími zplodiny v dálničních tunelech.
3. Naprogramujte simulátor hladiny zplodin a proudění v tunelech a řízení, které zajistí splnění hygienických limitů.

Seznam odborné literatury:

[1] 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.
[2] Technologické vybavení tunelů pozemních komunikací – technické podmínky (TP98), Ministerstvo dopravy a spojů & Eltodo EG, Praha, 2003.

Vedoucí: Ing. Lukáš Ferkl, Ph.D.

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2010/2011

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

L.S.

doc. Ing. Boris Šimák, CSc.
děkan

V Praze dne 26. 1. 2010

Obsah

1 Úvod **1**

1.1 Osobní příběh 1

1.2 Struktura a cíl práce 2

1.3 Motivace výstavby silničních tunelů 3

2 Tunely a jejich parametry **4**

2.1 Klasifikace tunelů 4

2.2 Tunel jako inteligentní dopravní stavba 6

2.3 Popis tunelů rozebíraných v této práci 7

2.3.1 Tunel Klimkovice 8

2.3.2 Tunel Radejčín 9

3 Ventilace v dálničních tunelech **10**

3.1 Provozní ventilace 10

3.1.1 Výpočet koncentrací škodlivin v tunelu 11

3.1.2 Bernoulliho rovnice pro výpočet rychlosti proudění 14

3.2 Požární ventilace 16

4 Řídicí systém vzduchotechniky **19**

4.1 Typy a parametry ventilátorů 19

4.1.1 Parametry ventilátorů v tunelech Radejčín a Klimkovice 21

4.2 Možnosti regulace 22

4.3 Algoritmus řízení použitý v simulátoru vzduchotechniky 24

5 Popis aplikace **28**

5.1 Uživatelská část aplikace 28

5.2 Řídicí část aplikace 31

6 Simulace **34**
6.1 Simulace na tunelu Radejčín 34
6.2 Simulace na tunelu Klimkovice 44

7 Závěr **48**

Literatura **50**

A Uživatelský manuál **I**
A.1 Instalace III
A.2 Spuštění aplikace III
A.3 Nastavení dopravního profilu V
A.4 Simulace IX
A.5 Načítání a ukládání dat XI
A.6 Nápověda XII

B Komunikace mezi prostředím .NET a Matlab **XIII**
B.1 Požadavky a možnosti XV
B.2 Matlab Compiler Runtime(MCR) XV
B.3 Deployment tool XV
B.4 Ukázkový příklad XVI

C Obsah přiloženého CD **XXIV**

Kapitola 1

Úvod

Tunely patří od druhé poloviny minulého století k tomu nejzajímavějšímu, co lze na silnicích a dálnicích spatřit. Ať už pro obyčejného řidiče na služební cestě nebo pro cestujícího autobusem je jízda tunelem samozřejmostí, pro někoho dokonce každodenní záležitostí. Většina z nich ovšem netuší, že za tím temným, mnohdy i dlouhým válcovým útvarem se skrývá mnoho let práce z oblasti architektury, strojařiny, informatiky, elektroinženýrství a také řídicí techniky. Právě proto jsem si vybral téma této bakalářské práce.

1.1 Osobní příběh

V úvodu této bakalářské práce bych se rád krátce zmínil o tom, jak jsem se vůbec k této práci dostal. Již čtvrtým rokem chodím přes léto na brigády do firmy *Telprojekt spol. s r.o.*, která se zabývá projektováním telekomunikačních sítí na silnicích v ČR. Tato firma projektovala mimo jiné úsek 0807 dálnice D8 Trmice-státní hranice, na kterém se nachází v současnosti náš nejdelší dálniční tunel Panenská s délkou přes 2 kilometry. Firma, která realizovala tuto stavbu, se jmenuje *Spel Kolín spol. s r.o.*, viz. [2]. Tato firma bude realizovat i poslední nedokončený úsek dálnice D8–0805 Lovosice-Řehlovice, na které se nacházejí 2 tunely, Radejčínský a Prackovický. Prvně zmiňovaný tunel bude vybaven vzduchotechnikou, která musí zajistit bezpečné větrání v případě požáru a v případě nadměrných zplodin, které produkují automobily projíždějící tunelem. Firma *Spel Kolín spol. s r.o.* mi zadala zpracovat simulaci řízení vzduchotechniky právě na Radejčínský tunel. Simulace jsou potřeba provést vždy před nasazením vzduchotechniky do provozu, aby se vědělo, jakým způsobem se budou ventilátory za různých dopravních

situací v tunelu „chovat“. Úsek dálnice D8 Lovosice-Řehlovice se bude otvírat v prosinci roku 2010.

Obrázek 1.1: Stavba tunelu Prackovice – dálnice D8, březen 2010
©http://www.ceskedalnice.cz

1.2 Struktura a cíl práce

Cílem práce je naprogramovat simulátor řízení vzduchotechniky libovolného dálničního tunelu. Jádrem simulátoru je matematický model tunelu. Řídicí systém vzduchotechniky musí zajistit splnění maximálních povolených hygienických limitů koncentrací škodlivin. Aplikace představuje pohodlné uživatelské rozhraní pro zadávání vstupních parametrů tunelu jako je jeho délka, průřez, parametry ventilátorů, atd, a pro simulaci různých dopravních situací, jako je plynulý provoz, zvýšený provoz, zvýšené koncentrace emisí, nepříznivé povětrnostní podmínky apod.

Práce je rozdělena celkem do sedmi kapitol. Po první úvodní kapitole následuje druhá kapitola, která se věnuje charakteristikám tunelů a popisuje reálné tunely, na kterých byl otestován naprogramovaný simulátor. Kapitola 3 podává základní informace o větrání

v tunelu. Uvádí rovnice, podle kterých lze sestavit matematický model tunelu a také vypočítat koncentrace emisí. Tento model je použit v simulátoru řízení vzduchotechniky. Kapitola 4 se věnuje základním koncepcím a možnostem regulace větrání v dálničních tunelech a nastiňuje řešení pro případy dálničních tunelů řešených v této bakalářské práci – Radejčín a Klimkovice. Kapitola 5 se věnuje popisu naprogramované aplikace, a to především z hlediska vnitřního, protože návod na ovládání aplikace (uživatelský manuál) je součástí příloh této práce. Předposlední šestá kapitola ukazuje výsledky simulace na obou zmiňovaných dálničních tunelech. Obsahem sedmé, poslední kapitoly, je závěr shrnutí práce.

1.3 Motivace výstavby silničních tunelů

Výstavba dálnice znamená významný zásah do přírodní krajiny. Jedná se především o rozsáhlé kácení lesů, zábor úrodné zemědělské půdy a dalších pozemků a v neposlední řadě také znečišťování vodních zdrojů. Pro zvířata, ale také obyvatele znamená dálnice rozdělení oblasti, ve které žijí, na dvě poloviny, mezi kterými neexistuje žádné spojení.

Motivace pro výstavbu dálničních tunelů je hlavně z hlediska krajinářského a dopravního. Silniční tunel představuje jakési částečné řešení výše uvedených problémů, protože nepředstavuje téměř žádné nároky na zábor pozemků, dále odvádí z obcí a měst hluk a zplodiny z projíždějících automobilů a umožní spojení mezi oběma stranami dálnice, protože vede pod povrchem. V poslední době se některé tunely staví záměrně za účelem umožnit zvířatům a např. i turistům volný přechod přes dálnici. Takovýmto tunelům se říká ekodukt. Některé tunely mohou také sloužit jako nouzový úkryt např. v případě teroristického útoku.

Nevýhodou výstavby tunelu je fakt, že náklady na jeho výstavbu jsou neúměrné vůči nákladům na stavbu samotné dálnice a také to, že při ražení nebo hloubení tunelu může dojít k nežádoucímu narušení vodních zdrojů a nebezpečným propadům a sesuvům půdy. Příkladem může být ražení pražského tunelového komplexu Blanka, který zapříčinil propady půdy v holešovické Stromovce před necelými dvěma lety.

Kapitola 2

Tunely a jejich parametry

2.1 Klasifikace tunelů

V této části nejprve uvedu základní parametry tunelů, poté se budu věnovat rozdělení tunelů podle různých hledisek a nakonec uvedu přehled největších silničních tunelů v České republice.

Silniční tunely se vyznačují několika základními parametry, které dostatečně popisují tvar tunelu:

- délka (obvykle 200-2000 m)
- průměr (obvykle 9-15 m)
- průřez (obvykle 50-120 m^2)
- stoupání vozovky (obvykle 0-4 %)

Silniční tunely můžeme rozdělit podle několika kritérií. Prvním základním kritériem je to, na jakém typu silnice se nacházejí:

- dálniční tunely (př. tunel Klimkovice – dálnice D1)
- tunely na rychlostní silnici (př. tunel Komořany – Silnice R1)
- tunely na silnici I. třídy (př. Husovický tunel – Silnice I/42)
- městské tunely (př. tunel Mrázovka v Praze)

Dalším důležitým kritériem dělení tunelů je podle počtu tubusů:

- jednotubusový (př. tunel Hřebeč – silnice I/35)
- dvoutubusový (př. tunel Libouchec – dálnice D8)

Přičemž se sluší připomenout, že všechny dálniční tunely musí být podle norem minimálně dvoutubusové. Třetím kritériem je dělení podle počtu silničních pruhů v jednom tubusu:

- dvoupruhový (př. tunel Valík – dálnice D5)
- třípruhový (př. tunel Lahovice – silnice R1)

Všechny dálniční tunely a některé další se označují velkým písmenem T, za nímž následuje číslo, které charakterizuje šířku vozovky uvnitř jednoho tubusu, tedy např. T 9,5.

V České republice je v současné době v provozu celkem **15 tunelů** s celkovou délkou přes 100 metrů, z toho 4 dálniční, 1 na rychlostní silnici, 2 na silnici I. třídy a 8 městských tunelů. Ve výstavbě je v současné době **6 tunelů** (2 dálniční – Radejčín a Prackovice, 2 na rychlostní silnici – Komořany a Lahovice a 2 městské tunely – tunel Blanka a Dobrovského tunel). Pro zajímavost jsou zde uvedeny tabulky se všemi tunely v ČR s délkou přes 100 m, které jsou v provozu a ve výstavbě.

Tabulka 2.1: Tabulka provozovaných silničních tunelů v České republice [3]

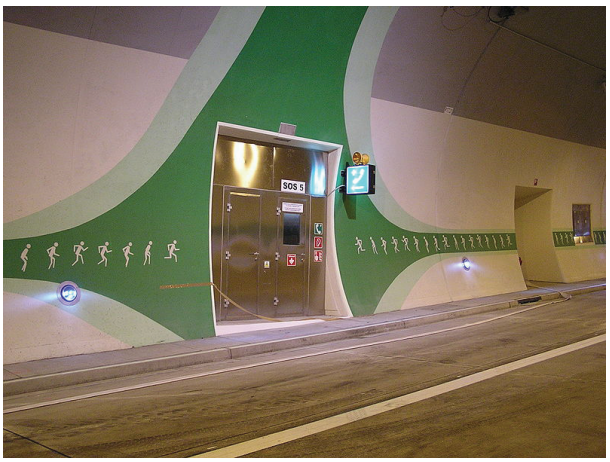
tunel	kategorie	silnice	délka[m]	v provozu od
Panenská	T 9,5	dálnice D8	L=2167.7 P=2115.7	2006
Strahovský	–	MO Praha	L=2004 P=2004	1997
Mrázovka	–	MO Praha	L=1295 P=1264	2004
Klimkovice	T 9,5	D1	L=1076,82 P=1088,09	2008
Husovický	–	MO Brno	L=585 P=578	1998
Libouchec	T 9,5	D8	L=504 P=520	2006
Pisárecký	–	Brno	L=512 P=407	1997-1998
Liberecký	–	R35	450	1997-1998
Letenský	–	Praha	426	1953
Valík	T 11,5	dálnice D5	L=380 P=390	2006
Hřebeč	–	I/53	357	1997
Těšnovský	–	Praha	350	1985
Hlinky	–	MO Brno	312	2007
Jihlava-Kosov	–	I/38	304	2004
Zlíchov	–	MO Praha	152,3	2002

Tabulka 2.2: Tabulka silničních tunelů v České republice v realizaci [3]

tunel	kategorie	silnice	délka[m]	uvedení do provozu
Blanka	–	MO Praha	L=5502.2 P=5489.14	2011
Komořanský	T 9,5 a T 13	R1	L=1937 P=1937	2010
Lahovický	T 9,5 a T 13	R1	L=1620 P=1658	2010
Dobrovského	T 8,5	MO Brno	L=1239,87 P=1261,25	2011
Radejčin	T 9,5	dálnice D8	L=620 P=610	2010
Prackovice	T 9,5	dálnice D8	L=260 P=270	2010

2.2 Tunel jako inteligentní dopravní stavba

Po požárech z 24. 3. 1999 ve Francii, kde v tunelu pod horou Mont Blanc uhořelo 39 lidí a z 29. 5. 1999 v Rakousku v Tauernském tunelu pod rakouskými Alpami, který si vyžádal 12 obětí, se začaly zvyšovat nároky na zabezpečení tunelu. V dnešní době tedy můžeme říci, že dálniční tunel je z hlediska informačního, řídicího a bezpečnostního inteligentní dopravní stavba. Existuje mnoho předpisů, podle kterých musí být tunely v dnešní době vybaveny. Jedná se zejména o technické podmínky TP 98 – Technologické vybavení tunelů pozemních komunikací [4] a podobnou evropskou normu 2004/54/EC [5]. Podle TP 98 musí být tunely vybaveny především **tunelovými hláskami systému SOS**, což jsou výklenky pravidelně rozmístěné po celé délce tunelu. Hlásky jsou vybaveny nouzovým telefonem pro spojení s dispečerem tunelu, který dohlíží na provoz tunelu v provozně technologickém objektu poblíž vlastního tunelu, dále poplachovým tlačítkem pro přivolání pomoci, tlačítkovým hlásičem požáru a přenosným hasicím přístrojem.



Obrázek 2.1: Hláska v tunelu Valík – dálnice D5
autor: Petr Vykoukal

Další z technologií zajišťujících bezpečnost provozu v tunelu je **videodohled**. Kamerové systémy neustále kontrolují tunel po celé jeho délce, s pomocí čidel pro měření opacity jsou schopny zachytit jakýkoli požár. Kamery v tunelech musí také kontrolovat nejvyšší povolenou rychlost automobilů v tunelu a nejmenší povolenou vzdálenost mezi vozidly. V případě volání z SOS hlásky v tunelu se na obrazovce dispečera automaticky objeví obraz snímající daný úsek tunelu.

Každý tunel musí být podle TP 98 vybaven **proměnnými dopravními značkami (PDZ)**. Tyto značky musí být rozmístěny po celé délce tunelu a informují řidiče o nejvyšší povolené rychlosti, uzavírkách dopravních pruhů a také o uzavření celého tunelu.

Kromě výše uvedených systémů musí být tunel vybaven **osvětlením**, které pomáhá řidičům zvyknout si na šeré podmínky při průjezdu tunelem a zlepšuje akomodaci oka řidiče, a také **vzduchotechnikou**, jejíž řešení bude obsahem této práce.

2.3 Popis tunelů rozebíraných v této práci

Obsahem této práce bude simulace řízení vzduchotechiky na dvou dálničních tunelech. Jedná se o jeden tunel, který je již v plném provozu, a jeden tunel, který je v realizaci, přičemž jeho uvedení do provozu se plánuje na konci roku 2010.

2.3.1 Tunel Klimkovice

Prvním tunelem, na kterém otestuji svůj simulátor vzduchotechniky, bude náš v současnosti čtvrtý nejdelší silniční a druhý nejdelší dálniční tunel – tunel Klimkovice. Tunel Klimkovice se nachází na 344,7 km dálnice D1, úseku 4707 – Bílovec-Ostrava (Rudná). 30. června 2005 byla zahájena ražba tunelu ze strany brněnského portálu. 12. prosince 2005 byl slavnostně proražen pravý tubus. 15. února 2006 byl proražen levý tubus. Tubusy byly raženy tzv. *novou rakouskou tunelovací metodou.* Tunel byl slavnostně otevřen 6. 5. 2008 a jeho náklady na stavbu se vyšplhaly na 2,43 miliardy korun.

Jedná se o dvoutubusový a dvouproudý dálniční tunel s označením T 9,5. Levá tunelová trouba měří 1077 metrů, z toho ražená část měří 865 metrů a pravá tunelová trouba měří 1088 metrů, z toho raženo bylo 875 metrů. Obě tunelové trouby jsou navrženy pro maximální povolenou rychlost 80 km/h. Tunely jsou uvnitř široké 10 m (2x3,5 m dálniční pruhy + 2x0,5 m vodicí proužky + 2x1 m oboustranné chodníky). Průřez tunelu je přibližně konstantní – 72 m^2. Stoupání v tunelových troubách je ±0,6 %. Tunelové roury jsou propojeny 5 tunelovými propojkami určenými především pro bezpečný únik osob v případě požáru. V místě středové propojky jsou zřízeny nouzové zálivy, v každém tubusu jeden o délce 40 m, a spojka je propojena na povrch vertikální šachtou hloubky 31,14 m.

Obrázek 2.2: Tunel Klimkovice – dálnice D1, km 344,700
©http://www.ita-aites.cz/showdoc.do?docid=1981

2.3.2 Tunel Radejčín

Druhým tunelem, který bude náplní této práce, je dosud nedokončený dálniční tunel Radejčín. Tunel Radejčín je součástí posledního nedokončeného úseku dálnice D8, stavby 0805 – Lovosice-Řehlovice. Úsek 0805 dálnice D8 má velký dopravní význam. Po předpokládaném dokončení této stavby, tedy v prosinci roku 2010, dojde k úplnému propojení dálnice D8 z Prahy přes Lovosice, do Ústí nad Labem až na státní hranici s Německem a napojení na německou dálnici A17 vedoucí do Drážďan. Tím dojde ke zrychlení a zlepšení tranzitní dopravy z Prahy do Německa. Úsek 0805 je zajímavý také tím, že se bude jednat o jediný dálniční úsek, který povede přes chráněnou krajinnou oblast, a sice České Středohoří. K tomu bylo zapotřebí výjimky ze zákona 114/92 Sb. Stavba úseku dálnice začala oficiálně 6. 11. 2007.

Tunel Radejčín je dvoutubusový, dvoupruhový dálniční tunel nacházející se na 58,8 km dálnice D8. Je navržen v kategorii T 9,5 (tzn. že šířka vozovky mezi chodníky v tunelu je 9,5 metru). Pravá tunelová trouba měří 600 m, z toho raženo bylo 446 m. Levá trouba měří 620 m, z toho ražený úsek měří také 446 m. Podélný sklon vozovky stoupá od 0 do 2,4 %. Průměrný sklon vozovky je však vypočten na ±1 %. Průřez tunelu je přibližně konstantní–72 m^2. Tunelové roury jsou podobně jako u tunelu Klimkovice propojeny na třech místech tunelovými propojkami.

Obrázek 2.3: Tunel Radejčín – dálnice D8, foto z výstavby, 28. 10. 2009
©http://www.ceskedalnice.cz

Kapitola 3

Ventilace v dálničních tunelech

Hned z počátku se nabízí otázka, proč je vůbec nutné v tunelech zajistit větrání. Ventilaci v tunelu můžeme rozdělit podle několika kritérií. Prvním kritériem je hlavní dělení podle situace v tunelu:

- Provozní ventilace
- Požární ventilace

Druhé dělení je podle toho, jakým způsobem a hlavně směrem je z tunelu odváděn a přiváděn vzduch:

- Podélné větrání
- Příčné větrání

O podélném a příčném větrání je uvedeno více v části 3.2.

3.1 Provozní ventilace

Právě provozní ventilace, tedy ventilace na udržení hladin koncentrací škodlivin v tunelu, bude obsahem této práce. Zajistit větrání je nutné v případě, že nedojde k dodržení hygienických limitů koncentrací zplodin stanovených zákonem o ochraně ovzduší 86/2002 Sb. a nařízením vlády 350/2002 Sb.

Výfukové plyny automobilů obsahují zejména **oxid uhelnatý (CO)**, **oxidy dusíku (NO a NO_2)**, nespálené uhlovodíky CH_X, oxid siřičitý (SO_2) a také nebezpečné or-

ganické sloučeniny. Hygienické limity koncentrací těchto škodlivin pro plynulý provoz v tunelu jsou uvedeny v tabulce 3.1, viz [4].

Tabulka 3.1: Tabulka hygienických limitů koncentrací škodlivin v tunelu

látka	koncentrace [1]
oxid uhelnatý	100 ppm
oxidy dusíku	20 ppm
opacita	5 km^{-1}

V tabulce 3.1 je uvedena také **opacita.** Opacita znamená neprůhlednost nebo zakouřenost. Udává se v jednotkách km^{-1} a udává neviditelnost na 1 kilometr délky. Pokud dojde k nedodržení hladin koncentrací škodlivin, je tedy nutné zapnout v tunelu ventilátory tak, aby dokázaly udržet hodnoty koncentrací emisí pod těmito hygienickými limity.

3.1.1 Výpočet koncentrací škodlivin v tunelu

Faktorů, které ovlivňují hodnoty koncentrace emisí, je hned několik:

- Emisní faktory projíždějících automobilů
- Stáří a typ automobilů
- Doba „pobytu“ automobilu v tunelu
- Rychlost proudění vzduchu v tunelu
- Délka, stoupání a průřez tunelu
- Nadmořská výška tunelu

Každý automobil, ať už osobní nebo nákladní, jedoucí určitou rychlostí produkuje emise (oxid uhelnatý, oxidy dusíku a opacitu). Množství těchto zplodin je závislé na typu automobilu (osobní nebo nákladní), typu motoru (zážehový nebo vznětový), rychlosti jízdy automobilu (při vyšší rychlosti vyšší emise), stoupání vozovky, celkové době jízdy automobilu, stáří automobilu a nadmořské výšce. Výpočet množství emisí produkovaného

[1] Koncentrace škodlivin se udávají v jednotkách ppm. Jedná se o bezrozměrnou jednotku, která udává poměr cm^3 škodlivin v m^3 vzduchu. Jinými slovy je to miliontina celku.

jedním autem lze vyjádřit následujícími rovnicemi [7]:

Výpočet emisí CO a NO_x pro osobní automobil:

$$E = \frac{q_{ex}.f_h.f_a.t}{3600} \tag{3.1}$$

Výpočet emisí CO a NO_x pro nákladní automobil:

$$E = \frac{q_{ex}.f_h.f_m.t}{3600} \tag{3.2}$$

Výpočet emisí snižujících viditelnost v tunelu pro benzínový osobní automobil:

$$OP = \frac{q_{ne}.t}{3600} \tag{3.3}$$

Výpočet emisí snižujících viditelnost v tunelu pro dieselový osobní automobil:

$$OP = \frac{(q_{op}.f_h.f_a + q_{ne}).t}{3600} \tag{3.4}$$

Výpočet emisí snižujících viditelnost v tunelu pro nákladní automobil:

$$OP = \frac{(q_{op}.f_h.f_m + q_{ne}).t}{3600} \tag{3.5}$$

přičemž:
E – emise CO, NO_x [g.voz^{-1}]
OP – emise snižující viditelnost [m^2.voz^{-1}]
q_{ex} – základní emisní faktor pro CO a NO_x(závisí na rychlosti automobilů, typu automobilu a stoupání vozovky v tunelu) [g.hod^{-1}.voz^{-1}]
q_{op} – základní emisní faktor pro opacitu (závisí na rychlosti automobilů, typu automobilu a stoupání vozovky v tunelu) [m^2.hod^{-1}.voz^{-1}]
q_{ne} – dodatečný přídavek emisí pro opacitu [m^2.hod^{-1}.voz^{-1}]
t – doba průjezdu automobilu tunelem [s]
f_h – faktor nadmořské výšky [-]
f_a– faktor stáří pro osobní automobily [-]
f_m– hmotnostní faktor pro nákladní automobily [-]

Celkové hodnoty emisí CO a NO_x všech automobilů v tunelu lze tedy spočítat jako:

$$E_{total} = E.p \tag{3.6}$$

A celkovou hodnotu emisí snižujících viditelnost v tunelu jako:

$$OP_{total} = OP.p \tag{3.7}$$

kde:
E_{total} – celkové emise CO, resp. NO_x všech automobilů v tunelu [g.min^{-1}]
OP_{total} – celkové emise všech automobilů snižující viditelnost v tunelu [m^2.min^{-1}]
p – počet vozidel daného druhu za určitý čas, pro náš případ [voz.min^{-1}]

Takto vypočtené hodnoty však udávají pouze absolutní hodnoty emisí, které neříkají vůbec nic o jejich koncentraci ve vzduchu v tunelu. Pro výpočet koncentrací emisí budeme potřebovat ještě další faktory, kterými jsou především rychlost proudění vzduchu v tunelu, délka tunelu a průřez tunelu.

Celkovou koncentraci CO a NO_x lze vypočítat takto:

$$C = \frac{\frac{E_{total}.L_{tun}}{60.\rho}}{|v_{air}|.V_{tun}} \tag{3.8}$$

Pro výpočet konečné hodnoty opacity lze užít následujícího vztahu:

$$O = \frac{\frac{OP_{total}.L_{tun}.1000}{60}}{|v_{air}|.V_{tun}} \tag{3.9}$$

přičemž:
C – koncentrace CO, resp. NO_x v tunelu [ppm]
O – koeficient opacity v tunelu [km^{-1}]
L_{tun} – celková délka tunelu [m]
ρ – hustota CO, resp. NO_x [g.cm^{-3}]
$|v_{air}|$ – absolutní hodnota rychlosti proudění vzduchu v tunelu [m.s^{-1}]
V_{tun} – celkový objem vzduchu uvnitř tunelu [m^3]

a uvážíme - li konstantní průřez tunelu, který u dálničních tunelů přibližně je, můžeme do vzorců (3.8) a (3.9) za V_{tun} dosadit $S_{tun}.L_{tun}$, a tím přejít k jednodušším vzorcům, ve kterých koncentrace CO, NO_x a opacita nezávisí na délce tunelu:

$$C = \frac{\frac{E_{total}}{60.\rho}}{|v_{air}|.S_{tun}} \tag{3.10}$$

$$O = \frac{\frac{OP_{total}.1000}{60}}{|v_{air}|.S_{tun}} \tag{3.11}$$

Ze vzorců (3.8) a (3.9) mimo jiné vyplývá, že pokud se bude rychlost proudění vzduchu v tunelu bude blížit k nule, budou mít koncentrace CO a NO_x vysoké hodnoty a snadno překročí dané hygienické limity – viz tabulka 3.1. Je to celkem logické, protože čím vyšší bude rychlost proudění vzduchu v tunelu, tím snadněji se koncentrace škodlivin rozfoukají. Proto je nutné zavést další limit v podobě minimálního proudění vzduchu v tunelu. V praxi je obvykle nastaven na 1 m.s^{-1} a řídicí systém v tunelu musí zajistit, aby se proudění nedostalo pod tento limit.

3.1.2 Bernoulliho rovnice pro výpočet rychlosti proudění

Dynamiku tunelu lze obecně popsat Navier-Stokesovými rovnicemi. Řešení těchto nelineárních diferenciálních rovnic je však velice obtížné a přesahuje rámec této bakalářské práce. V silničním tunelu však nedochází k velkým změnám rychlosti proudění vzduchu za relativně malý čas. Tento systém tedy nebudeme popisovat diferenciálními rovnicemi, ale algebraickými a budeme na něj pohlížet jako na systém statický.

Švýcarský fyzik a matematik Daniel Bernoulli odvodil v roce 1738 rovnice, které popisují proudění tekutiny v trubici. Jedná se o zákon zachování mechanické energie, který má obecný tvar:

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 = konst. \tag{3.12}$$

Součet tlaku a kinetické energie tekutiny vztažené na jednotku objemu je ve všech místech trubice konstantní. Bernoulliho rovnice platí i pro obecný tunel, ten má totiž tvar trubice a tekutinou proudící v trubici je vzduch.

Pro libovolný silniční tunel lze Bernoulliho rovnici rozepsat na tvar [6] a [8]:

$$\Delta P_{fric} - \Delta P_{area} + \Delta P_{veh} \pm \Delta P_{fan} - \Delta P_{stack} - \Delta P_{loc} = 0 \tag{3.13}$$

Pojďme se na jednotlivé členy rovnice (3.13) podívat podrobněji. Člen ΔP_{fric} značí tlakovou ztrátu způsobenou odporem vzduchu. Odpor vzduchu nejvíce zavísí na drsnosti stěn v tunelu a rozmístění ventilátorů a dopravního značení.

$$\Delta P_{fric} = \frac{\rho}{2}\lambda\frac{l}{d}v_{air} * |v_{air}| \tag{3.14}$$

kde: ρ – hustota vzduchu, standardně 1,29 kg.m^{-3}

λ – třecí koeficient tunelu [-]

l – délka tunelu [m]

d – hydraulický průměr tunelu [m]

v_{air} – rychlost proudění vzduchu v tunelu [m.s^{-1}]

Člen ΔP_{area} je tlaková změna způsobená změnou průřezu tunelu.

$$\Delta P_{area} = \frac{\rho}{2} \zeta v_{air} * |v_{air}| \tag{3.15}$$

kde:
ζ - ztrátový koeficient

Tento faktor se uplatní především u městských tunelů, kde není průřez tunelu konstantní. U dálničních tunelů (tj. v našem případě) bude tento člen rovnice nulový, protože průřez tunelu je ve všech místech přibližně stejný.

Člen ΔP_{veh} značí pístový efekt projíždějících vozidel tunelem. Tím, že auta jedou tunelem, tak pomáhají zvyšovat rychlost přirozeného proudění vzduchu v tunelu. Čím více aut za sebou pojede (pokud nedojde k omezení jejich rychlosti), tím bude pístový efekt větší.

$$\Delta P_{veh} = \frac{\rho}{2} \sum_k c_{d_k} * \frac{S_d}{S_{tun}} * f_d * (v_{veh_k} - v_{air}) * |(v_{veh_k} - v_{air})| \tag{3.16}$$

$\sum_k$ – suma přes všechny auta jedoucí v tunelu
c_{d_k} – koeficient tření, závisí na typu auta.
Obecně: osobní automobil ⇒ c_d=0,3, nákladní automobil ⇒ c_d=0,6
v_{veh_k} – rychlost auta k
f_d – korekční koeficient, který je zpravidla větší než 1
S_d – čelní plocha automobilu,
obecně: osobní automobil ⇒ A_d=3 m^2 nákladní automobil ⇒ A_d=7 m^2
S_{tun} – průřez tunelu [m^2]

Výraz ΔP_{fan} představuje tlakovou změnu způsobenou ventilátory. Tato změna závisí samozřejmě na počtu spuštěných ventilátorů, jejich účinnosti a výstupní rychlosti ventilátoru. Za předpokladu, že jsou všechny ventilátory v tunelu stejné, což v praxi opravdu jsou, lze rovnici pro ΔP_{fan} napsat jako:

$$\Delta P_{fan} = \frac{1}{2} N * \frac{\eta_{fan} * P_{fan}}{S_{tun} * (v_{fan} + v_{air})} \tag{3.17}$$

η_{fan} – účinnost ventilátoru
N – počet aktuálně bežících ventilátorů

v_{fan} – výstupní rychlost proudění ventilátoru [m.s^{-1}]
P_{fan} – příkon ventilátoru [W]

Výraz ΔP_{stack} představuje tlakovou změnu způsobenou rozdílem nadmořských výšek obou portálů tunelu. Tomuto jevu se říká komínový efekt. Tento efekt pomáhá k udržení přirozeného proudění vzduchu v tunelu, ale vždy pouze v jedné tunelové troubě, protože v té druhé jedou auta ve směru proti komínovému efektu, proto se pístový efekt odečítá od komínového.

$$\Delta P_{stack} = \rho * \Delta h * g \tag{3.18}$$

Δh – rozdíl nadmořských výšek obou portálů [m]
g – tíhové zrychlení, pro naši zeměpisnou šířku g = 9,83 [m.s^{-2}]

Člen ΔP_{loc} znamená tlakovou změnu způsobenou lokálními změnami atmosferického tlaku. Tyto změny jsou závislé především na teplotě vzduchu. Pro naše výpočty můžeme uvažovat, že ΔP_{loc} je náhodný faktor.

V praxi obvykle nedochází k velkým změnám nadmořských výšek mezi oběma portály tunelu vůči lokálním změnám atmosferického tlaku, a proto člen ΔP_{loc} a ΔP_{stack} zahrnujeme do jediného členu ΔP_{atm}. Potom se obvykle hodnota tohoto členu pohybuje od -40 Pa do +40 Pa.

Neznámá v rovnici (3.13) po dosazení všech členů je rychlost proudění vzduchu v tunelu v_{air}. Jak lze z rovnice vidět, jedná se o nelineární rovnici s absolutními hodnotami, kterou lze s výhodou řešit pomocí funkcí *fzero* nebo *fsolve* v programu **MATLAB**.

3.2 Požární ventilace

Nejdůležitější je ovšem větrání v případě požáru. Požární ventilace má za úkol co nejúčinněji odvést kouř z prostoru tunelu a umožnit lidem včasný odchod z tunelu do bezpečí.

V posledních letech došlo v tunelech ve světě k několika velkým požárům, které skončily katastrofou, viz kapitola 2.2. Od té doby se na řídicí systém vzduchotechniky v tunelu kladou obrovské nároky na bezpečnost a stabilitu. Před uvedením do provozu se na každém tunelu provádí požární zkoušky, kdy se požár uměle vyvolá a sleduje se, jak bude řídicí systém reagovat. Existují dva způsoby, jakými se odvádí kouř z tunelových tubusů. Jedná se o podélné a příčné větrání, viz. [14]. Podélný způsob reprezentuje systém

Obrázek 3.1: Požární zkouška v tunelu Panenská – 3. 10. 2009
autor: Petr Kreutzer

větrání, kdy je pomocí proudových ventilátorů kouř vytlačen ve směru jízdy portálem ven. Takto je řešeno větrání na všech dálničních tunelech v ČR: Panenská, Libouchec, Valík a Klimkovice. U tunelů na Pražském okruhu, které jsou ve výstavbě, bude uvažováno také s podélným větráním.

Příčný odvod kouře se uplatňuje především u dlouhých obousměrných tunelů, kde mohou být při požáru vozidla na obou stranách požáru a je neefektivní odvést kouř portálem tunelu na velkou vzdálenost. V případě příčného větrání se jedná o odvod kouře pomocí několika stavebních otvorů ve stropě, které jsou osazeny uzavíratelnými klapkami a dále spojeny s odvětrávací věží na povrchu. Vzduchotechnický kanál bývá většinou pod stropem tunelu, to je případ Strahovského tunelu v Praze, Dobrovského tunelu v Brně, nebo pod vozovkou – tunel Mrázovka a úseky tunelu Blanka.

Přestože je požární ventilace důležitým a zajímavým tématem, tato práce se jí pro svůj rozsah a tématické zaměření nezabývá.

Obrázek 3.2: Odvětrávací věž Strahovského tunelu
autor: Jan Groh

Kapitola 4

Řídicí systém vzduchotechniky

Tato kapitola se bude věnovat jednotlivým způsobům regulace zplodin z motorů automobilů a nastíní algoritmus řízení použitý v aplikaci (simulátoru vzduchotechniky), která je součástí této práce.

4.1 Typy a parametry ventilátorů

Ventilátory jsou rotační lopatkové stroje [9], které jsou složeny ze statoru a rotoru. Ventilátor v principu pracuje tak, že se vytvoří točivé magnetické pole, které vznikne průchodem elektrického proudu vinutím statoru. Toto magnetické pole poté indukuje v rotoru napětí a vzniklý proud vyvolává Lorentzovu sílu, která otáčí rotorem. Otáčivým pohybem vznikne tlakový rozdíl před a za oběžným kolem ventilátoru. Tento tlakový rozdíl způsobí proudění vzduchu z místa s vyšším tlakem do místa s tlakem nižším. Podle typu točivého magnetického pole lze ventilátory rozdělit na:

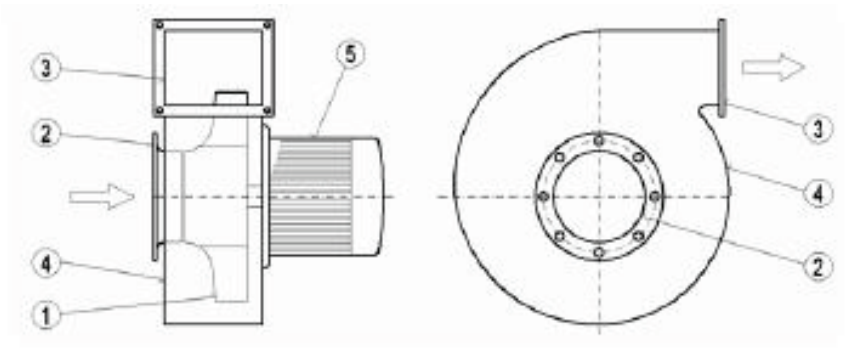
- Stejnosměrné
- Střídavé (jednofázové)
- Střídavé (trojfázové)

Podle směru průtoku vzduchu lze rozdělit ventilátory na:

- Radiální
- Axiální

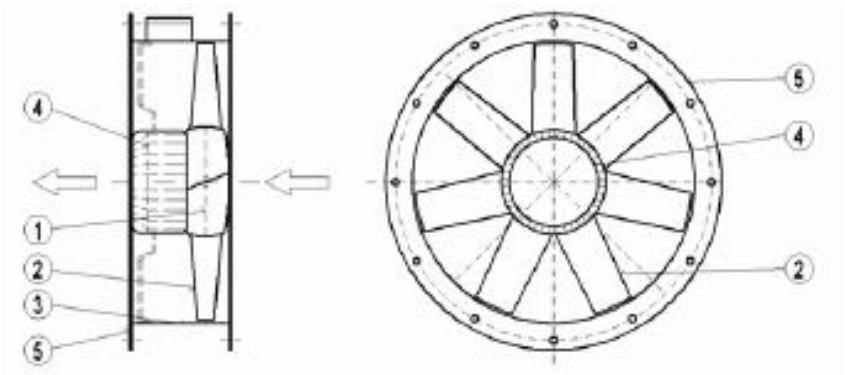
- Diagonální
- Diametrální
- Tangenciální

Nejpoužívanějšími ventilátory v praxi jsou axiální a radiální ventilátory. Radiální ventilátory mají sací a výtlačné hrdlo. Nasávají vzduch ve směru osy rotace a výtlačují vzduch je ve směru kolmém na osu rotace.



Obrázek 4.1: Radiální ventilátor
©http://vetrani.tzb-info.cz

Axiální ventilátory se používají tam, kde je třeba velký objemový průtok (jednotky až stovky m^3/s). Směr nasávání i vytlačování vzduchu je stejný a je ve směru osy rotace.



Obrázek 4.2: Axiální ventilátor
©http://vetrani.tzb-info.cz

Ventilátory jsou obvykle charakterizovány několika výrobními parametery. V katalogových listech najdeme především:

- Objemový průtok vzduchu Q [m^3/s]
- Statický tah [N]
- Průměr [mm]
- Celkový tlak [Pa]
- Příkon [kW]

Podle rovnice (3.17) je pro výpočet celkového tlakového rozdílu potřeba znát výstupní rychlost proudění ventilátoru v_{fan}. Tuto rychlost lze spočítat dvěma možnými způsoby.

1) Podle rovnice kontinuity

$$v_{fan} = \frac{Q_{fan}}{S_{fan}} \tag{4.1}$$

kde:
v_{fan} – výstupní rychlost proudění ventilátoru [$m.s^{-1}$]
Q_{fan} – objemový průtok ventilátoru [$m^3.s^{-1}$]
S_{fan} – účinná plocha ventilátoru [m^2]

2) Ze statického tahu a účinné plochy ventilátoru

$$v_{fan} = \sqrt{\frac{F}{S_{fan} \cdot \rho}} \tag{4.2}$$

kde:
F – statický tah ventilátoru [N]
ρ – hustota vzduchu [$kg.m^{-3}$]

4.1.1 Parametry ventilátorů v tunelech Radejčín a Klimkovice

Ventilátory v tunelu Radejčín

Tunel Radejčín má v každé tunelové troubě 3 dvojice axiálních ventilátorů. V pravé tunelové troubě, tedy ve směru na Ústí nad Labem, jsou ventilátory o průměru D=1000 mm s tažnou silou F=890 N a motorem o výkonu P=30 kW. V levé tunelové troubě, tedy ve směru na Prahu, jsou ventilátory o průměru D=1000 mm s tažnou silou F=970 N

a motorem o výkonu 37 kW. Všechny ventilátory jsou napájeny trojfázovým střídavým napětím 400V a jsou plně reversibilní (s možností obráceného chodu motoru).

Ventilátory v tunelu Radejčín nemají uveden objemový průtok vzduchu, můžeme ho ale spočítat z rovnic (4.1) a (4.2). Vypočteme např. výstupní rychlost proudění ventilátoru v pravé tunelové troubě. Vycházíme z rovnice (4.2):

$$v_{fan} = \sqrt{\frac{F}{S_{fan}.\rho}} = \sqrt{\frac{890}{\pi.0{,}25.1{,}29}} = 29{,}63 \text{ m/s}$$

A pak z rovnice (4.1) vypočteme objemový průtok ventilátoru:

$$Q_{fan} = S_{fan}.v_{fan} = \frac{\pi}{4}.29,63 = 23,27 \text{ m}^3/\text{s}$$

Ventilátory v tunelu Klimkovice

V pravé i levé tunelové troubě Klimkovického tunelu se nachází celkem 4 dvojice axiálních ventilátorů o průměru D=1200 mm, motorem o výkonu 30 kW, tažnou silou 1130 N a maximálním objemovým průtokem Q=33 m^3/s. Všechny ventilátory jsou napájeny trojfázovým střídavým napětím 400V a jsou plně reversibilní (s možností obráceného chodu motoru).

Obdobně jako u tunelu Radejčín můžeme spočítat výstupní rychlost proudění ventilátoru v tunelu Klimkovice. Podle rovnice (4.1) je v_{fan} rovno:

$$v_{fan} = \frac{Q_{fan}}{S_{fan}} = \frac{Q_{fan}}{\pi.\frac{D^2}{4}} = \frac{33}{\pi.\frac{1{,}2^2}{4}} = 29{,}18 \text{ m/s}$$

A podle rovnice (4.2) lze výstupní rychlost proudění ventilátoru spočítat takto:

$$v_{fan} = \sqrt{\frac{F}{S_{fan}.\rho}} = \sqrt{\frac{1130}{1,13.1,29}} = 27,84 m/s$$

Vidíme, že rychlost proudění vyšla v obou případech přibližně podobná. Nepřesnost je dána tím, že rovnice (4.1) udává střední rychlost proudění ideální tekutiny, přičemž nebere v potaz viskozitu vzduchu a také neznáme přesnou hodnotu hustoty vzduchu v tunelu, která se může pohybovat od 1,2 do 1,3 $kg.m^{-3}$. Rovnice (4.1) a (4.2) také předpokládají laminární proudění vzduchu.

4.2 Možnosti regulace

Existují obecně dvě uznávané možnosti, jak regulovat rychlost proudění vzduchu v tunelu. Jedná se jednak o **spojité** a také o mnohem častější **diskrétní** řízení. Jak již bylo

řečeno v kapitole 3.1.1, řídicí systém musí zaručit, aby se koncentrace zplodin nedostaly přes stanovené meze. Účelem ventilátorů je tedy v takovéto situaci koncentrace emisí rozfoukat. Řídicí systém musí také zajistit trvalé minimální proudění vzduchu v tunelu, obvykle 1 m/s. Tím se předejde nežádoucím špičkovým hodnotám koncentrací emisí během denního provozu.

Diskrétní řízení představuje situaci, kdy jsou ventilátory v tunelu buď v poloze ON (Zapnuty) nebo v poloze OFF (Vypnuty). Poznamenejme, že toto řízení se uplatňuje ve většině silničních tunelech na světě. Výhodou tohoto řízení je, že k realizaci není potřeba žádný složitý regulátor, vystačíme si pouze s logickým řízením a ventilátory navíc nepotřebují frekvenční měniče - viz dále. Nevýhodou je, že nelze plynule měnit akční zásah (rychlost otáčení lopatek) ventilátoru podle aktuální naměřené rychlosti větru a koncentrací zplodin. Diskrétní řízení je však i tak realizováno pomocí zpětné vazby. Regulátor na svém vstupu porovnává žádanou hodnotu koncentrací zplodin se skutečnou hodnotou koncentrace a podle toho připíná nebo vypíná ventilátory v tunelu.

Spojité řízení je v České republice aplikováno jen na několika silničních tunelech. Jedná se o několik ventilátorů v tunelech na SOKP (Silniční okruh kolem Prahy). Spojité řízení je obvykle realizováno jako klasické zpětnovazební řízení. Do regulátoru tedy vstupuje regulační odchylka, která je dána rozdílem žádané hodnoty koncentrace škodlivin a skutečné hodnoty koncentrace, kterou naměří senzory pro měření koncentrace oxidu uhelnatého, dusíku a opacity. Regulátor, který může být libovolně složitý (obvykle ale postačí PID), poté vypočte na základě regulační odchylky velikost akčního zásahu. Plynulost řízení otáček ventilátoru je často zajišťována tzv. **frekvenčními měniči**.

Frekvenční měnič je zařízení, které mění síťové napětí na napětí variabilní frekvence a amplitudy. Mezi přednosti frekvenčních měničů patří především úspora energie a nákladů, opakovatelnost a rychlost.

V praxi jsou ventilátory řízeny pomocí PLC (Programovatelných logických automatů), které v sobě obsahují program, který se cyklicky vykonává.

4.3 Algoritmus řízení použitý v simulátoru vzduchotechniky

Tunely Radejčín i Klimkovice, na kterých je otestován simulátor řízení vzduchotechniky, mají diskrétní řízení ventilátorů, tzn. že ventilátory nejsou plynule regulovatelné.

Algoritmus řízení, který je navržen pro simulátor vzduchotechniky, se snaží co nejefektivněji rozvrhovat ventilátory tak, aby všechny ventilátory v tunelu běžely pokud možno co nejrovnoměrněji. Algoritmus se dále snaží, aby každý ventilátor, který se zapne, běžel alespoň určitý čas T, aby docházelo k co nejmenšímu opotřebení ventilátorů.

Algoritmus řízení lze rozdělit na dva nezávislé bloky. První blok obsahuje regulaci proudění vzduchu a druhý blok regulaci koncentrace zplodin (CO, NO_x, opacita). Regulace je navržena tak, aby oba bloky mohly běžet nezávisle na sobě a navzájem neinterferovaly.

Pro vysvětlení použitého algoritmu jsem vytvořil stavové diagramy, které jsou na obrázcích 4.3 a 4.4. Vycházel jsem ze zkušeností při simulaci řízení vzduchotechniky tunelu Sitina [10], který se nachází v Bratislavě a je klíčovým tunelem dálnice D2.

Oba bloky regulace se liší jen minimálně, v této části proto popíšu jenom regulaci proudění vzduchu v tunelu. Na počátku se ventilátory nachází ve stavu **ventilátory stojí**. V tomto stavu jsou tedy všechny ventilátory vypnuté. Pokud naměří snímače na měření rychlosti vzduchu v tunelu rychlost větší než 1 m/s, potom se nic neděje a v dalším kroku zůstavájí ventilátory stále vypnuté. Pokud je ale rychlost proudění menší než 1 m/s, potom se přechází do **počátečního stavu regulace**. V tomto stavu ještě není vybrán žádný ventilátor, proto se ihned přejde k výběru ventilátoru. Výběr ventilátoru probíhá přes penalizační funkci:

$$P(n) = T_{total} - K_1 * bezi_nebezi + K_2 + K_3 * (T_{last} - T_{actual})^2 \tag{4.4}$$

kde:
T_{total} - poslední celková doba provozu ventilátoru
bezi_nebezi - Veličina, která nabývá hodnoty 1, když ventilátor běží a -1 když neběží
T_{last} - čas posledního vypnutí ventilátoru
T_{actual} - aktuální čas

Časové parametry ve funkci (4.4) jsou měřeny v minutách. Čas T_{actual} je aktuální čas během simulovaného dne. Jeden den má 1440 minut a navržený simulátor řízení

vzduchotechniky pracuje právě se vzorkovací frekvencí 1 minuta.

Funkce (4.4) je spočtena pro každý ventilátor v tunelu a je vybrán ten ventilátor, jehož penalizační funkce nabývá nejmenší hodnoty. Tato funkce po správném naladění konstant K_1, K_2 a K_3 zaručí, že poběží právě ten ventilátor, který již dlouho neběžel. Zároveň nedojde k tomu, že by ventilátor, který běží pouze jeden cyklus byl vypnut a místo něho byl zapnut jiný.

Parametr h ve stavovém diagramu 4.3 se nazývá hysterezní parametr a realizuje tzv. hysterezní řízení. Tento parametr je vždy větší než 1 a obvykle nabývá hodnot v intervalu (1,5;3). Hysterezní řízení napomáhá zlepšit životnost ventilátorů. Jedná se především o situace, kdy se proudění sice dostane pod limitní hodnotu 1 m/s, ale jen na malý okamžik, a to vede k zapnutí ventilátoru a jeho okamžitému vypnutí, což vede k opotřebení celého systému. Hysterezní regulace pak zajistí, že ventilátor poběží delší dobu.

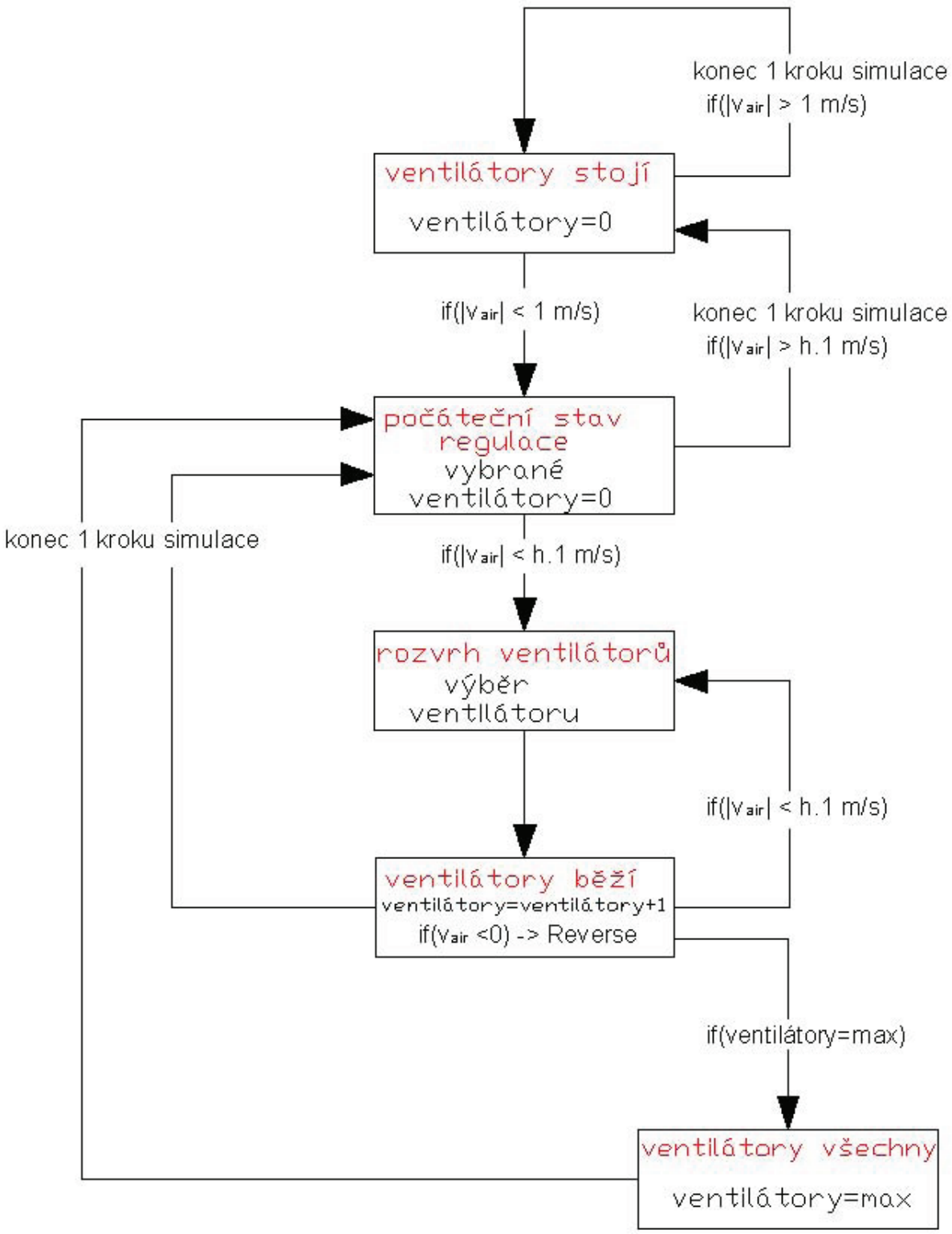
Ve stavovém diagramu je dále zachyceno postupné připínání ventilátorů, pokud rychlost proudění vzduchu není větší než h*1 m/s. Může dojít také k situaci, kdy jsou všechny ventilátory zapnuty, a i přesto nedojde ke zvýšení rychlosti proudění nad požadovanou mez h*1 m/s. V takovém případě nezbyde než nechat puštěné všechny ventilátory a čekat, zda se rychlost proudění nezvýší v příštích krocích simulace. Tato situace ale obvykle u regulace proudění nenastane, spíše může nastat u regulace koncentrace zplodin např. při dopravní zácpě.

Pokud ventilátory dokáží zvýšit rychlost proudění nad požadovanou mez, tak se přechází do stavu **počátku regulace** a krok simulace se zvýší o 1. Pokud je v tomto stavu zjištěno, že je rychlost proudění větší než požadovaná mez h*1 m/s, pak se všechny ventilátory v tunelu vypnou. V opačném případě proběhne algoritmus regulace znovu.

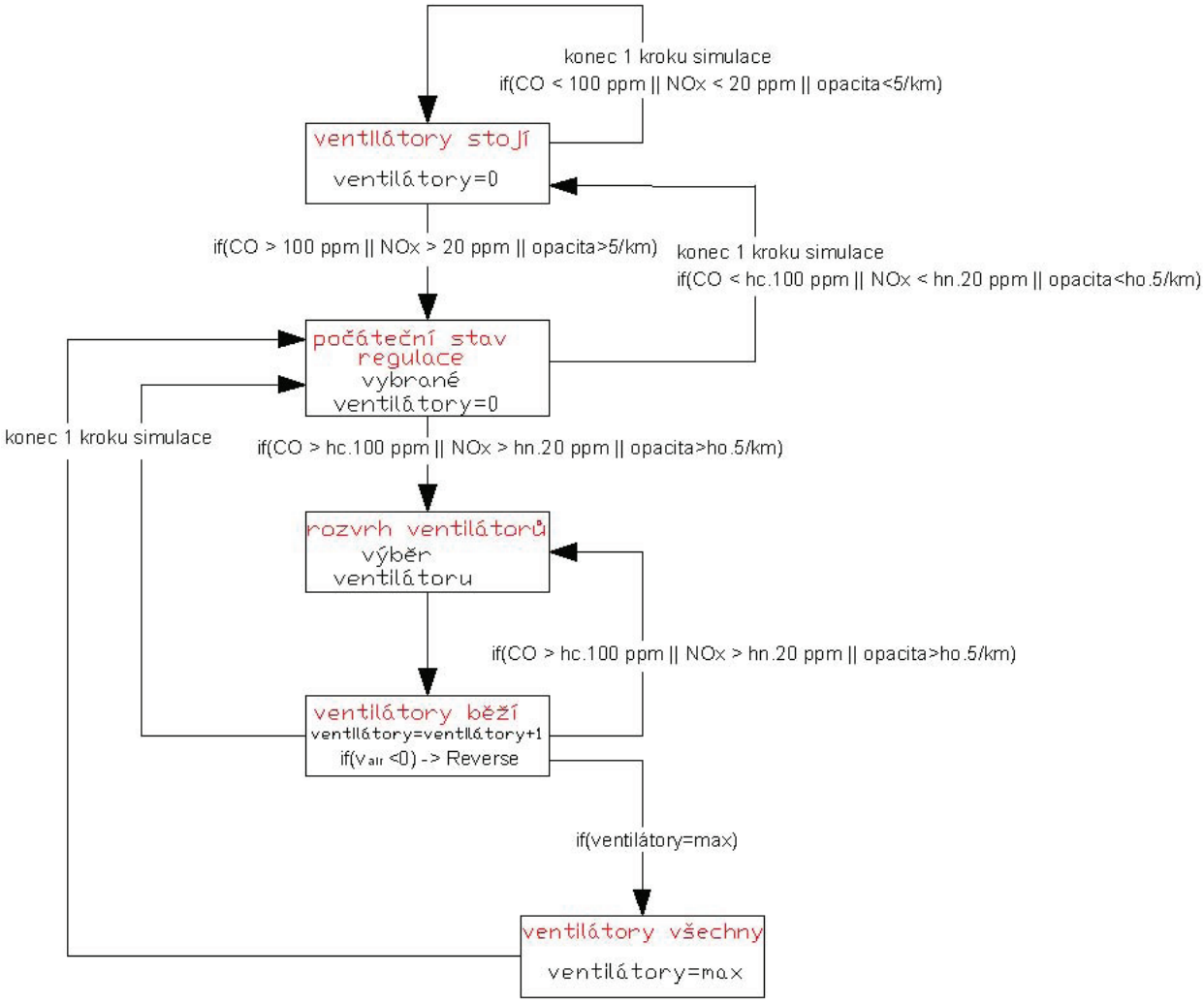
Při přechodu do stavu **ventilátory běží** se také testuje, jestli rychlost proudění není záporná. V takovém případě je jednodušší a efektivnější spustit ventilátory s opačným reversním chodem.

Regulace koncentrace zplodin v tunelu je obdobná jako regulace proudění vzduchu. Její stavový diagram na obr. 4.4 má jen několik rozdílných detailů. Především se jedná o tři hysterezní parametry *hc, hn a ho*. Z obr. 4.4 je zřejmé, že každý typ škodliviny v tunelu má svůj hysterezní parametr – *hc* odpovídá oxidu uhelnatému, *hn* oxidům dusíku a *ho* opacitě. Tyto parametry jsou tentokráte vždy menší než jedna a pohybují se v rozmezí (0,8;0,9).

Výsledek testování řídicího systému na simulátoru vzduchotechniky lze vidět v kapitole 6, kde najdeme ukázky rozvrhování ventilátorů v tunelech Radejčín a Klimkovice za různých dopravních situací během celého dne.



Obrázek 4.3: Stavový diagram regulace proudění vzduchu



Obrázek 4.4: Stavový diagram regulace koncentrace zplodin

Kapitola 5

Popis aplikace

V této části se budeme věnovat popisu naprogramovaného simulátoru řízení vzduchotechniky, který je součástí této práce. Budeme se zabývat především tím, jak je aplikace naprogramována uvnitř. Celou aplikaci včetně návodu na její použití najdete na přiloženém CD (příloha C).

Aplikaci lze z hlediska softwarového rozdělit na dvě části, řídicí a uživatelskou. Uživatelská část je vytvořena v prostředí **.NET** a komunikuje s řídicí částí, která je celá naprogramovaná v programovacím jazyku **MATLAB**.

Uživatelská aplikace se spojuje s programem Matlab prostřednictvím dynamicky linkované knihovny, která obsahuje přeložené m-files z Matlabu do prostředí .NET. K tomu je zapotřebí Toolbox Matlab Builder NE, který vytvoření DLL knihovny umožní. Protože tento způsob komunikace je poměrně málo vídaný a v prostředí internetu jen málo popsaný, rozhodl jsem se napsat alespoň stručný návod, jak postupovat při spojení aplikace .NET a Matlabu. Tento návod najdete v příloze na přiloženém CD.

5.1 Uživatelská část aplikace

Uživatelská část aplikace je vyvinuta v programovacím jazyku C#, který je součástí vývojového frameworku pro .NET od firmy Microsoft. Celý vývoj aplikace probíhal ve vývojovém prostředí Microsoft Visual Studio 2008 Professional Edition. Aplikace je vyvíjena v duchu objektově orientovaného programování, které se snaží připodobnit metody a objekty reálným situacím z praktického života.

Celá aplikace se skládá z 20 tříd (souborů aplikace), které jsou rozděleny do 5 jmenných

prostorů (namespaces):

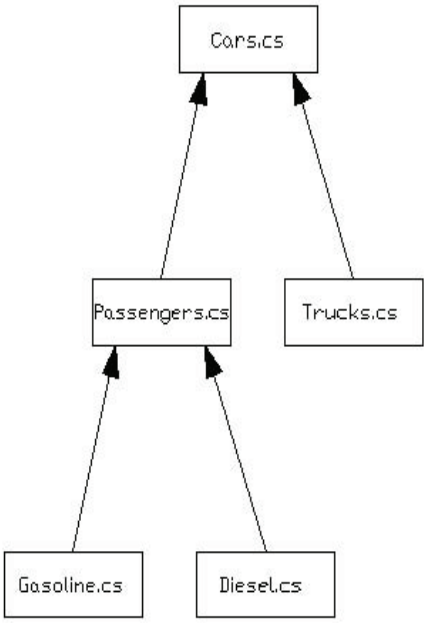
- Main
- Tunnel
  - Traffic
    - Vehicles
  - Ventilation
- Generator
- Communication
- Windows

Namespace **Main** obsahuje jednu třídu *Program.cs*, která slouží pouze ke spuštění celé aplikace. Obsahuje hlavní metodu *Main*, která spustí grafické okno *MainWindow*.

Prostor Namespace **Tunnel** obsahuje jedinou třídu *Tunnel.cs*, která obsahuje pouze proměnné, které specifikují parametry dálničního tunelu. Namespace Tunnel dále obsahuje další dva prostory namespace: Traffic a Ventilation.

Namespace **Traffic** obsahuje jednu třídu *TrafficProfile.cs* a jeden prostor jmen **Vehicles**. Třída *TrafficProfile.cs* skládá všechny objekty od tříd, které nějakým způsobem zasahují do dopravního profilu v tunelu, tedy počet aut, parametry tunelu, parametry ventilátorů a rychlost proudění větru. O těchto veličinách uchovává informace v průběhu celého dne.

Jmenný prostor **Vehicles** obsahuje pouze třídy, které obsahují informace o vozidlech v tunelu, jedná se o třídy *Cars.cs*, *Passengers.cs*, *Trucks.cs*, *Gasoline.cs* a *Diesel.cs*. S výhodou bylo využito dědičnosti, jednoho ze základních rysů objektového programování.



Obrázek 5.1: Diagram dědičnosti tříd

Na obr. 5.1 si lze všimnout, že od třídy *Cars.cs* dědí vlastnosti třídy *Passengers.cs* a *Trucks.cs*, protože osobní a nákladní auta jsou určitými specifickými případy vozidel. Podobně třídu *Passengers.cs* dědí třídy *Gasoline.cs* a *Diesel.cs*, protože benzínová a dieselová auta jsou specifickými případy osobních vozidel, které mají hodně společných vlastností, jako je délka a hmotnost, ale liší se např. typem motoru.

Namespace **Ventilation** obsahuje třídy, které se týkají ventilace. Celkem se jedná o 3 třídy: *Fans.cs*, *Air.cs* a *Emissions.cs*. Jak již anglický název těchto tříd vypovídá, první zmiňovaná třída uchovává parametry ventilátorů, jako je jejich počet, poloměr, tažná síla, výkon, účinnost apod., třída *Air.cs* má vlastnosti jako aktuální rychlost proudění nebo aktuální tlakový rozdíl mezi portály tunelu a konečně třída *Emissions.cs* má vlastnosti aktuálních koncentrací emisí CO, NO_x a opacity v průběhu celého dne.

Prostor jmen **Generator** obsahuje jedinou stejnojmennou třídu *Generator.cs*, která má funkce pro generování dopravního profilu, který si zažádá uživatel v grafických oknech. Jedná se především o funkce, které na základě žádaného poměru nákladních automobilů v tunelu spočítají jejich konkrétní počet, dále funkci pro výpočet rychlosti aut v závislosti na jejich počtu v tunelu apod.

Z hlediska fungování aplikace je velice důležitý jmenný prostor **Communication**. Tento namespace obsahuje dvě důležité třídy. První z nich, třída *Connection.cs*, zajišťuje

spojení mezi aplikací napsanou v .NET a řídicí aplikací napsanou v programu MATLAB. Druhou třídou je *SaveAndLoad.cs*, která sdružuje metody pro načítání a ukládání dopravního profilu a parametrů tunelu do textových souborů.

Posledním prostorem namespace je prostor **Windows**. Tento jmenný prostor sdružuje všechna grafická okna aplikace a obsahuje handlery pro obsluhu událostí. V aplikaci je celkem 5 grafických oken – hlavní okno *MainWindow.cs*, okno pro základní nastavení dopravního profilu *SettingProfileWindow.cs*, okno pro detailní nastavení dopravního profilu *DetailedSettingWindow.cs*, okno *DailyDistributionWindow.cs* pro nastavení hodinových procentuálních distribucí vozidel během dne a poslední okno *EuroCatSettingWindow.cs* pro nastavení procentuálních poměrů mezi kategoriemi EURO všech typů automobilů.

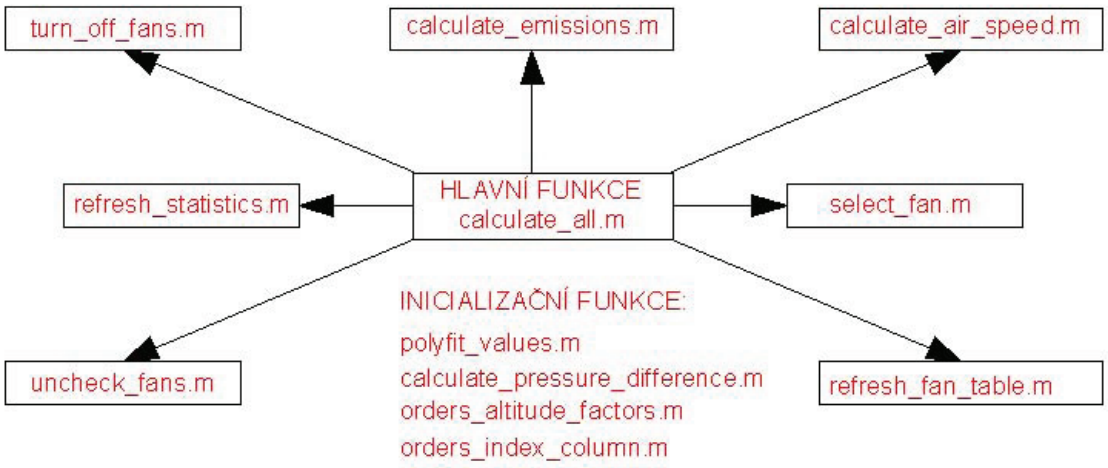
Za zmínku ještě stojí způsob, jakým jsou vykreslovány grafy v této aplikaci. Grafy jsou kresleny prostřednictvím volně šířitelné knihovny *Zed Graph*. Zed Graph je .NET open source knihovna uvolněná pod licencí Library General Public License a je napsána v jazyce C#. Je specializována na dvojrozměrnou vizualizaci dat a podporuje následující typy grafů:

- standardní grafy s osami x a y
- koláčové grafy
- jednoduché dvojrozměrné kontury
- sloupcové grafy

Třída *MainWindow.cs* obsahuje ve skutečnosti ještě jednu třídu *Graphs.cs*, která slouží pro vykreslení grafů v aplikaci. Zde je využito možnosti, kterou např. jazyk JAVA neumožňuje, a sice možnost rozdělit třídu do dvou souborů pomocí klíčového slova *partial*. Třída *MainWindow.cs* totiž musí pro funkčnost aplikace obsahovat metody pro vykreslení grafů. Pro přehlednost je proto třída *Graphs.cs* virtuálně separována od třídy *MainWindow.cs*.

5.2 Řídicí část aplikace

Řídicí část aplikace je naprogramována v prostředí programovcího jazyka MATLAB. Princip její funkce si můžeme vysvětlit na následujícím schématu (obr. 5.2):



Obrázek 5.2: Diagram řídicí části aplikace

Obsahem řídicí části je celkem 13 spustitelných souborů v jazyce Matlab s příponou *.m*. V uživatelské aplikaci je třeba nejprve vygenerovat počty automobilů během celého dne. Křivky, závislosti počtu aut na čase, jsou poté v programu MATLAB proloženy pomocí funkce *polyfit*. Prokládání zajistí m-file *polyfit_values.m*.

Po zahájení simulace se spustí hlavní m-file *calculate_all.m*. V něm se nejprve spustí inicializační funkce. Funkce *calculate_pressure_difference.m* vypočte lokální tlakový rozdíl mezi portály během celého dne, který je vlastně náhodným faktorem a jeho meze zadává uživatel v aplikaci. Další inicializační funkcí je *orders_altitude_factors.m*, která přiřazuje faktor nadmořské výšky pro osobní a nákladní automobily, viz. kapitola 3, který je potřebný pro výpočet koncentrací zplodin v tunelu. Poslední inicializační funkcí, která se spustí, je funkce *orders_index_column.m*. Tato funkce přiřadí index, podle kterého se bude vyhledávat v tabulce pro hodnoty emisí automobilů. Tento index se přiřadí podle procentuálního stoupání vozovky v tunelu.

Šipky v obrázku 5.2 naznačují, že hlavní m-file řídí všechny další výpočetní procedury v aplikaci. V hlavním m-file se poté spustí cyklus *for*, který běží 1440 kroků, což odpovídá 24 hodinám a tedy celému dni. Funkce *calculate_air_speed.m* vypočítává v tomto cyklu rychlost proudění vzduchu v tunelu podle rovnice (3.13). Obdobně funkce *calculate_emissions.m* počítá podle rovnic (3.8) a (3.9) koncentrace škodlivin v tunelu. Ostatní funkce v obrázku 5.2 slouží k řízení ventilátorů.

Funkce *select_fan.m* vybírá nejvhodnější ventilátor podle penalizační funkce (4.4). Výběr ventilátoru vychází také ze stavových diagramů 4.3 a 4.4.

Důležitými funkcemi, které zajišťují hodnoty pro kreslení grafů ventilátorů, jsou funkce

refresh_statistics.m a *refresh_fan_table.m*. Tyto funkce v průběhu cyklu pravidelně obnovují informace o stavu ventilátorů, tedy jestli běží, celkovou dobu provozu, čas posledního vypnutí a poslední celkovou dobu provozu. Tato data potřebuje pro svůj výpočet také penalizační funkce (4.4).

Funkce *uncheck_fans.m* zajišťuje, že po skončení každého kroku simulace dojde k odznačení všech ventilátorů, aby mohl výběr ventilátorů v dalším kroku proběhnout znovu.

Poslední funkcí, která slouží k řízení ventilátorů, je funkce *turn_off_fans.m*. Jak název vypovídá, jedná se o funkci, která slouží pouze k jednorázovému vypnutí všech ventilátorů. To nastává v případě, že už není potřeba v tunelu větrat.

V diagramu 5.2 řídicí části aplikace je uvedeno pouze 12 funkcí. Poslední, třináctou funkcí, je *draw_graphs.m*, která poskytuje kreslení grafů z programu MATLAB. Uživatel si totiž může v grafické aplikaci vybrat, jestli bude chtít vykreslit grafy také jako figures programu MATLAB.

Kapitola 6

Simulace

Na řadu přichází asi nejzajímavější kapitola z celé bakalářské práce – ověření a testování simulátoru řízení vzduchotechniky.

V práci již bylo několikrát řečeno, že simulátor řízení vzduchotechniky bude testován na dvou dálničních tunelech – Radejčín a Klimkovice. Dopravních situací, které mohou v dálničním tunelu nastat je opravdu mnoho a tato práce nemůže v žádném případě pokrýt všechny. Situace se liší především různým tlakovým rozdílem mezi portály, denní průjezdností vozidel, poměrem dieselových osobních automobilů, poměrem nákladních automobilů a poměrem vozidel podle kategorie EURO.

Protože tunel Radejčín není ještě v provozu, byl tento tunel v práci testován mnohem více než tunel Klimkovice. Tunel Klimkovice byl vybrán z toho důvodu, že jsem od ŘSD ČR [1] obdržel reálná data o průjezdnosti a složení vozidel v tunelu.

6.1 Simulace na tunelu Radejčín

Pro testování simulátoru na tunelu Radejčín byly zvoleny 4 dopravní scénáře:

I. Normální provoz

II. Normální provoz, silný protivítr

III. Silný provoz

IV. Silný provoz, silný protivítr

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

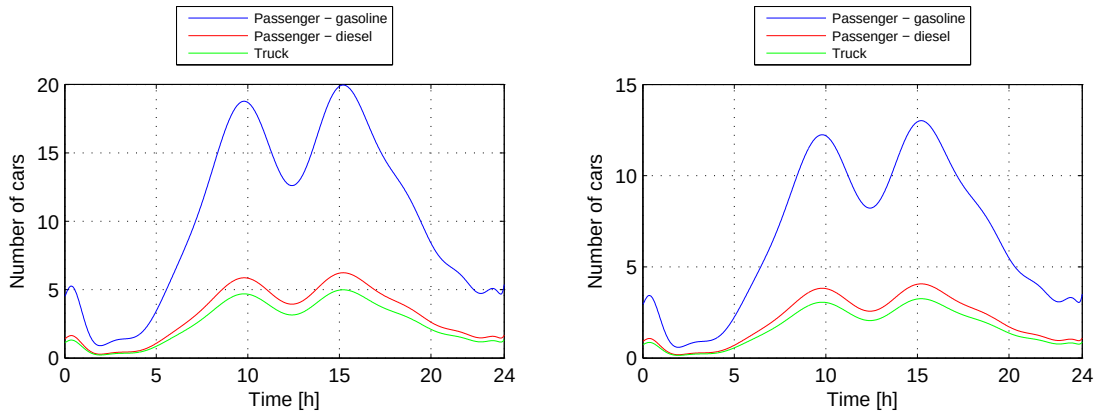
Na úvod je vhodné říci, že pro tunel byly ve všech scénářích zvoleny tyto konstanty pro výpočet penalizační funkce, viz. rovnice (4.4): K_1=100, K_2=5.10^5, K_3=5.10^{-5} a tyto hysterezní parametry: h_{air}=1,5, h_{co}=0,9, h_{no}=0,9, h_{op}=0,9.

U prvního scénáře se jedná o situaci s normálním povozem a normálními povětrnostními podmínkami. Protože tunel Radejčín není ještě v povozu, nemáme aktuální infomace o denní půjezdnosti vozidel. Lze však předpokládat, že po zprovoznění posledního úseku dálnice D8 bude celková denní půjezdnost podobná jako na této dálnici v blízkosti Prahy. Vycházeli jsme proto z reálných dat z automatických sčítačů dopravy z 21. kilometru dálnice D8 poblíž Nové Vsi.

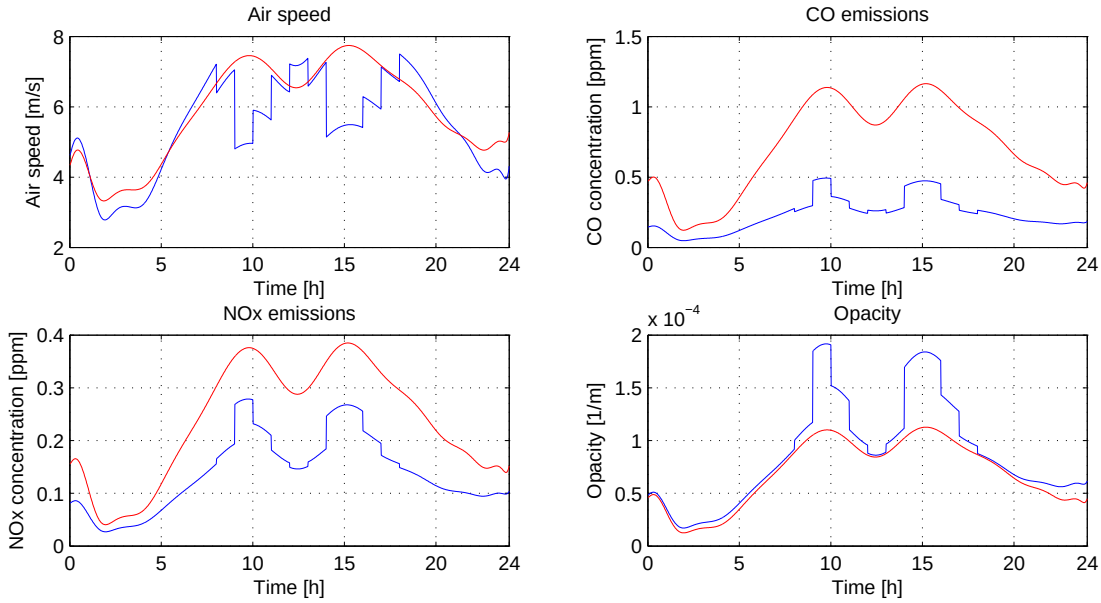
Vstupní data pro simulaci prvního scénaře byla následující:

- Celková denní průjezdnost: 15000 voz. směr Ústí nad Labem
  23000 voz. směr Praha
- Procentuální podíl nákladních vozidel: 16 % z celkového počtu
- Procentuální podíl dieselových osobních vozidel: 20 % z celkového počtu
- Tlakový rozdíl : -10 – 20 Pa pravá trouba směr Ústí nad Labem, -20 – 10 Pa levá trouba směr Praha

Procentuální podíl nákladních vozidel je na dálnici D8 oproti normálním silnicím pochopitelně zvýšen, protože tunel Radejčín má charakter dálničního tunelu s vyšším podílem tranzitní dopravy. Jedná se především o nákladní vozidla, která jedou z Německa (z Drážďan) do Prahy, popř. dále ve směru do Rakouska. Tlakový rozdíl během dne v levé klesající tunelové troubě je záporný, protože se jedná o záporný komínový efekt, kdy automobily jedou proti směru komínového efektu, naopak v pravé tunelové troubě je komínový efekt posílen.



Obrázek 6.1: Scénář I. – grafy počtu aut v tunelových troubách: vlevo levý tubus, vpravo pravý tubus



Obrázek 6.2: Scénář I. – grafy koncentrací emisí a rychlosti větru v tunelu: červeně pravý tubus, modře levý tubus

Obrázek 6.1 ukazuje grafy aktuálního počtu vozidel v tunelu během dne. Pro jednoduchost byla pro oba tubusy zvolena stejná distribuce automobilů během dne, jenom počty automobilů projíždějících levým tunelovým tubusem jsou vyšší.

Na grafech 6.2 si lze všimnout, že koncentrace zplodin se po celý den drží výrazně pod limity. Koncentrace CO je nejvyšší během 10. a 15. hodiny, kdy tunelem projíždí

nejvíce vozidel – v pravém tubusu cca 1,15 ppm a v levém tubusu cca 0,5 ppm. Na grafech koncentrací CO a NO_x v průběhu dne lze tedy vidět, že v pravém tubusu je celkově více emisí. To vyplývá z toho, že v levém tubusu je sice vyšší dopravní tok, ale pravý tubus je stoupající, má tedy vyšší sklon vozovky než tubus levý, a to se ukazuje jako důležitější faktor.

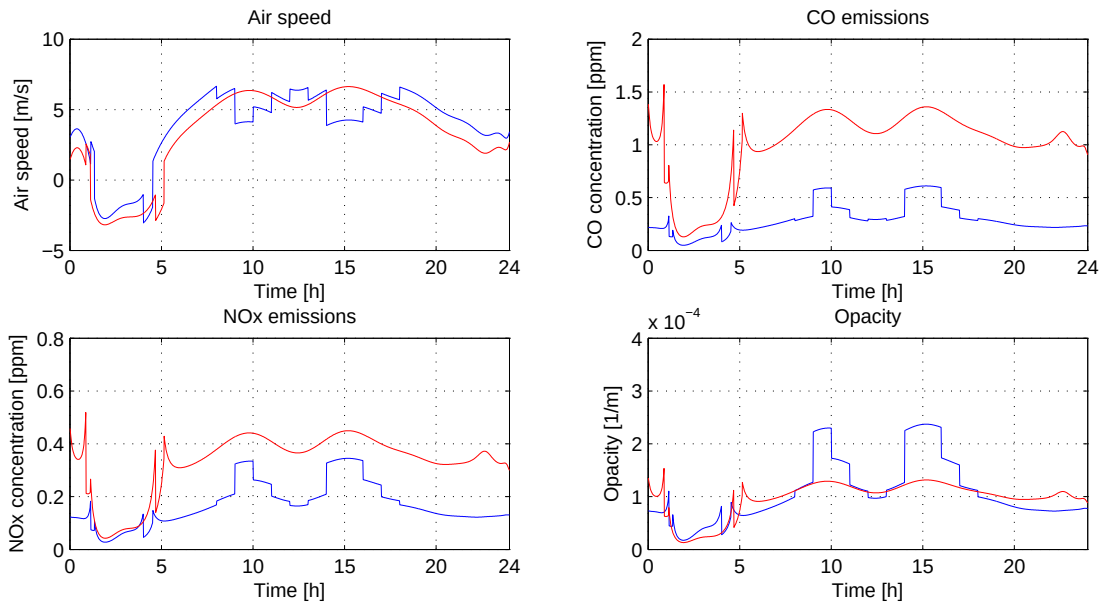
Naopak na grafech opacity je vidět, že opacita závisí mnohem více na počtu automobilů v tunelu než na procentuálním sklonu vozovky, protože v levé tunelové troubě je opacita podstatně vyšší než v troubě pravé.

Na obr. 6.2 si lze všimnout skokových změn na grafu rychlosti větru v tunelu v levé tunelové troubě. Jedná se o situaci, kdy se v tunelu nachází větší množství aut, tím dochází ke zmenšení bezpečných vzdáleností mezi automobily. Velín proto z bezpečnostních důvodů sníží maximální povolenou rychlost jízdy tunelem, a protože rychlost větru v tunelu se v simulaci vypočítává podle rovnice (3.13), kde člen ΔP_{veh} závisí na aktuální rychlosti automobilů, rychlost větru v tunelu se mění skokově. V pravé tunelové troubě je v danou chvíli méně aut, proto k takové situaci nedojde.

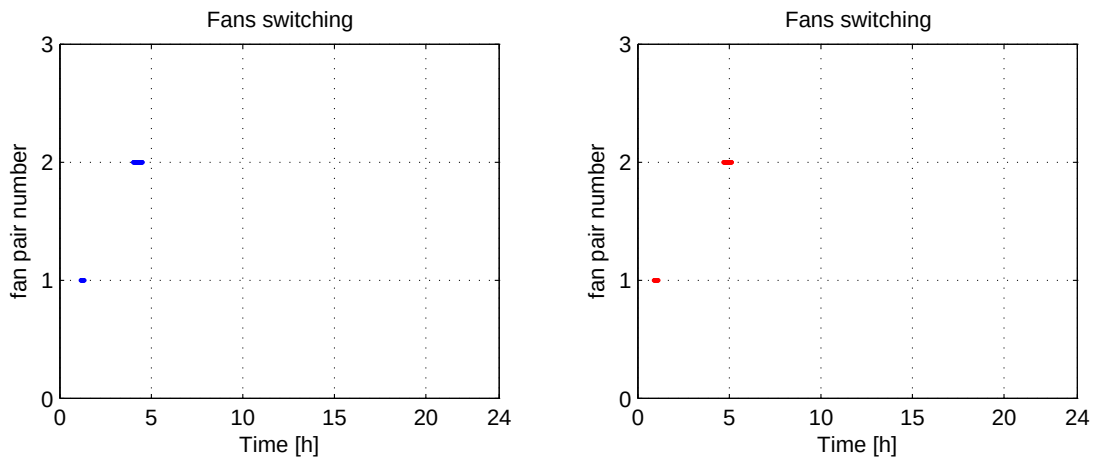
Situace normálního provozu jen potvrzuje projektovou dokumentaci firmy Pragoprojekt a. s. ke vzduchotechnice tunelu Radejčín, viz. [12] a [13]. Podle této dokumentace budou do rychlosti jízdy 20 km/h větrány tunelové trouby pístovým účinkem vozidel. Tato situace tedy není ničím zajímavá, protože ventilátory se po celý den v levém ani v pravém tubusu nezapnou.

Vstupní data pro simulaci druhého scénaře byla následující:

- Celková denní průjezdnost: 15000 voz. směr Ústí nad Labem
  23000 voz. směr Praha
- Procentuální podíl nákladních vozidel: 16 % z celkového počtu
- Procentuální podíl dieselových osobních vozidel: 20 % z celkového počtu
- Tlakový rozdíl : -30 – (-20) Pa v obou tunelových rourách



Obrázek 6.3: Scénář II. – grafy koncentrací emisí a rychlosti větru v tunelu: červeně pravý tubus, modře levý tubus



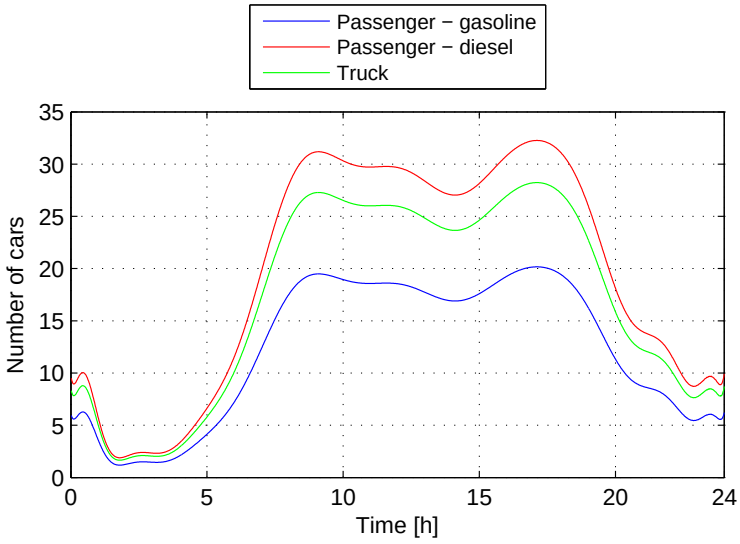
Obrázek 6.4: Scénář II. – grafy rozvrhování ventilátorů: vlevo levý tubus, vpravo pravý tubus

Grafy denní průjezdnosti vozidel jsou tedy shodné s obr. 6.1 scénáře I. Na grafech 6.3 rychlosti proudění větru v tunelu vidíme, že v obou tunelových troubách dojde v časech po 1. hodině a kolem 4. hodiny ranní k tomu, že se rychlost proudění větru dostane pod povolený limit 1 m/s. Tento stav nastane v obou tunelových troubách, protože vstupním

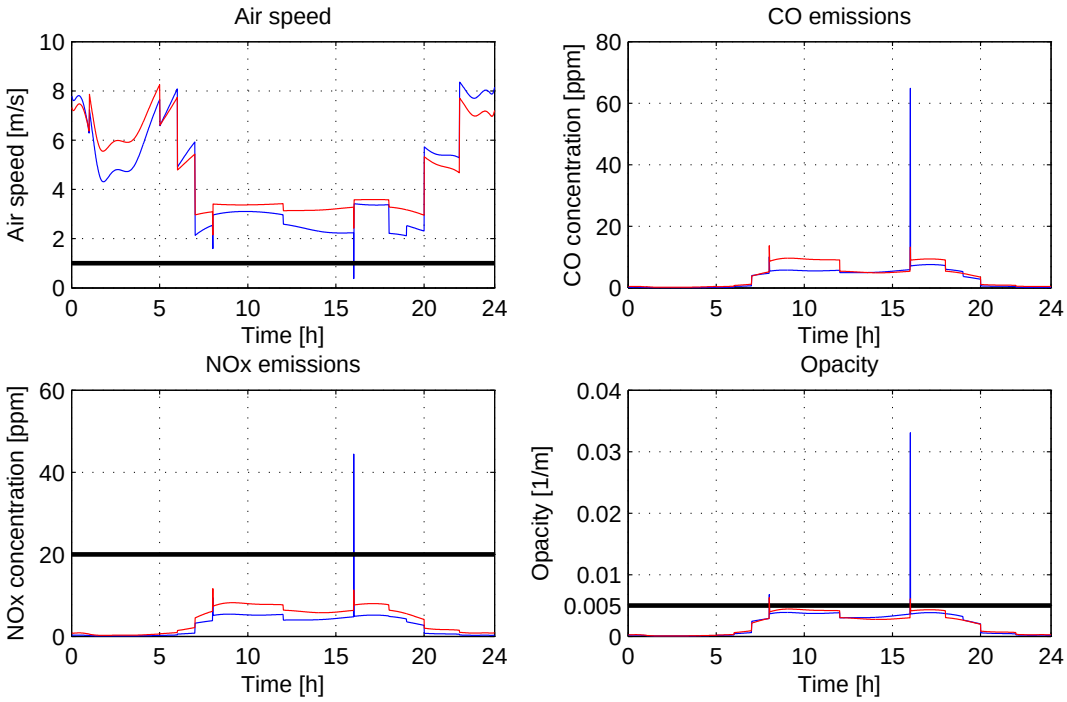
parametrem pro simulaci byl stejný tlakový rozdíl mezi portály obou tubusů a stejná distribuce vozidel během dne, na které rychlost větru v tunelu závisí enormně. Tím dojde k zapnutí dvojice ventilátorů (viz. obr. 6.4) v obou tunelových troubách. Vidíme, že řídicí systém se snaží všechny tři dvojice ventilátorů ve větrání rovnoměrně vystřídat, protože kolem 1. hodiny ranní spustí první dvojici ventilátorů a kolem 4. hodiny ranní druhou dvojici, avšak na třetí dvojici se už nedostane, protože v pozdějších hodinách nedojde ke snížení rychlosti proudění pod stanovenou mez. Obě dvojice ventilátorů běží přibližně 20 minut. Na grafech rychlosti proudění větru je vidět, že ventilátory způsobí zvýšení rychlosti proudění větru v tunelu, a tím nedojde k nežádoucím špičkovým hodnotám koncentrací emisí.

Vstupní data pro simulaci třetího scénaře:

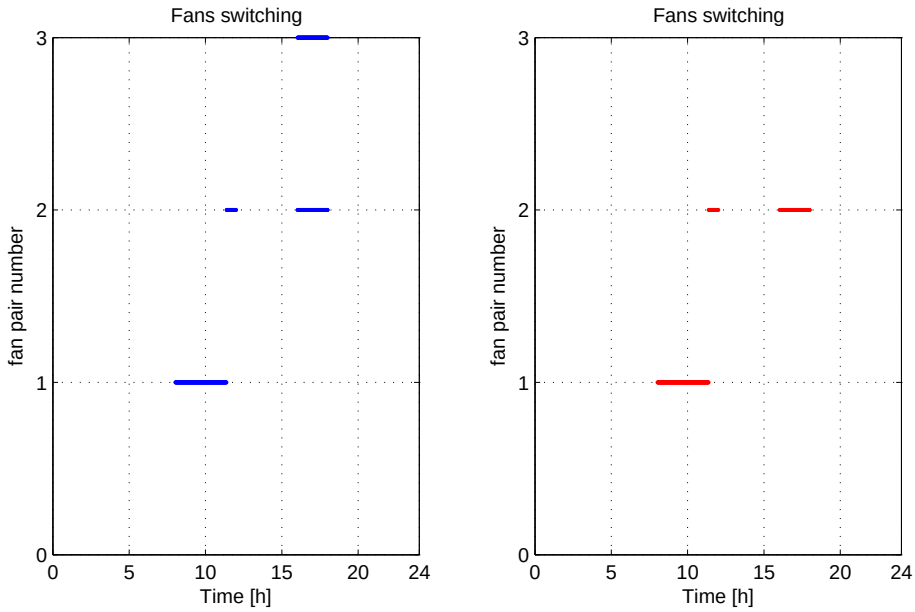
- Celková denní průjezdnost: 70 000 voz. pro oba tubusy
- Procentuální podíl nákladních vozidel: 35 % z celkového počtu
- Procentuální podíl dieselových osobních vozidel: 40 % z celkového počtu
- Tlakový rozdíl : -10 – 20 Pa pravá trouba směr Ústí nad Labem, -20 – 10 Pa levá trouba směr Praha



Obrázek 6.5: Scénář III. – grafy počtu aut v obou tunelových troubách



Obrázek 6.6: Scénář III. – grafy koncentrací emisí a rychlosti větru v tunelu: červeně pravý tubus, modře levý tubus



Obrázek 6.7: Scénář III. – grafy rozvrhování ventilátorů: vlevo levý tubus, vpravo pravý tubus

Z grafu 6.5 počtu automobilů v tunelových tubusech je na první pohled patrné, že oproti grafu 6.1 se změnila celková denní distribuce automobilů v průběhu dne a zvýšil se i celkový počet projíždějících automobilů. To má za následek zvýšení emisí, viz. grafy na obr. 6.6. Oproti scénářům I a II se koncentrace emisí CO a NO_x výrazně zvýšily. Kolem osmé hodiny ranní a šestnácté odpolední, kdy tunelem projíždí nejvíce automobilů, přesáhne opacita v obou tunelových troubách limitní hodnotu 0,005 m^{-1}. Je to způsobeno především tím, že auta jedou za sebou v malých rozestupech, což je brzdí na rychlosti, a tím snižují pístový efekt. V levé tunelové troubě, která má posílen záporný komínový efekt, navíc přesáhnou koncentrace NO_x povolenou hodnotu 20 ppm. Na grafech rozvrhování ventilátorů na obr. 6.7 si lze všimnout, že řídicí systém ihned zareaguje a zapne dvojici ventilátorů. Větrá se až do okamžiku, kdy by bez nuceného větrání emise přesahovaly limitní hodnoty, viz. tabulka 3.1.

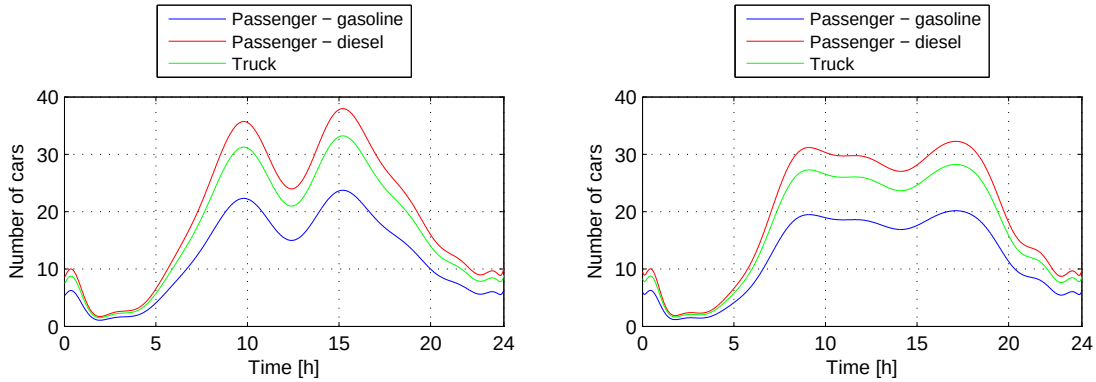
V pravé tunelové troubě je posílen kladný komínový efekt, proto během 16. hodiny odpolední stačí větrat jenom jednou dvojicí ventilátorů, na rozdíl od levé trouby, kde se i kolem 16. hodiny větrá čtyřmi ventilátory najednou.

Na grafech na obr. 6.7 pro levou tunelovou troubu si lze znovu všimnout, že ventilátory se během celého dne v obou tunelových rourách rovnoměrně prostřídají a navíc všechny tři běží dostatečně dlouhou dobu na to, aby nedocházelo k jejich opotřebení

častým vypínáním a zapínáním. V pravé tunelové troubě se třetí dvojice ventilátorů nedostane na řadu, protože penalizační funkce, viz. (4.4), uváží, že druhá dvojice ventilátorů neběžela ještě dostatečně dlouhou dobu na to, aby měla být vystřídána.

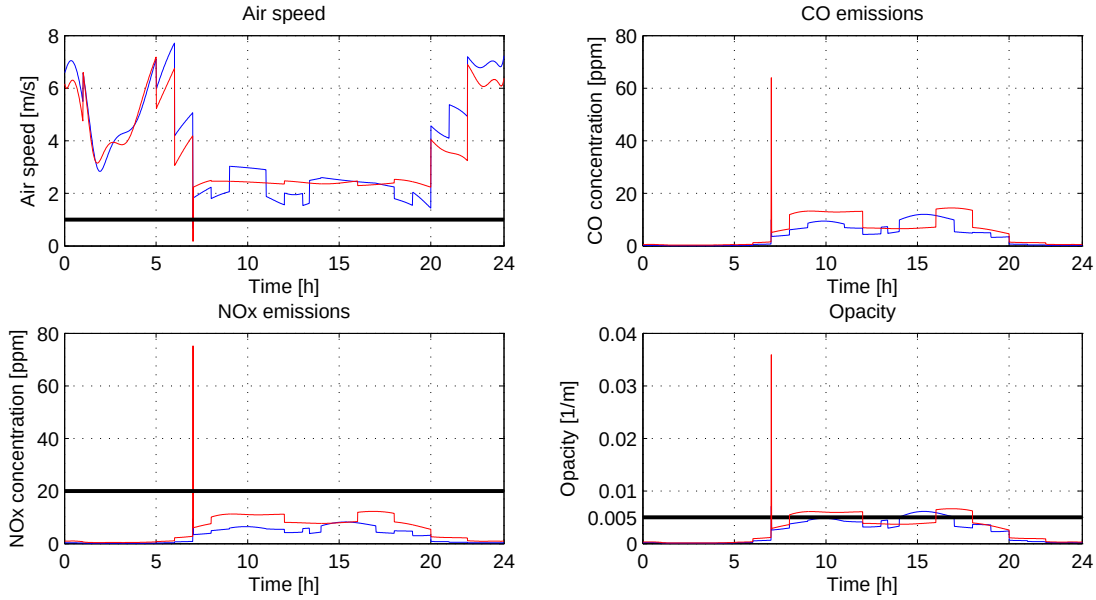
Poslední čtvrtý scénář tunelu Radejčín měl následující vstupní parametry:

- Celková denní průjezdnost: 70 000 voz. v obou tunelových rourách
- Procentuální podíl nákladních vozidel: 35 % z celkového počtu
- Procentuální podíl dieselových osobních vozidel: 40 % z celkového počtu
- Tlakový rozdíl : -30 – (-20) Pa v obou tunelových rourách



Obrázek 6.8: Scénář IV. – grafy počtu aut v tunelových troubách: vlevo levý tubus, vpravo pravý tubus

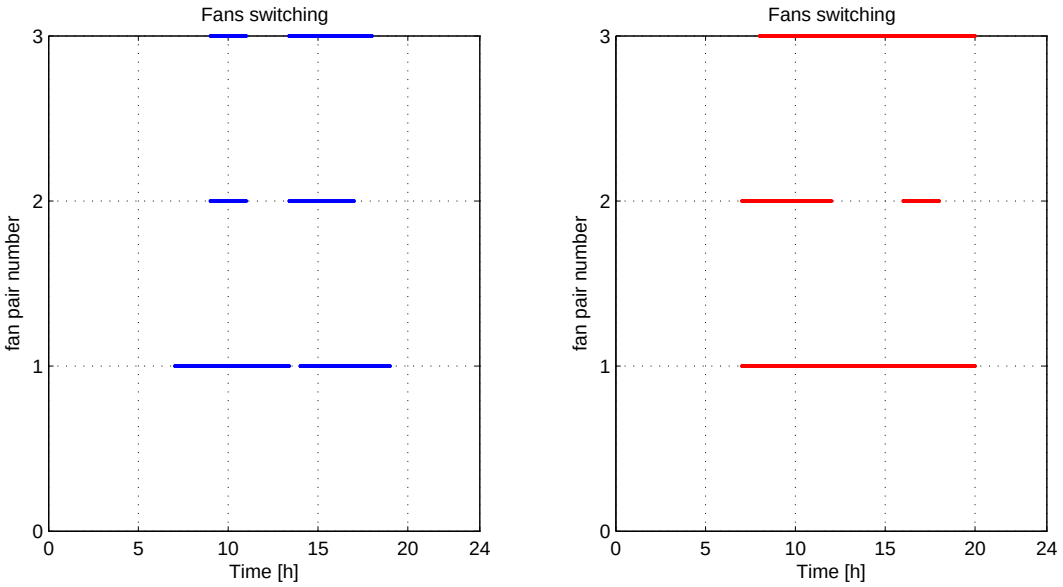
Nejprve se pojďme podívat na obr. 6.8, tedy na grafy počtu automobilů v tunelu během dne. Oba tunelové tubusy mají stejnou celkovou denní průjezdnost, ale jiné distribuce. Zatímco pravý tunelový tubus má denní intenzitu dopravy ve špičce rozdělenou více méně rovoměrně, tak levý tubus má výrazné špičky kolem 10. a 15. hodiny. Rozdílné distribuce byly vybrány záměrně, jinak by grafy koncentrací emisí vypadaly v obou tubusech velice podobně, a to by bylo nepřehledné.



Obrázek 6.9: Scénář IV. – grafy koncentrací emisí a rychlosti větru v tunelu: červeně pravý tubus, modře levý tubus

Na grafu rychlosti proudění větru, viz. obr. 6.9, vidíme, že rychlost proudění větru v pravé tunelové troubě klesne kolem sedmé hodiny ranní pod hodnotu 1 m/s. Situace je velice podobná předchozímu scénáři. Zatímco koncentrace emisí NO_x ventilátory poměrně snadno rozfoukají, opacita se v obou tunelových troubách drží stále těsně nad limity, a přitom jsou všechny ventilátory v tunelu zapnuty, viz. obr. 6.10.

Můžeme tedy konstatovat, že tento dopravní scénář je zároveň jakýmsi výkonostním limitem pro ventilaci. Je zřejmé, že při dopravní zácpě by ventilátory emise CO a NO_x rozfoukaly, zatímco opacitu nikoli. Opacita ovšem nemůže způsobit otravu organismu, ta pouze zhoršuje viditelnost v tunelu.



Obrázek 6.10: Scénář IV. – grafy rozvrhování ventilátorů: vlevo levý tubus, vpravo pravý tubus

6.2 Simulace na tunelu Klimkovice

Pro simulaci na tunelu Klikovice jsem vybral reálný scénář z pátku 27. 11. 2009. Vycházel jsem ze skutečných dat od Ředitelství silnic a dálnic ČR. V tento den byla v tunelu Klimkovice ve směru na Prahu nejvyšší průjezdnost v celém roce 2009.

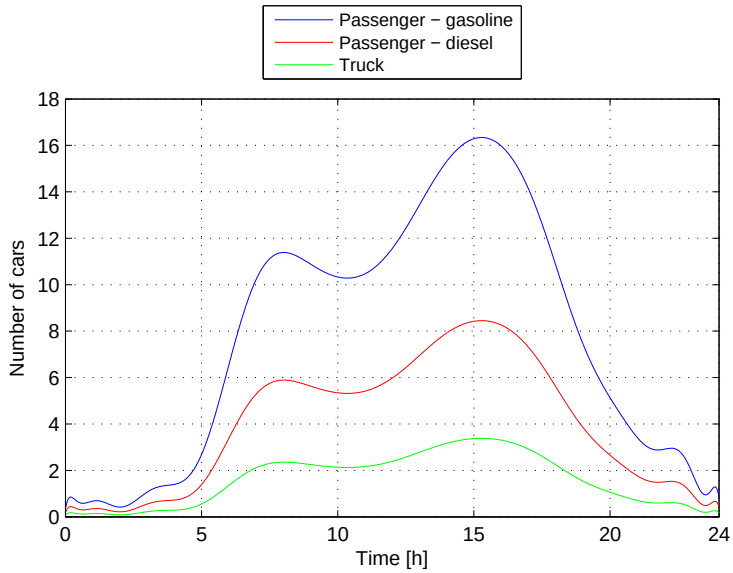
Dne 27. 11. 2009 projely tunelem Klimkovice ve směru na Prahu tyto počty vozidel:

- Osobní auto – 14 762

- Osobní auto s přívěsem – 202
- Pickup – 1862
- Nákladní auto – 1904
- Nákladní auto přívěsem – 406
- Autobus – 38

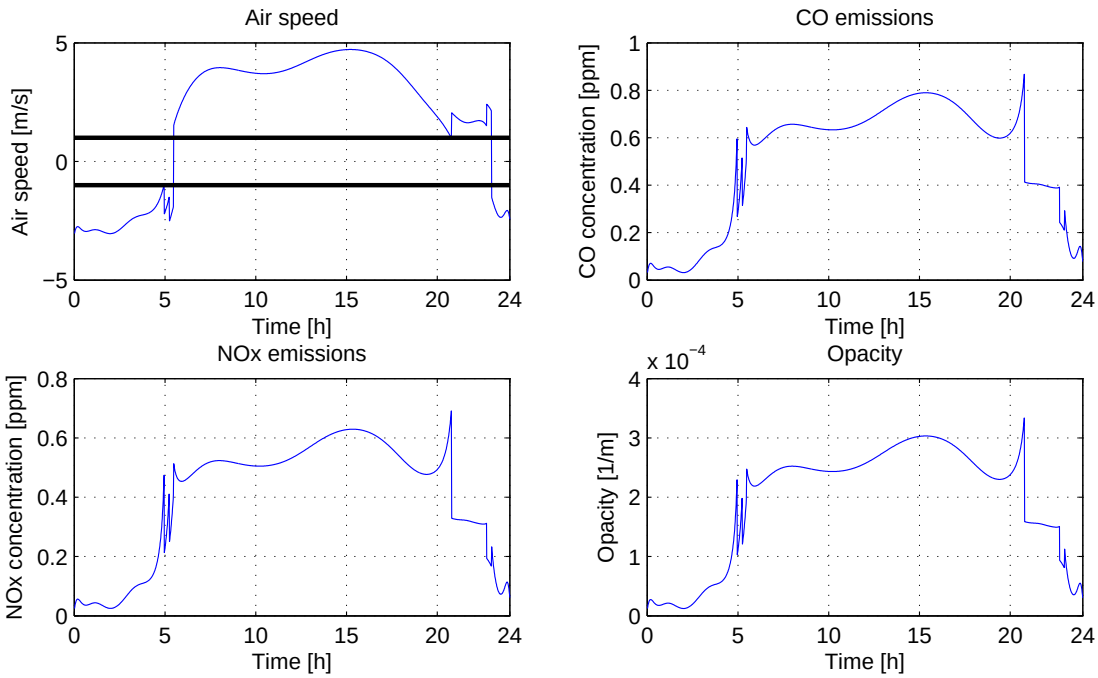
První tři uvedené typy vozidel můžeme pro naše účely zahrnout do kategorie osobních vozidel a poslední tři typy můžeme zahrnout souhrnně do kategorie nákladních vozidel. Sčítač dopravy nedokáže rozeznat dieselový a benzínový osobní automobil. Můžeme ale usoudit, že většina pickupů plus další procenta osobních automobilů budou mít dieselový motor. Z těchto údajů jsme potom sestavili dopravní scénář pro naprogramovanou aplikaci.

- Celková denní průjezdnost: 19174 voz. směr Praha
- Procentuální podíl nákladních vozidel: 12 % z celkového počtu
- Procentuální podíl dieselových osobních vozidel: 30 % z celkového počtu
- Tlakový rozdíl : -30 – (-20) Pa



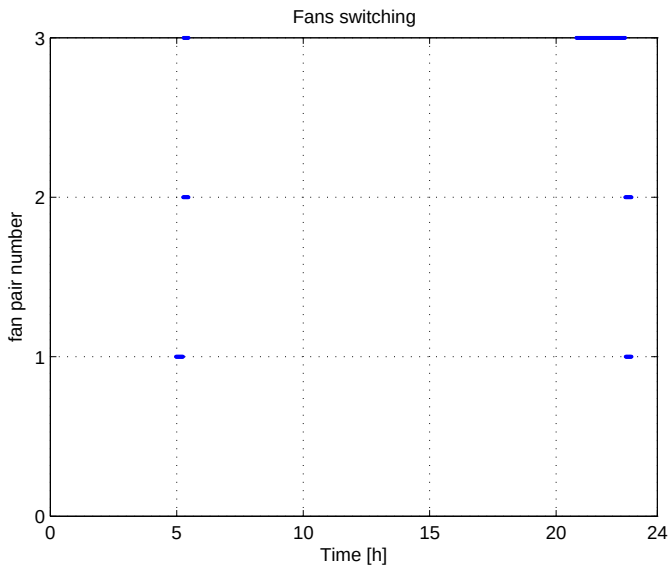
Obrázek 6.11: Grafy počtu aut v tunelu Klimkovice ve směru na Prahu

Denní distribuce automobilů je také skutečná. Můžeme si všimnout, že ranní špička, která nastane přibližně v 7.30 hodin je nižší než odpolední špička v 15 hodin. Je pochopitelné, že v pátek odjíždějí lidé z práce dříve, proto je v tunelu maximální počet automobilů kolem třetí hodiny odpolední.



Obrázek 6.12: Graf koncentrací emisí a rychlosti větru v levém tubusu tunelu Klimkovice

Na grafech na obr. 6.12 není také nic nepochopitelného. Při normálním provozu nedojde téměř nikdy k tomu, aby se koncentrace emisí zvýšily nad limitní hodnoty. To už jsme koneckonců zjistili i u simulací na tunelu Radejčín viz. kapitola 6.1. Během dne je tedy nutné větrat zejména na udržení minimálního proudění vzduchu v tunelu. V pět hodin ráno a devět večer dojde k tomu, že se proudění sníží až pod limitní hodnotu 1 m/s. Tím dojde k zapnutí ventilátorů. Na grafu rychlosti proudění vzduchu v tunelu je vidět, že ventilátory opravdu rychlost proudění zvýší.



Obrázek 6.13: Graf rozvrhování ventilátorů v levém tubusu tunelu Klimkovice

Kapitola 7

Závěr

Obsahem této práce byl rozbor fyzikálních dějů ovlivňujích rychlost proudění větru a koncentrace zplodin v dálničních tunelech. Celá práce se zabývala pouze problematikou provozního větrání, tedy větrání na udržení hladin koncentrací škodlivin.

Byl vytvořen matematický model libovolného dálničního tunelu, na který pohlížíme jako na statický a který se řídí Bernoulliho rovnicemi. Tento model se stal základem pro naprogramovaný simulátor řízení vzduchotechniky v prostředí .NET a Matlab. Tento simulátor byl poté postupně odzkoušen na několika dopravních scénářích na dvou dálničních tunelech – Radejčín a Klimkovice. Především pro tunel Radejčín byly simulace nutné provést, protože tento tunel je ještě ve výstavbě a v tunelu se počítá s nasazením vzduchotechniky. Scénáře byly voleny tak, aby se zjistil především limit výkonosti ventilátorů a také jestli jsou navržené ventilátory pro tunel dostačující.

Ze simulací v kapitole A.4 bylo zjištěno, že navržené počty i parametry ventilátorů v tunelu Radejčín jsou při naprosté většině dopravních situací dostačující. Při normálním denním provozu tunelu je nutné větrat jenom v případě, kdy se proudění vzduchu v tunelu téměř zastaví (klesne pod 1 m/s). Tím by totiž vznikaly nepříjemné špičkové koncentrace škodlivin, které by mohly být pro cestující tunelem nebezpečné. Limit výkonosti ventilátorů přichází až ve chvíli, kdy je v tunelu výrazně zvýšená denní intenzita vozidel (přes 70 000 vozidel/den) a navíc jsou nepříznivé povětrnostní podmínky. V tomto případě ventilátory nedokážou odvětrat z tunelu emise způsobující opacitu, ovšem emise CO i NO_x odvětrají bez větších potíží. Zvýšenou opacitu lze ovšem do jisté míry tolerovat, protože ta nemůže způsobit otravu jako oxidy dusíku nebo oxid uhelnatý.

Celá bakalářská práce byla zpracována pod záštitou firmy Spel spol. s r.o., která bude jedním z realizátorů technologického vybavení tunelu Radejčín. Zmíněná firma může v budoucnu tento simulátor využít při výstavbě jak tunelu Radejčín, tak i dalších tunelů.

Literatura

[1] Internetové stránky Ředitelství silnic a dálnic ČR [online]. [cit. 2010-01-18]. Dostupné na www: <http://www.rsd.cz>.

[2] Internetové stránky firmy SPEL spol. s.r.o. [online]. [cit. 2010-05-10]. Dostupné na www: <http://www.spel.cz>.

[3] Internetové stránky serveru dalnice – silnice [online]. [cit. 2010-04-22]. Dostupné na www: <http://www.dalnice-silnice.cz>.

[4] Technologické vybavení tunelů pozemních komunikací – technické podmínky (TP98), Ministerstvo dopravy a spojů a Eltodo EG. Praha, 2003.

[5] Directive 2004/54/EC of the European Parliament and of the Council on minimum safety requirements for tunnels in the Trans – European Road Network. Brussels, 2004.

[6] Bring Axel, Malmström Tor-Göran and Boman Carl Axel: Simulation and Measurement of Road Tunnel Ventilation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, ročník 12, č. 3, November 1997: s. 417–424.

[7] Comitee on Road Tunnels: Road Tunnels – Vehicle Emissions and Air Demand for Tunnel Ventilation, 2003.

[8] Ferkl, L., Kurka, L., Sládek, O., Pořízek, J.: Simulation of traffic, ventilation and exhaust in a complex road tunnel. Prague, 2005.

[9] Fleknová, V.: Vzduchotechnika. Střední průmyslová škola Praha 10, Na Třebešíně 2299, 2008.

[10] Vachule, M.: Bakalářská práce – Řízení ventilace tunelu Sitina, ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 2006/2007.

[11] The Mathworks: *Matlab Builder NE 3 – User´s guide.* 2009.

[12] Novosad a kol.: Aktualizace dokumentace pro stavební povolení tunelu Radejčín. Technická zpráva, Pragoprojekt a.s., 2007.

[13] Novosad a kol.: Dokumentace pro stavební povolení tunelu Radejčín, provozní soubor: PS 602.51 VZDUCHOTECHNIKA. Technická zpráva, Pragoprojekt a.s., 2007.

[14] Zápařka, J.: Bezpečnost při požáru v tunelu. *Časopis Stavebnictví*, č. 05/09, Květen 2009.

Příloha A

Uživatelský manuál

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra řídicí techniky

Uživatelský manuál

Simulátor řízení vzduchotechniky

Jan Šulc
květen 2010

A.1 Instalace

Před samotným spuštěním aplikace je nutné ověřit, jestli je na Vašem PC nainstalován program MCR (Matlab Compiler Runtime). Tento program je nutný pro volání funkcí z prostředí jiného než Matlab. Verze Matlab R2008a využívá MCR verze 7.8. Všechny novější verze MCR budou pro aplikaci funkční.
Program MCR je obvykle nainstalován na standardní cestě:
C:/Program Files/MATLAB/MATLAB Compiler Runtime/

Pokud tedy na Vašem PC nemáte nainstalovánu verzi MCR alespoň 7.8, otevřte adresář *Simulator*, dále *Matlab Compiler Runtime* a *Distrib* a spusťte soubor *MCRInstaller.exe*. Tento program za Vás nainstaluje do správné cílové složky verzi MCR 7.8.

Pro správnou funkčnost aplikace doporučuji používat stále jedno místní jazykové nastavení operačního systému. Tím se předejde chybám s interpretací desetinné čárky a tečky v různých prostředích. Tato chyba nastane především při načítání a ukládání různých dopravních profilů a parametrů tunelu z jiných jazykových prostředí. Spouštění simulace by mělo probíhat bez problémů.

A.2 Spuštění aplikace

Samotnou aplikaci poté spustíte následujícím postupem. Vstupte do adresáře *Simulator*, otevřte složku *Application*, odtud dále složku *Bin* a *Debug*. Zde se nachází spustitelný soubor *Simulator.exe*. Spusťte ho.

Po spuštění aplikace se Vám zobrazí úvodní obrazovka, viz. obr. A.1, ve které je možné zadávat parametry tunelu a ventilátorů.

Obrázek A.1: Úvodní obrazovka

V levém horním rohu se nachází oblast, kde je možné vyplnit parametry tunelu. Všechny hodnoty musí být vyplněny správně, jinak nelze pokračovat v simulaci dále. V následující tabulce je uveden povolený rozsah a datový typ parametrů tunelu:

Tabulka A.1: Tabulka přípustných hodnot pro parametry tunelu

parametr anglicky	parametr česky	minimální hodnota	maximální hodnota	datový typ
tube length[m]	délka tunelu[m]	300	3000	celé číslo
altitude[m]	nadmořská výška[m]	0	3000	celé číslo
tube diameter[m]	průměr tunelu[m]	8	20	desetinné číslo
friction factor[-]	třecí faktor[-]	0,01	0,08	desetinné číslo

Dále je možné pomocí roletkových seznamů nastavit stoupání vozovky (slope), počet jízdních pruhů (number of lanes) a maximální povolené rychlosti osobních a nákladních vozidel v tunelu.

Naopak v pravém horním rohu se nachází oblast, kde je možné vyplnit parametry ventilátorů v tunelu. Předpokládá se, že všechny ventilátory v tunelu jsou stejné. Zaškrtnutím políčka „In pairs“ na hlavní obrazovce nastavíte ventilátory v tunelu tak, že

budou umístěny vždy po dvojici. Celkový počet ventilátorů pak bude dán dvojnásobkem hodnoty v textovém poli „number of fans“. Další parametry ventilátorů jsou uvedeny v tabulce A.2 včetně jejich povolených rozsahů a datových typů.

Tabulka A.2: Tabulka přípustných hodnot pro parametry ventilátorů

parametr anglicky	parametr česky	min. hodnota	max. hodnota	datový typ
number of fans	počet ventilátorů	0	20	celé číslo
volumetric flow[m^3/s]	objemový průtok[m^3/s]	5	100	desetinné číslo
fan efficiency[%]	účinnost ventilátoru[%]	10	99	desetinné číslo
Static thrust[N]	statický tah[N]	500	3000	desetinné číslo
Fan input[W]	příkon ventilátoru[W]	5000	40000	desetinné číslo
Diameter[m]	Průměr[m]	0,5	3	desetinné číslo

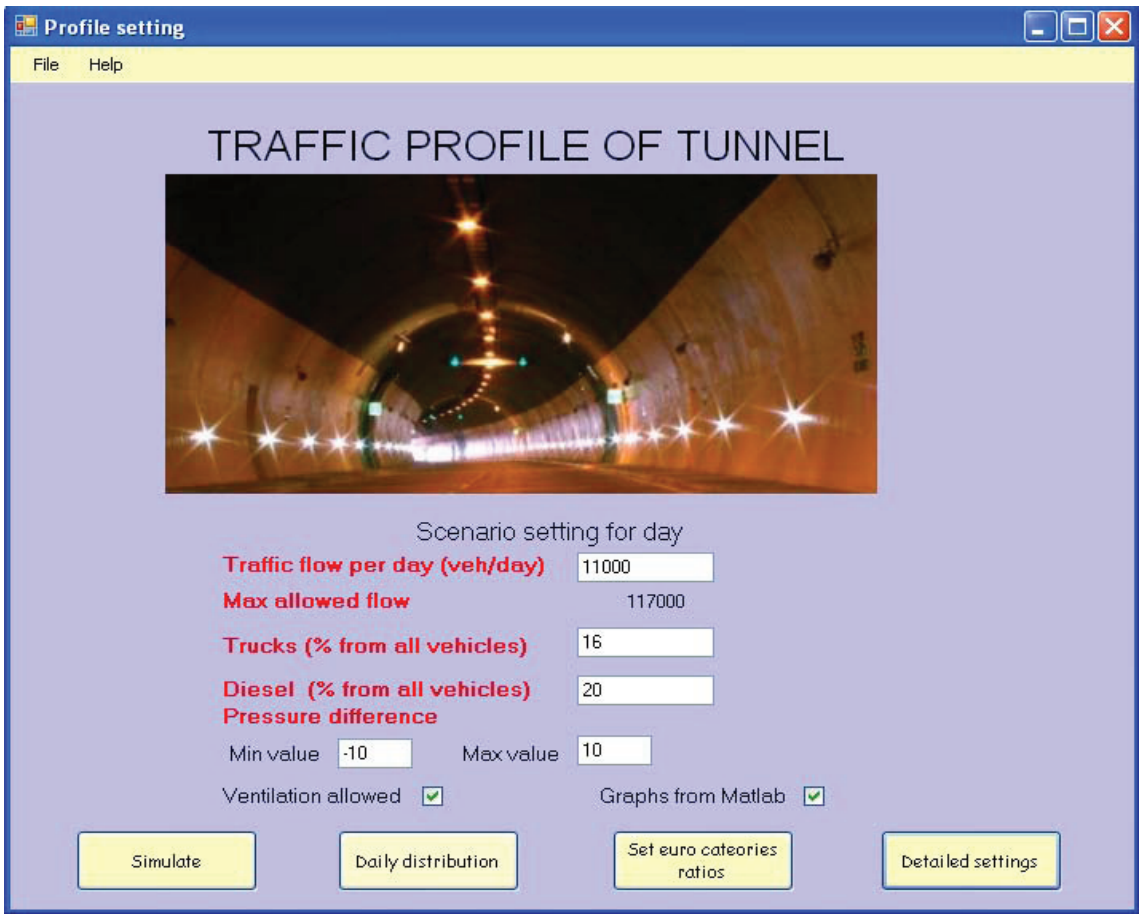
Pro výpočet výstupní rychlosti proudění ventilátoru je nutné zadat alespoň dva parametry z následujících tří: objemový průtok, průměr ventilátoru a statický tah.

A.3 Nastavení dopravního profilu

Pokud jste správně zadali parametry tunelu a ventilátorů, můžete upřít pozornost na menu v horní části hlavního okna aplikace, kde se nachází položky File, Figure a Help.

Po kliknutí v menu na položku File se rozvine seznam s dalšími položkami *New profile, Load profile, Save profile, Save tunnel parameters, Load tunnel parameters a exit.*

Chcete-li vytvořit nový profil, klikněte na položku *New profile.* Tím se otevře nové okno s jednoduchým nastavením dopravního profilu, viz. obr. A.2.



Obrázek A.2: Okno s jednoduchým nastavením dopravního profilu

V tomto okně lze nastavit řadu důležitých parametrů. Nejprve se pojďme podívat na textová pole v tomto okně. V nich lze nastavit tyto parametry:

- Celková denní průjezdnost vozidel (Traffic flow per day)
- Procentuální podíl nákladních automobilů (Trucks %)
- Procentuální podíl osobních dieselových automobilů (Diesel %)
- Min. a max. hodnota tlakového rozdílu mezi portály během dne (Pressure difference)

Pod textovým polem, ve kterém lze zadat celkovou denní průjezdnost vozidel, se uživateli ukazuje také maximální povolená denní průjezdnost, která závisí na procentuálním podílu nákladních automobilů a denní hodinové distribuci vozidel.

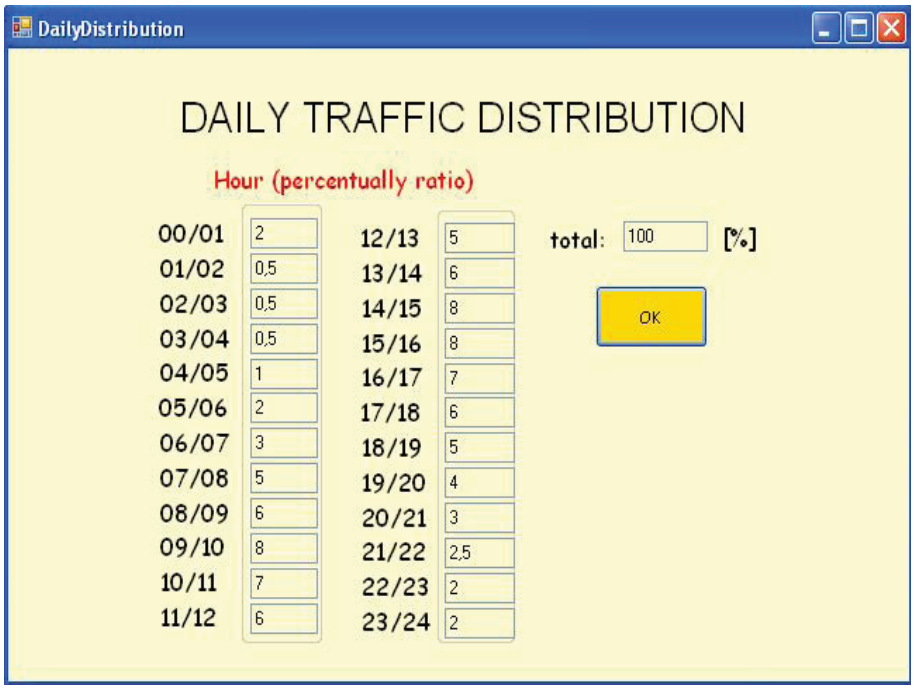
Je zřejmé, že procentuální hodnoty podílu nákladních a dieselových osobních automobilů nesmí dát v součtu více jak 100 procent, jinak Vám program nepovolí simulaci spustit.

Omezení je kladeno také na maximální a minimální hodnotu lokálního tlakového rozdílu mezi portály. Tyto hodnoty jsou uvedeny v pascalech a minimální povolená hodnota je nastavena na -40 Pa a maximální hodnota na +40 Pa.

Nyní se pojďme věnovat tlačítkům v tomto okně. Jsou tu celkem čtyři:

- Simulate
- Daily Distribution
- Set euro categories ratios
- Detailed settings

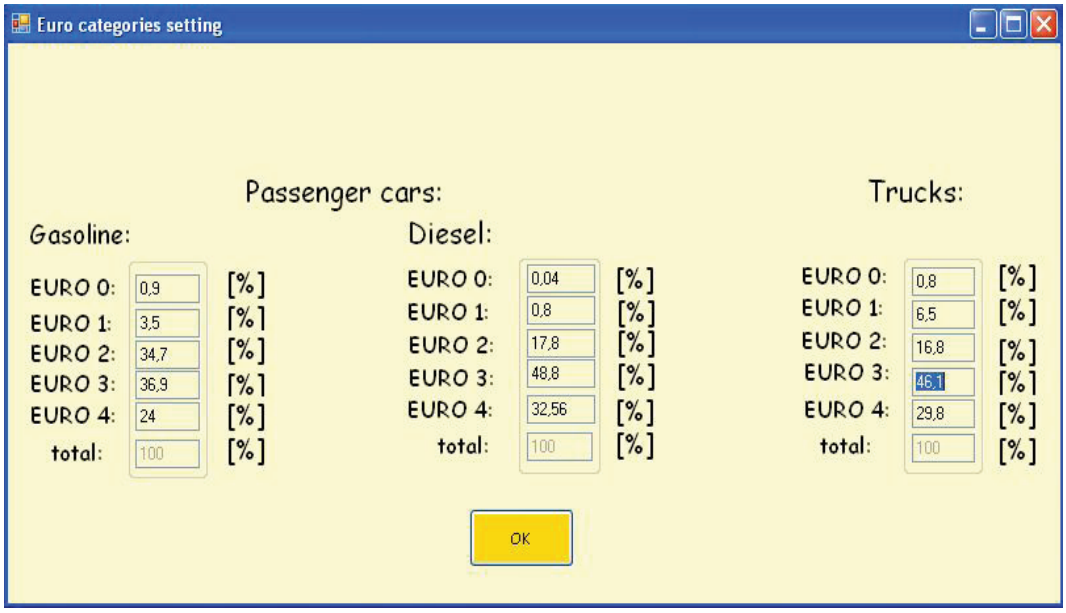
Tlačítko *Simulate* představuje přímé spuštění simulace. Více o simulaci viz. sekce A.4. Kliknutím na tlačítko *Daily Distribution* lze v novém okně nastavit hodinovou procentuální distribuci automobilů. Program sám kontroluje, jestli je každá hodina nastavena jako číslo a jestli celkový procentuální podíl v celém dni je roven 100. Ukázku tohoto okna lze vidět na obr. A.3.



Obrázek A.3: Nastavení hodinových procentuálních distribucí automobilů

Tlačítkem *Set euro categories – ratios* lze nastavit procentuální podíly kategorií EURO pro všechny typy vozidel, tedy pro osobní benzínové, osobní dieselové a nákladní automobily. Okno s tímto nastavením je zobrazeno na obr. A.4. Jelikož statistiky rozdělení

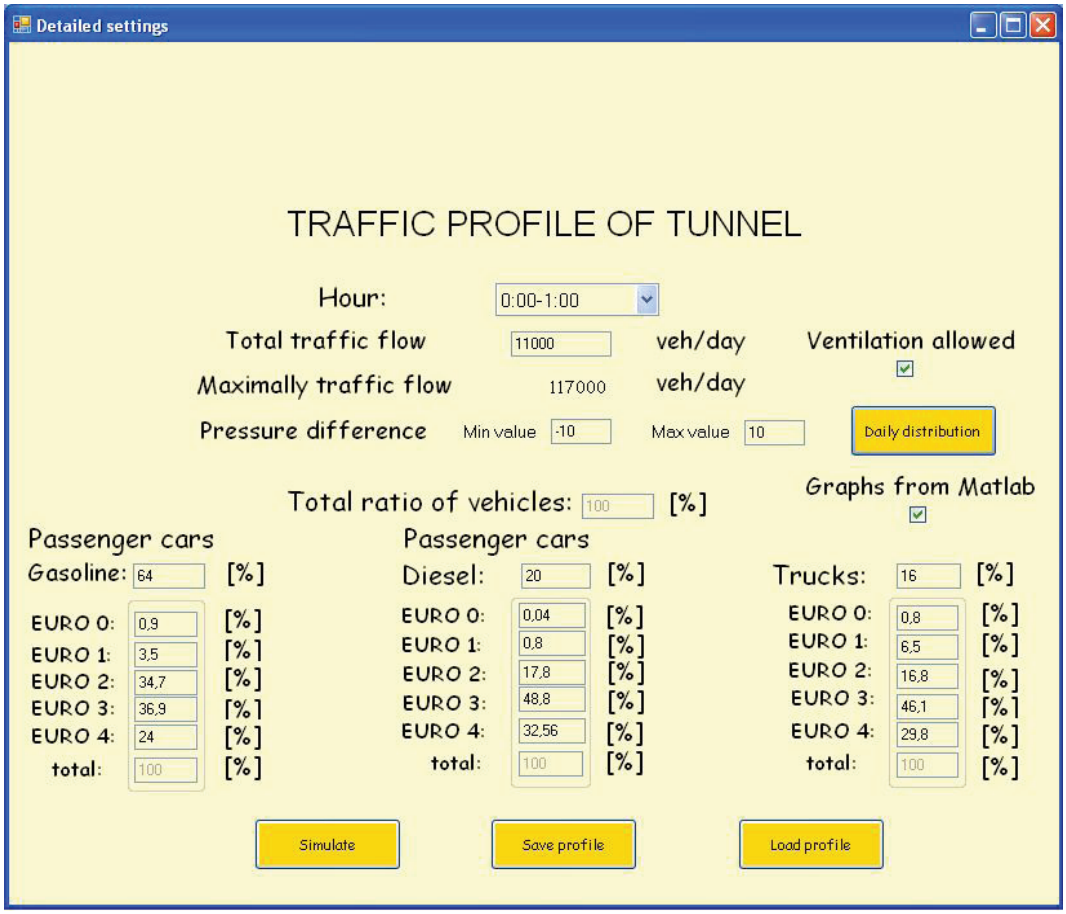
počtu aut se podle euro kategorií neuvádějí, jsou hodnoty v okně implicitně nastaveny podle statistik roku výroby vozidel. V okně je po kterékoli změně kontrolováno, zda součet všech procentuálních podílů kategorií EURO dané kategorie je přesně roven 100%.



Obrázek A.4: Nastavení kategorií EURO

V okně s nastavením dopravního profilu se nachází ještě jedno tlačítko – *Detailed settings*. Po jeho zmáčknutí se objeví okno na obr. A.5. Toto okno slouží k podrobnému nastavení dopravního profilu. Je zřejmé, že např. kamiony mají jiný procentuální podíl ve špičce a mezi 22 - 23 večerní, kdy dokonce na českých silnicích mají zákaz jezdit. V tomto okně lze tyto situace ošetřit. Pro libovolnou hodinu lze nastavit poměry mezi všemi typy automobilů a také jejich poměry mezi euro kategoriemi. K tomu slouží roletkový seznam v horní části obrazovky, kde si uživatel může vybrat danou hodinu.

Podobně jako v předchozím okně s jednoduchým nastavením dopravního profilu lze i v tomto okně nastavit denní hodinové distribuce automobilů, hodnoty minimálního a maximálního tlakového rozdílu během dne a také celkovou denní průjezdnost vozidel.



Obrázek A.5: Detailní nastavení dopravního profilu

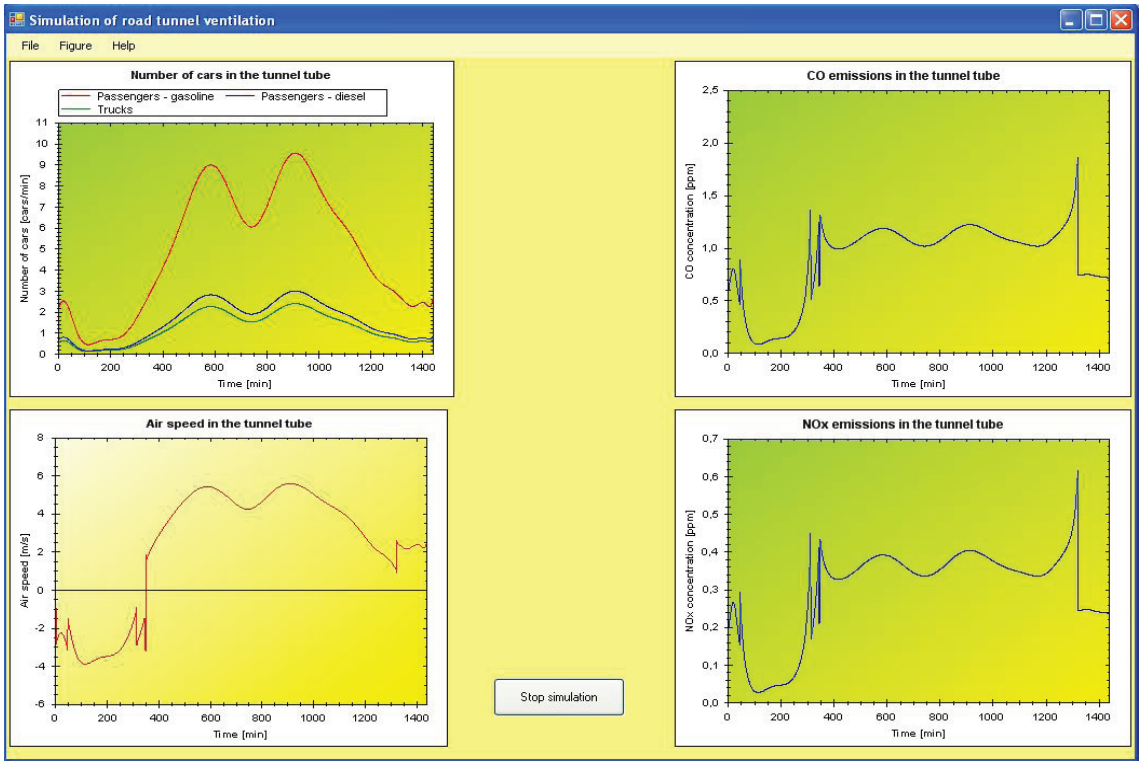
A.4 Simulace

Simulaci lze provádět jak z okna s jednoduchým nastavením dopravního profilu, tak i z okna s detailním nastavením. Před simulací může uživatel v těchto oknech zaškrnout, jestli si přeje zobrazit grafy také z programu MATLAB a jestli povoluje větrání v průběhu dne. To může sloužit např. k simulování výpadku řídicího systému vzduchotechniky nebo k porovnávání koncentrací emisí v případech, kdy je řídicí systém zapnut a kdy vypnut.

Simulace se v obou oknech provádí stisknutím tlačítka *Simulate*. Tím se nejprve zkontrolují všechny parametry zadané v těchto oknech. Poté se spustí samotná simulace. Výsledky (grafy) simulace se zobrazí do původního hlavního okna aplikace, viz. obr. A.6. Celkem se vykreslí osm grafů:

- Počty aut (number of cars)
- Rychlost větru (Air speed)
- Emise CO (CO emissions)
- Emise NOx (NOx emissions)
- Opacita (Opacity)
- Rozvrhování ventiátorů (Fans switching)
- Počty aktuálně běžících ventilátorů (Actually running fans)
- Celková doba provozu ventilátorů (Total service time)

Z těchto osmi grafů jsou čtyři zobrazeny ihned po simulaci. Pokud si uživatel přeje zobrazit další grafy, musí kliknout na menu v horní části obrazovky a kliknout na položku *Figure*. Tím se rozvine seznam se všemi dostupnými grafy, které lze zobrazit. Najednou je možné nechat zobrazit až čtyři grafy. Pro zobrazení dalšího grafu je nutné odznačit některý graf a místo něj označit jiný.



Obrázek A.6: Simulace

Jak lze vidět na obr. A.6, v hlavním okně aplikace se zaktivovalo tlačítko *Stop simulation*, které slouží k ukončení simulace. Po zmáčknutí tohoto tlačítka se hlavní okno vrátí do startovního stavu, viz. obr. A.1.

A.5 Načítání a ukládání dat

V aplikaci je možné ukládat jak parametry ventilátorů a tunelu, tak i dopravní profil tunelu.

Tunelové parametry lze uložit pouze ze startovního okna aplikace, viz. obr. A.1 nebo A.6. Postupuje se tak, že se klikne na záložku *File* v menu v horní části obrazovky. Tím se rozvine seznam s dalšími položkami *New profile, Load profile, Save profile, Save tunnel parameters, Load tunnel parameters a Exit.* Dále se klikne na položku *Save tunnel parameters.* Tím se otevře dialogové okno pro výběr textového souboru, do kterého se tunelové parametry zapíšou. V tomto okně lze nový textový soubor vytvořit nebo přepsat již stávající. Tunelové parametry se automaticky ukládají s příponou .tun.

Analogicky lze načíst jakékoli stávající tunelové parametry z textového souboru. To lze udělat znovu jedině z hlavního okna aplikace, viz. obr. A.1. Tentokrát je nutno kliknout na položku *load tunnel parameters* záložky *File* v menu horní části okna.

Dopravní profil tunelu lze uložit jak v hlavním okně aplikace, viz. obr. A.6, tak v okně s jednoduchým nastavením dopravního profilu, viz. obr. A.2, ale také v okně s podrobným nastavením dopravního profilu, viz. obr. A.5. V hlavním okně aplikace to je možné udělat pouze po spuštění simulace, a to kliknutím na položku *Save profile* záložky *File* v menu horní části okna. V okně s jednoduchým nastavením dopravního profilu to je možné udělat rovněž kliknutím na položku *Save profile* záložky *File* v menu v horní části okna. V okně s detailním nastavením je možné uložit profil pomocí tlačítka *Save profile.* Dopravní profily se automaticky ukládají s příponou .pf.

Analogicky lze načíst jakýkoli stávající dopravní profil z textového souboru. V okně A.1 a A.2 je ale tentokrát nutno kliknout na položku *load profile* záložky *File* v menu v horní části okna. Pro načtení dopravního profilu z okna A.5 k tomu slouží tlačítko *load profile.*

Po načtení dopravního profilu se vždy zobrazí okno s detailním nastavením dopravního profilu.

A.6 Nápověda

V aplikaci je k dispozici rychlá nápověda v angličtině a popis programu, který je rovněž anglicky.

Zobrazení nápovědy nebo informací o aplikaci je možné provést z okna A.1 nebo z okna A.2 kliknutím na položku *Help* v menu v horní části obrazovky.

Příloha B

Komunikace mezi prostředím .NET a Matlab

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra řídicí techniky

Komunikace mezi prostředím .NET a Matlab

Jan Šulc

květen 2010

B.1 Požadavky a možnosti

Při vývoji aplikace (simulátoru řízení vzduchotechniky) jsem využíval možnost, která je založena na spojení mezi prostředím .NET a Matlab. Protože tento způsob není v českém jazyce v prostředí internetu popsaný, rozhodl jsem se napsat na toto téma krátký návod. Podrobnější návod v anglickém jazyce od firmy Mathworks [11] jsem přidal jako přílohu na doprovodné CD k bakalářské práci.

Při vývoji jsem používal následující verze pomocných programů:

- Matlab R2008a
- Matlab Builder NE
- Visual Studio 2008 Proffesional Edition

Tyto tři zmiňované produkty Vám umožní vývoj aplikací v programu Matlab a jejich následnému volání přes dynamicky linkované knihovny v prostedí .NET. S výhodou je použitá automatická konverze datových typů mezi prostředím .NET a Matlab.

Toolbox Matlab Builder NE obsahuje dva důležité prográmky, které využijeme při vývoji aplikací. Jedná se o Matlab Compiler Runtime (MCR) a Deployment tool.

B.2 Matlab Compiler Runtime(MCR)

Pro spouštění .NET aplikací, které volají funkce z prostředí Matlab, je zapotřebí Matlab Compiler Runtime (MCR). MCR je součástí toolboxu *Matlab Builder NE*. MCR je sada sdílených knihoven potřebných pro spouštění jazyka Matlab. Tyto knihovny zprostředkují podporu pro Matlab. Lze tedy spouštět funkce jako např. solve, fzero, ones, plot, atd. Výhoda je v tom, že na cílovém PC nemusí být nainstalována žádná verze Matlabu, postačí, když bude nainstalován MCR a aplikace půjde na tomto PC spustit.

B.3 Deployment tool

Součástí toolboxu *Matlab Builder NE* je nástroj zvaný Deployment tool. Jedná se o grafické uživatelské rozhraní, které vám umožní vytvářet M-files (spustitelné soubory programu

Matlab) do .NET assembly.[1] Deployment tool umožňuje také package (zabalení) projektu včetně instalačního souboru pro MCR. Tím může libovolný uživatel, který nemá nainstalovanou na svém PC správnou verzi programu Matlab i s potřebnými toolboxy, spouštět aplikace, které ke spustitelným souborům jazyka Matlab přistupují.

B.4 Ukázkový příklad

Na závěr jsem se rozhodl ukázat ukázkový příklad pro spojení mezi aplikací vytvořenou v .NET a programu Matlab.

Příklad bude velice jednoduchý. Vytvoříme jednoduchou konzolovou aplikaci, ve které zavoláme m-file, který realizuje součin dvou matic:

1. Vytvořte nový m-file v programu Matlab. To můžete udělat např. tak, že otevřete vývojové prostředí jazyka Matlab, kliknete v horní části obrazovky na menu File ⇒ New⇒ M-File.

2. Napište funkci, která realizuje dané maticové násobení. Soubor uložte jako *soucin.m*. Daná funkce může vypadat např. takto:

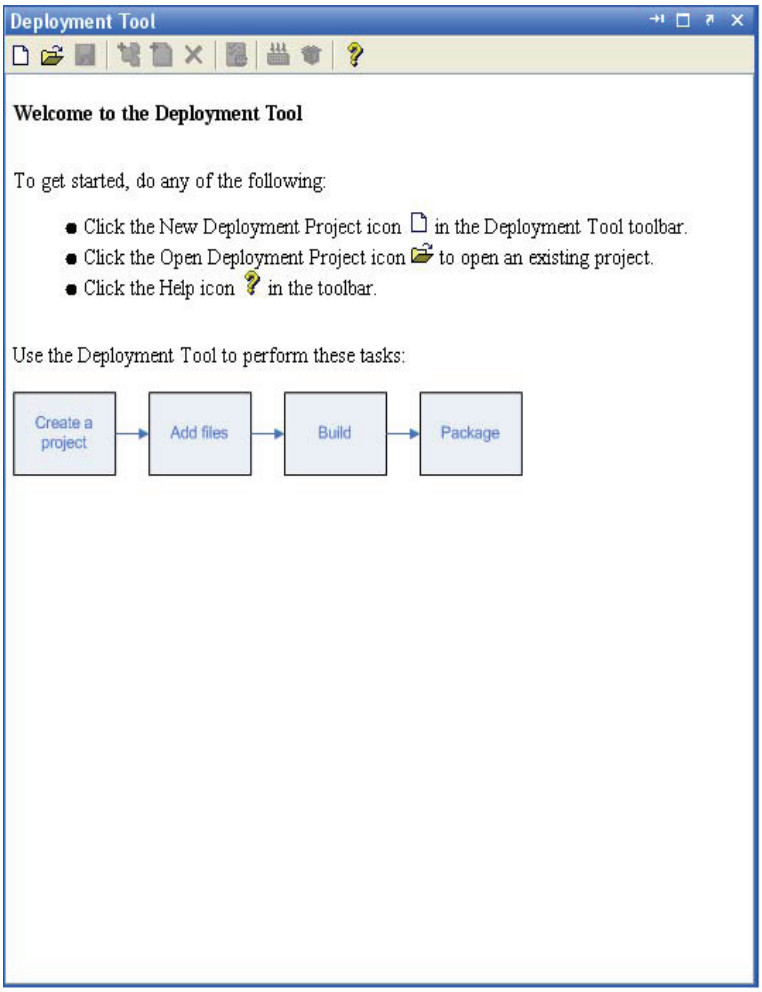
```
function matice=soucin(A,B)
    [m,n]=size(A);
    [o,p]=size(B);

    if(o==n)
        matice=A*B;
    else
        matice=null(1);
    end

return;
```

Všimněte si, že v kódu také kontrolujeme, zda sedí rozměry matic, které se mezi sebou násobí, neboť jak známo, maticové násobení není definováno pro libovolné matice.

[1] Assembly je celkové sestavení aplikace v prostředí .NET. Jedná se o spustitelný .exe soubor nebo dynamicky linkovanou knihovnu .dll

V případě, že rozměry nesedí, vracíme nulovou hodnotu.

3. Otevřte Deployment tool toolboxu Matlab Builder NE. Nejjednodušší cesta ke spuštění Deployment tool je napsat do příkazového řádku v programu Matlab *deploytool*. Pokud máte toolbox zakoupen a nainstalován, otevře se jednoduché grafické okno na obr. B.1. Nyní přeložíme soubor soucin.m

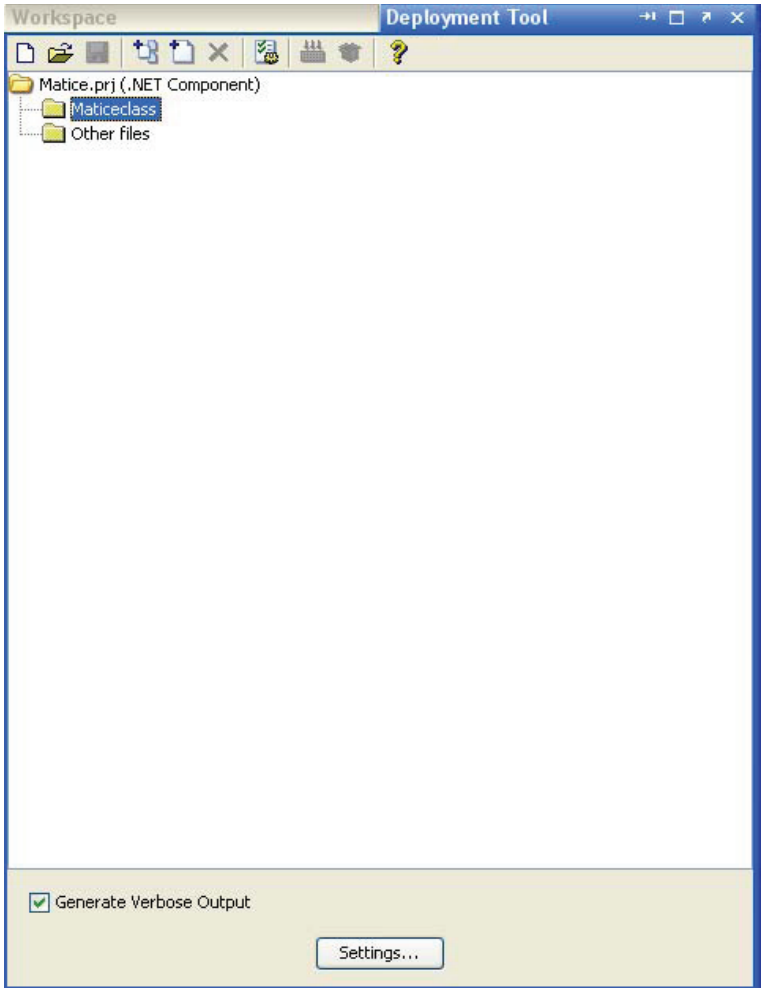


Obrázek B.1: Deployment tool

V horní části obrazovky se nachází menu. Klikněte na ikonku s listem. Tím vytvoříte nový projekt. V okně s nabídkou vytvoření projektu vyberte projekt Matlab builder NE ⇒ .NET Component. V dolní části okna můžete projekt pojmenovat a uložit ho na Vámi definovanou cestu. Pojmenujte ho tedy např. *Matice.prj* (nedoporučuje se pojmenovávat stejně jako m-file) a uložte ho do stejného adresáře jako je m-file *soucin.m*.

Vidíme, že grafické okno Deploy tool se změnilo. V adresáři Matice.prj se vytvořily dva nové adresáře – Maticeclass a Other files. Tyto adresáře ale ve skutečnosti neexistují, jsou pouze virtuální.

Do složky *Maticeclass* budeme ukládat vytvořené soubory m-file a do složky *Other files* budeme ukládat jiné soubory, se kterými dané soubory m-file komunikují. Bude se jednat např. o datové soubory programu Matlab s příponou .mat, obrázky, grafy apod. Pokud jste postupovali správně. Měli byste vidět okno Deploy tool, které vypadá obdobně jako obr. B.2.

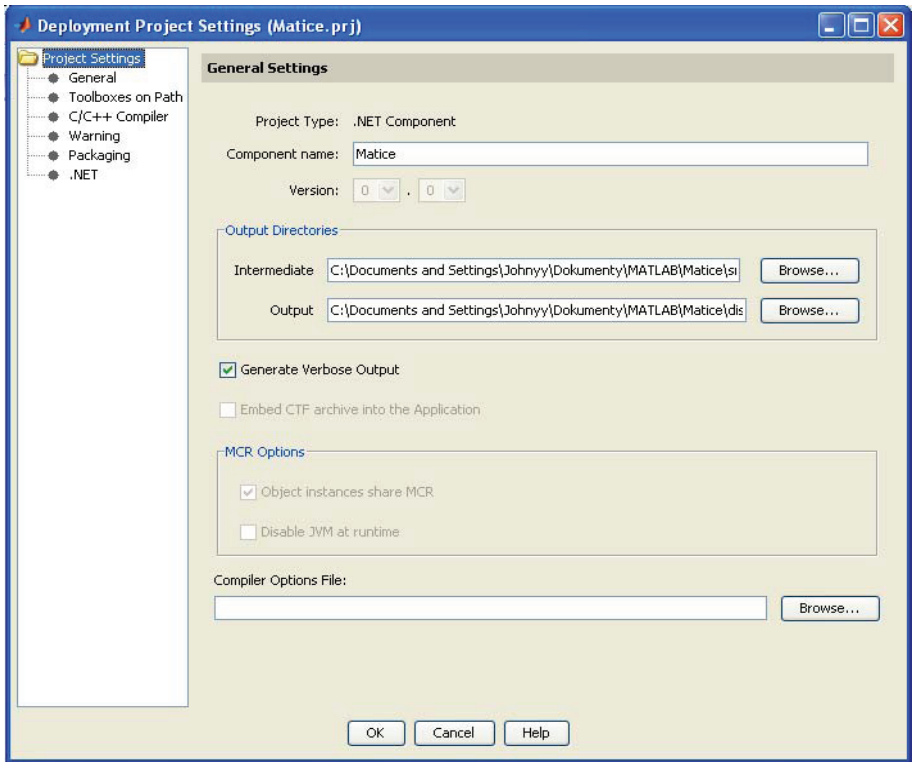


Obrázek B.2: Deployment tool

V okně deploy tool nyní klikněte pravým tlačítkem myši na složku *Maticeclass* a vyberte možnost Add File. V dialogovém okně poté vyberte soubor *soucin.m*. Soubor *soucin.m* by se měl přidat do adresáře *Maticeclass*. Tím jsme dokončili celý „vývoj“ pro-

jektu. Projekt uložte kliknutím na třetí ikonku zleva s disketou v menu v horní části okna.

4. Nastavení před kompilací. Tento bod návodu můžete klidně přeskočit, protože funkčnost aplikace určitě nenaruší. Jde jen o několik nastavení, které se mohou v budoucnu hodit. V okně Deploy tool klikněte na sedmou ikonku zleva (list se žlutým kolečkem vpravo dole). Tím se otevře nastavení projektu, viz. obr. B.3.



Obrázek B.3: Project settings

Vidíme, že v okně s nastavením je široká možnost nastavení kliknutím na položky v seznamu v levé části okna:

- General
- Toolboxes on Path
- C, C++ Compiler
- Warning
- Packaging

- .NET

Pod položkou **General** se nachází hlavní nastavení projektu. V textovém poli *Component name* lze nastavit jméno komponenty, pod kterým bude projekt viditelný pro aplikaci napsanou v .NET. Dále lze v kolonce *Output* nastavit výstupní adresář po překladu. Zaškrtávací tlačítko *Generate Verbose Output* slouží k zobrazení kompletního výpisu o procesu během buildingu aplikace v programu Deploy tool.

Položka s názvem **C, C++ Compiler** se věnuje nastavení „céčkového“ kompilátoru, který je používán při překladu aplikace do dynamicky linkovaných knihoven pro .NET. Toto nastavení obvykle nebudeme užívat, více se o něm můžete dozvědět v podrobném manuálu.

Pod položkou **Toolboxes on path** lze zaškrtnout všechny toolboxy, které se mají k dané aplikaci přibalit. Pokud některý z těchto toolboxů odškrtnete, potom nepůjdou jeho funkce z prostředí .NET zavolat.

Pro nás bude důležitá položka **Packaging**. Tímto nastavením lze docílit toho, že se nám výsledná aplikace v programu Matlab zabalí a lze k ní zahrnout i zmiňovaný instalační soubor MCR, o kterém byla řeč v sekci B.2. Přibalení instalačního souboru pro MCR lze udělat tak, že zaškrtnete check box *Include Matlab Compiler Runtime*, tím lze poté nastavit cestu k instalačnímu souboru MCR. Pokud se na vašem PC tento instalační soubor nachází, Matlab by ho měl sám najít a vyplnit cestu do příslušné kolonky pod zaškrtávacím tlačítkem. V poli *Additional Files* lze k souborům, které budou tvořit výslednou aplikaci (v našem případě tedy pouze soubor soucin.m) přibalit ještě další soubory. Může se jednat např. o různé námi vytvořené návody k použití apod. Soubory se přidávají celkem jednoduše. Rozkliknete políčko s místním diskem, ve kterém se nachází váš soubor, stejným způsobem se lze doklikat až na místo určení daného souboru. Pak stačí zmáčknout tlačítko *Add*.

Nastavení **Warnings** specifikuje, která varování se mají zobrazit během kompilace ve výstupním okně programu Matlab.

Pod poslední položkou **.NET** v nastavovacím menu lze nastavit dva parametry pro výslednou knihovnu .NET. Prvním parametrem je nastavení verze Microsoft Frameworku, v níž bude výsledná aplikace používána. Microsoft Framework je sada nezbytných souborů a knihoven pro vývoj a spouštění aplikací v prostředí .NET. Microsoft Framework se stahuje spolu s novými aktualizacemi. V nastavení lze vybrat buď verzi 1.1 nebo 2.0. Druhý parametr, který lze nastavit pod položkou **.NET** jsou soukromé (private) nebo sdílené (shared) assembly projektu.

5. Nyní nezbývá nic jiného než celý projekt přeložit. V okně deploy tool klikněte v menu na třetí ikonku zprava se třemi šipkami. Tím se začne projekt překládat. Celý překlad bude malou chvíli, přibližně do 2 minut, trvat. Pokud jste neodznačili možnost *Generate Verbose Output*, měli byste po překladu vidět konečný výpis po překladu projektu. Z výpisu se lze dozvědět, jestli se při překladu nevyskytla nějaká chyba. Package projektu lze udělat kliknutím na předposlední ikonku s balíčkem.

Pokud jste udělali vše podle předchozích kroků, vstupte do stejného adresáře jako je soubor *soucin.m* a v něm byste měli vidět nově vytvořený adresář, který se jmenuje stejně jako název vašeho projektu. V adresáři se nacházejí dvě další složky – *distrib* a *src*. Nás bude zajímat složka *distrib*, ve které se nachází tzv. distibuční jednotka, neboli spustitelný a přenositelný projekt. V našem případě soubor *Matice.dll*.

6. Poslední věcí, kterou je třeba udělat, je vytvoření programu běžícím pod .NET, který bude pracovat s dynamicky linkovanou knihovnou *Matice.dll*. Vytvořte tedy jednoduchý program, nejlépe konzolovou aplikaci v jazyce C#, která připraví dvě matice, které budou parametrem pro m-file *soucin.m*. Projekt můžete vytvořit např. ve Visual Studio 2008 Express Edition, které je k dispozici zdarma. Já jsem vytvořil soubor *program.cs*, který se nachází ve jmenném prostoru *Soucin*.

Do projektu je dále nutné přidat referenci *Mathworks, .NET MWArray API* – knihovna *MWArray.dll*. Tato knihovna nám dovolí pracovat s datovými typy tak, že budeme z polí dělat matice, neboť jak známo, v programu Matlab je základním datovým typem matice.

Celý kód potom vypadá následovně:

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using MathWorks.MATLAB.NET.Arrays;
using MathWorks.MATLAB.NET.Utility;

namespace Soucin
{
    class Program
```

```
{
    static void Main(string[] args)
    {

        try
        {
           //vytvoreni instance od tridy Maticeclas
            Matice.Maticeclass m = new Matice.Maticeclass();
           //tato instance bude slouzit ke komunikaci s Matlabem

            //vytvoreni poli, ktere predstavuji dane matice
            double[,] a = new double[2,3] { {1, 3, 5},{-2, 4, 1}};
            double[,] b = new double[3,1] { {1}, {2}, {-4}};

            //prevedeni poli na matice
            MWNumericArray mwnA = new MWNumericArray(a);
            MWNumericArray mwnB = new MWNumericArray(b);

            //zde volame funkci soucin z Matlabu
            MWArray vysledek = m.soucin(mwnA, mwnB);

            //Otestujeme, zda je vysledek numericka matice
            if (vysledek.IsNumericArray)
            {
                //vypiseme vyslednou matici na obrazovku
                Console.WriteLine(vysledek);
                Console.ReadKey();
                }

            }

        catch (Exception ex)
        {
            //Pokud nastane chyba vypiseme ji na obrazovku
            Console.WriteLine(ex.ToString());
```

```
                Console.ReadKey();
            }



        }
    }
}
```

Pokud program spustíte, vypíše se Vám výsledná matice na obrazovku. Všimněte si, že jsme v programu přidali dva jmenné prostory příkazem using MathWorks.MATLAB.NET. Arrays; a using MathWorks.MATLAB.NET.Utility;

Pokud jste při kompilaci aplikace v programu Deploy tool využili i možnosti packaging, měli byste ve složce *distrib* měli vidět soubor *Matlab_pkg.exe*. Tento soubor obsahuje celý zabalený projekt. Pokud tento soubor spustíte, program Vám automaticky projekt rozbalí a vytvoří instalační soubor pro MCR.

Příloha C

Obsah přiloženého CD

- elektronická podoba této práce ve formátu .pdf (bc_prace.pdf)
- uživatelská aplikace vč. zdrojových kódů (adresář Simulator)
- návod k použití uživatelské aplikace (manual.pdf)
- komunikace mezi prostředím .NET a Matlab (komunikace.pdf)
- návod k použití toolboxu Matlab Builder NE 3 (dotnetbuilder.pdf)
- všechny tabulky použité k práci (adresář Tabulky)
- zdrojové kódy programu pro Matlab (adresář M-files)